

В. Д. Мигаль

**ТЕХНИЧЕСКАЯ
ДИАГНОСТИКА
АВТОМОБИЛЬНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Том 1

**Объекты и методы
диагностирования**

*Рекомендуется ученым советом Харьковского национального
автомобильно-дорожного университета в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся
по специальностям «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
«Двигатели внутреннего сгорания» (протокол № 9 от 30.05.2014)*

Харьков
«Майдан»
2014

УДК 629.33
ББК 30
М 57

Рецензенты: **Бажинов А. В.**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автомобильная электроника» Харьковского национального автомобильно-дорожного университета

Парсаданов И. В., д-р техн. наук, профессор, кафедра «Двигатели внутреннего сгорания» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

Самородов В. Б., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автомобиле- и тракторостроения» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

Мигаль В. Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учебное пособие в 3-х томах. Т.1. Объекты и методы диагностирования / В. Д. Мигаль. – Харьков: Майдан, 2014. – 459 с.

ISBN 978-966-372-551-2.

ISBN 978-966-372-552-9 (т. 1)

Том 1. Объекты и методы диагностирования.

Том 2. Неисправности, параметры и средства диагностики.

Том 3. Практические основы диагностирования.

Представлены характеристики узлов и компонентов объектов диагностирования механических, газо-, гидро-, аэродинамических, электрических и электронных систем двигателя.

Рассмотрены применяемые приборы и компоненты электронных систем управления двигателем, систем всасывания воздуха, аккумуляторных систем подачи топлива, насосов и регуляторов давления топлива, электромагнитных, пьезоэлектрических и насос-форсунок впрыска топлива, схемы расположения компонентов систем управления бензиновых и дизельных двигателей.

Представлена классификация методов оценки диагностической информации на теоретическом, эвристическом и эмпирическом уровнях. Рассмотрены интеллектуальные системы методов тестового и функционального диагностирования, определения технического состояния двигателей по эталонам, маскам, составу отработавших газов и нормативным диагностическим параметрам.

Описаны виброакустические методы контроля и диагностирования двигателя, программные, логические и автоматизированные методы диагностирования по дымности и составу отработавших газов и продуктов износа в масле. Изложены методы контроля технического состояния электрических и электронных систем двигателя, гидроприводов, трущихся деталей и смазочной способности масел.

Для преподавателей, аспирантов и студентов профильных учебных заведений, организаций и специалистов СТО и АТП по диагностике и техническому обслуживанию двигателей и автомобилей.

УДК 629.33
ББК 30

ISBN 978-966-372-551-2.

ISBN 978-966-372-552-9 (т. 1)

© В. Д. Мигаль, 2014

Содержание

Предисловие	9
1. Объекты диагностики механических и газогидроаэродинамических систем двигателей	13
1.1. Основные определения, параметры и эксплуатационные свойства двигателей	13
1.2. Механизмы систем двигателя и их неисправности	18
1.3. Рабочий процесс (цикл) четырехтактных двигателей	26
1.4. Гидравлические системы топливоподачи и впрыска топлива дизеля с электромеханической системой управления	32
Контрольные вопросы.....	33
1.5. Компоненты систем питания воздухом	34
Контрольные вопросы.....	43
1.6. Системы улавливания паров бензина, анализа состава отработавших газов и их выпуска	44
Контрольные вопросы.....	47
1.7. Компоненты аккумуляторной системы подачи топлива бензинового двигателя	47
1.7.1. Классификация систем питания.....	47
1.7.2. Аккумуляторы системы подачи топлива	48
1.7.3. Виды, устройство и работа электромагнитных форсунок	51
1.7.4. Топливная система двигателя с пьезоэлектрическими форсунками	57
1.7.5. Насосы и регуляторы давления.....	60
1.7.6. Датчики систем измерения давления и положения дроссельной заслонки.....	62
1.7.7. Смесеобразование, распыление топлива и режимы работы двигателя	64
Контрольные вопросы.....	69
1.8. Топливные насосы и регуляторы давления топлива дизельных двигателей	70
1.8.1. Системы впрыска с рядным ТНВД.....	73
1.8.2. Системы впрыска с распределительным ТНВД.....	75
1.8.3. Система впрыска с индивидуальным ТНВД	82
1.8.4. Аккумуляторные топливные системы Common Rail	84
Контрольные вопросы.....	87
1.9. Компоненты аккумуляторной системы впрыска топлива дизельных двигателей	87
1.9.1. Система топливоподачи и компоненты аккумуляторной системы впрыска топлива	87
1.9.2. Компоненты аккумуляторной систем	89
1.9.3. Форсунки систем впрыска топлива	99
1.9.3.1. Электрогидравлические форсунки	99
1.9.3.2. Системы впрыска с пьезоэлектрическими форсунками ..	102
1.9.3.3. Система впрыска с насос-форсунками	104
Контрольные вопросы.....	109
2. Объекты диагностики электронных систем двигателей	110
2.1. Основные принципы автоматического управления двигателем	110
2.2. Обработка сигналов в электронном блоке управления.....	112

2.3. Передача данных другим системам	114
2.4. Общие сведения о применяемых средствах в электронных системах двигателей.....	117
Контрольные вопросы.....	124
2.5. Классификация систем впрыскивания топлива	124
Контрольные вопросы.....	133
2.6. Системы впрыска бензиновых двигателей.....	133
2.6.1. Система многоточечного впрыска топлива.....	134
2.6.2. Система однокоточного впрыска топлива	144
2.6.3. Системы впрыска с внутренним смесеобразованием.....	146
Контрольные вопросы.....	151
2.6.4. Системы управления зажиганием бензиновых двигателей.....	151
2.6.4.1. Системы зажигания.....	151
2.6.4.2. Микропроцессорные системы управления зажиганием и впрыском в бензиновых двигателях	155
Контрольные вопросы.....	159
2.6.5. Системы управления впрыском, длительностью и объемом впрыска топлива.....	159
2.6.5.1. Схемы управления впрыском	159
2.6.5.2. Управление впрыском топлива	162
2.6.5.3. Коррекция впрыска и состава рабочей смеси.....	165
2.6.6. Компоненты системы регулирования расхода топлива	169
Контрольные вопросы.....	170
2.7. Системы управления дизельным двигателем.....	171
2.7.1. Системы и компоненты впрыска топлива	171
2.7.2. Функциональные возможности систем управления двигателем ..	177
2.7.3. Преимущества и недостатки электронных систем управления двигателем.....	183
2.7.4. Размещение и взаимосвязь компонент систем управления двигателем.....	185
2.8. Компоненты системы регулирования температуры охлаждающей жидкости и дроссельной заслонки	190
Контрольные вопросы.....	192
3. Методы исследований и диагностики двигателей	193
3.1. Классификация методов диагностирования и области их применения	193
3.2. Интеллектуальные методы диагностирования	198
3.2.1. Методы диагностирования на эвристическом и теоретическом уровнях	198
3.2.2. Структура человеческих и технических систем диагностирования.....	206
3.2.3. Достоинства человеческих систем диагностирования	208
3.2.4. Диагностические и физиологические характеристики анализаторов человека.....	212
3.3. Экспертные методы диагностирования	214
3.3.1. Области применения экспертных методов	214
3.3.2. Основные положения теории экспертного прогнозирования	215
Контрольные вопросы.....	222
3.4. Методы диагностических исследований на эмпирическом уровне.....	222

3.4.1. Основные методы эмпирических исследований.....	222
3.4.2. Классификация методов диагностирования по виду контролируемых физических процессов и способу получения информации	224
3.4.3. Виды диагностирования по организационным признакам	233
Контрольные вопросы.....	235
3.5. Методы тестового и функционального диагностирования	235
3.5.1. Методы тестового диагностирования	235
3.5.2. Методы диагностирования по функциональным параметрам	238
Контрольные вопросы.....	242
3.6. Методы диагностирования по эталонам, маскам и нормативным параметрам	242
3.6.1. Метод сравнения с эталонным образцом.....	242
3.6.2. Методы совмещения с эталоном.....	243
3.6.3. Методы контроля по нормативным значениям диагностических параметров	245
Контрольные вопросы.....	252
3.7. Тепловой и оптический методы диагностирования	252
3.7.1. Тепловые методы.....	252
3.7.2. Оптические методы.....	254
Контрольные вопросы.....	258
3.8. Методы контроля износа трущихся деталей и смазочной способности масел.....	258
3.8.1. Методы контроля изнашивания деталей и критерии оценки технического состояния двигателей	258
3.8.1.1. Классификация методов контроля изнашивания деталей.....	258
3.8.1.2. Критерии оценки технического состояния автомобильных двигателей	262
Контрольные вопросы.....	266
3.8.2. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов двигателя на ресурс моторных масел.....	266
3.8.2.1. Критерии прогнозирования ресурса масел	266
3.8.2.2. Факторы, влияющие на скорость и зависимость изнашивания трущихся деталей	268
3.8.2.3. Факторы, влияющие на периодичность замены масла	274
3.8.2.4. Браковочные показатели качества масла.....	275
3.8.2.5. Средства контроля качества масла.....	278
Контрольные вопросы.....	280
3.8.3. Диагностирование износов деталей механизмов методами спектрального анализа смазочных масел	281
3.8.3.1. Область применения методов спектрального анализа масел	281
3.8.3.2. Спектральный анализ масел двигателями установками МФС.....	285
3.8.3.3. Достоверность диагностирования двигателя по спектральному анализу масла.....	290

3.8.3.4. Определение качественных и количественных параметров смазочных масел и присадок методом инфракрасной Фурье-спектроскопии.....	294
3.8.3.5. Методы определения продолжительности работы моторного масла.....	295
Контрольные вопросы.....	301
3.8.4. Диагностические показатели состояния масла.....	301
3.8.4.1. Оценка показателей качества масла.....	301
3.8.4.2. Оценочные показатели изнашивания моторных масел ...	307
3.8.4.3. Расчет оценочных показателей продолжительности работы масла.....	309
3.8.5. Восстановление свойств моторного масла.....	311
3.8.5.1. Метод регенерации.....	311
3.8.5.2. Восстановление смазывающих свойств масел добавлением присадок.....	313
3.8.5.3. Взаимозаменяемость моторных масел.....	315
3.8.6. Расчетные методы определения структурных и диагностических параметров.....	316
Контрольные вопросы.....	321
3.9. Программные, логические и автоматизированные методы контроля и диагностирования.....	322
3.9.1. Алгоритмы и программы диагностирования электромеханических систем.....	322
3.9.2. Системы автоматического контроля и диагностирования.....	323
3.9.3. Классификация программных методов диагностики электронных технических систем.....	327
3.9.4. Разработка программного диагностического обеспечения.....	333
3.9.5. Логические и сигнатурные методы диагностирования компонентов информационно-вычислительных комплексов.....	335
Контрольные вопросы.....	338
3.10. Методы контроля и диагностирования гидравлических систем и гидроприводов двигателей.....	338
Контрольные вопросы.....	348
3.11. Методы диагностирования по энергетическим и гидравлическим параметрам, угловой скорости валов и рабочим процессам.....	348
3.12. Вибродиагностические методы и средства диагностирования и доводки отдельных двигателей и в составе машин.....	350
3.12.1. Свойства вибрационных сигналов.....	350
3.12.1.1. Области применения виброакустических методов.....	350
3.12.1.2. Связь вибрации с динамическим состоянием механизмов машин.....	354
Контрольные вопросы.....	357
3.12.2. Диагностирование методами спектрального анализа вибрации.....	358
3.12.2.1. Спектральный анализ вибрации в широких и узких полосах.....	358
3.12.2.2. Метод спектрального анализа огибающей.....	366
3.12.2.3. Метод спектрального анализа вибрации на резонансной частоте детали, узла, агрегата.....	370

Контрольные вопросы.....	372
3.12.3. Методы углубленного диагностирования источников вибрации.....	372
3.12.3.1. Метод разделения фазовых соотношений сигналов....	372
3.12.3.2. Амплитудно-временной анализ сигналов вибрации ...	374
3.12.3.3. Кепстральный анализ вибрации.....	376
3.12.3.4. Корреляционный анализ спектра вибрации	378
Контрольные вопросы.....	380
3.12.4. Статистические методы оценки технического состояния объекта диагностирования.....	380
Контрольные вопросы.....	385
3.12.5. Методы пик-фактора, акустической эмиссии и опорных спектров-масок.....	385
3.12.5.1. Метод пик-фактора.....	385
3.12.5.2. Метод определения акустической эмиссии	387
3.12.5.3. Методы вибрационного диагностирования с использованием опорных спектров-масок	389
Контрольные вопросы.....	391
3.12.6. Методы определения динамических вибрационных характеристик отдельных двигателей и в составе транспортных машин	391
3.12.6.1. Необходимость изучения и нормирования вибрационных характеристик.....	391
3.12.6.2. Необходимость изучения динамических характеристик	393
3.12.6.3. Объем диагностических испытаний	395
3.12.6.4. Методы тестовой диагностики динамических характеристик объектов транспортных машин	396
3.12.6.5. Требования к стендам и аппаратным средствам вибрационных диагностических испытаний двигателей.....	399
3.12.6.6. Методы определения и устранения резонансной вибрации.....	403
Контрольные вопросы.....	406
3.12.7. Методы собственных частот вибрации, форм деформации резонансов и податливости конструкции	406
3.12.7.1. Определение собственных частот вибрации и форм деформаций.....	406
3.12.7.2. Измерение формы деформации	409
3.12.7.3. Способы распознавания резонансов.....	410
3.12.7.4. Определение механического сопротивления и податливости конструкции	412
Контрольные вопросы.....	414
3.12.8. Методы и способы управления спектром вибрации при доводке динамических характеристик двигателя и транспортной машины.....	414
3.12.8.1. Способы улучшения динамических свойств конструкции.....	414

3.12.8.2. Методы разделения источников вибрации, возбуждаемой агрегатами машин.....	419
3.12.8.3. Методы последовательного исключения источников вибрации.....	422
3.12.8.4. Методы доводки конструкции и структурных параметров машин	424
3.12.8.5. Связь между вибрацией и шумом и методы их разделения.....	425
Контрольные вопросы.....	428
3.13. Методы и средства контроля электрических и электронных систем управления двигателем автомобиля	429
3.13.1. Объекты и методы распознавания неисправностей отдельных элементов и блоков систем	429
3.13.2. Выбор методов и контролируемых параметров.....	434
3.13.3. Классификация систем контроля и диагностирования.....	435
3.13.4. Виды диагностики технических систем	437
3.13.5. Методы диагностики технических систем.....	439
3.13.6. Аппаратные методы диагностики технических систем	440
Контрольные вопросы.....	444
Литература	446
Предметный указатель	451

Предисловие к трехтомному изданию учебного пособия

Двигатель внутреннего сгорания – наиболее сложный и важный агрегат транспортных машин, от состояния которого зависят многие технические, экологические и экономические параметры их эксплуатации. Постоянное повышение эффективности двигателей, проявившееся в автоматизации процессов управления, сильно усложнило их конструкцию, что требует существенного повышения уровня подготовки специалистов по их диагностированию и техническому обслуживанию.

Исходное техническое состояние двигателя зависит от технического уровня проектирования, технологии производства, доводки двигателя. Сохранение проектного качества двигателя в эксплуатации зависит от уровня заложенной надежности и эффективности бортового диагностического обеспечения, технического обслуживания, уровня проведения текущего диагностирования внешними средствами. Поэтому создание двигателей требует системного подхода к диагностическому обеспечению всех стадий их жизненного цикла.

Основными задачами исследований технической диагностики при проектировании является недопущение конструктивного дефекта, на этапе производства – технологического дефекта как каждого несоответствия проекту. Проектирование и изготовление включает в часть своих диагностических задач недопущение неисправностей и отказов в эксплуатации, недопустимое изменение заданных технических свойств объектов двигателя в гарантийный период.

Проектный уровень диагностического обеспечения двигателя определяется достаточным количеством и заложенной глубиной диагностирования неисправностей, их параметров, уровнем доводки бортовой диагностической системы до заданной надежности и достоверности диагностирования. Однако доля диагностирования двигателей внешними средствами из-за недостаточного диагностирования бортовыми системами продолжает оставаться очень высокой.

При диагностировании двигателей в эксплуатации основными требованиями к субъекту решения задачи являются хорошие знания устройства и рабочих процессов двигателя, закономерностей изменения его технического состояния в эксплуатации, возможных отказов и неисправностей, их диагностических параметров, методов, средств и процесса диагностирования. Уровень таких знаний по двигателю в системе автомобиля определяет квалификацию специалиста-диагноста.

Знания рабочих процессов двигателя в системе автомобиля, типовых неисправностей, их диагностических параметров и методов диагностирования позволяют построить математические модели объектов диагностирования, диагностические матрицы, таблицы, структурно-следственные схемы и в необходимом объеме математический аппарат алгоритма диагностирования. А знание средств, методов и алгоритмов распознавания неисправностей – разработать программное обеспечение электронных систем диагностирования. Но фактически в существующих учебных рабочих программах, учебных пособиях и учебниках по дисциплине «Автомобильные двигатели» такие комплексные знания по диагностированию двигателей студентам не предоставляются. Эти пособия посвящены конструкции двигателей и действующим в них рабочим процессам. В учебных рабочих программах практически не рассматриваются вопросы проектирования диагностического обеспечения двигателей, а их решение требует высокого уровня

знаний типовых дефектов и неисправностей, их диагностических параметров, методов и средств диагностирования. Таким образом, на кафедрах «Двигатели» студенту не предоставляют возможности получить основные знания по диагностике автомобильных двигателей.

В настоящее время все проблемы диагностирования автомобильных двигателей отнесены к кафедрам эксплуатации автомобилей. В учебных пособиях этих кафедр вопросы диагностирования двигателей рассматриваются лишь в некоторых разделах по эксплуатации и техническому обслуживанию автомобилей. Отсутствие системного учебного пособия по диагностике двигателя не создает возможностей улучшения учебных рабочих программ по диагностике автомобилей и возможности самостоятельного получения студентами знаний диагностики автомобильных двигателей.

Нашей целью является устранение названных пробелов в предоставлении студентам системных знаний по диагностике автомобильных двигателей. В основу такого подхода положена наша концепция «Анализ развития и задачи подготовки высококвалифицированных специалистов по технической диагностике транспортных машин (Автомобильный транспорт. Сб. науч. трудов. – Вып. 29. Х.: 2011. – С. 172-178.)

Реализация комплексных требований к подготовке высококвалифицированных специалистов по диагностике двигателей потребовала написания трех книг (томов) систематизированного теоретического и практического материала из знаний конструкции двигателя, его неисправностей, их диагностических параметров, методов и средств диагностирования, а также практики диагностирования двигателей.

В первом томе представлены характеристики узлов и компонентов объектов диагностирования механических, газогидроаэродинамических, электрических и электронных систем двигателей. Детально рассмотрены методы диагностирования этих технических систем. Приведены применяемые приборы и компоненты электронных систем управления двигателем, систем всасывания воздуха, аккумуляторных систем подачи топлива, насосов и регуляторов давления топлива, электромагнитных, пьезоэлектрических и насос-форсунок впрыска топлива, схемы расположения компонентов систем управления бензиновых и дизельных двигателей.

Представлена классификация методов оценки диагностической информации на теоретическом, эвристическом и эмпирическом уровнях. Рассмотрены интеллектуальные системы методов тестового и функционального диагностирования, определения технического состояния двигателей по эталонам, маскам, составу отработавших газов и нормативным диагностическим параметрам.

Описаны виброакустические методы контроля и диагностирования двигателя, программные, логические и автоматизированные методы диагностирования по дымности и составу отработавших газов и продуктов износа в масле. Изложены методы контроля технического состояния электрических и электронных систем двигателя, гидроприводов, трущихся деталей и смазочной способности масел.

Во втором томе представлены технические характеристики автомобильных двигателей внутреннего сгорания, неисправности двигателей с аналоговой и электронной системами управления. Описаны неисправности, структурные и функциональные диагностические параметры систем ЦПГ, КШМ, ГРМ, смазки, охлаждения, расхода топлива, зажигания и впрыска топлива, компонентов систем

электронного управления двигателем; закономерности изменения структурных и функциональных параметров двигателей в эксплуатации.

Представлены средства контроля и диагностирования технических систем двигателя по внешним признакам. Диагностирование ЦПГ, КШМ, ГРМ, системы смазки и качества масла, систем охлаждения, питания, состояния форсунок, определения дымности и содержания вредных веществ в отработавших газах, средства контроля и диагностирования электронных систем управления двигателя.

Третий том посвящен вопросам практического диагностирования механических, газогидроаэродинамических, электрических и электронных систем двигателя.

В разделе диагностирования механических и газогидроаэродинамических систем двигателя представлены внешние признаки возможных неисправностей и правила их оценки, диагностирование неисправностей по структурно-следственным, функционально-структурным параметрам и моделям, функционально-логическим и диагностическим матрицам. Рассмотрены методы и средства диагностирования ЦПГ, КШМ, ГРМ по структурным и функциональным параметрам измерения давления в цилиндре в конце такта сжатия (компрессии), угловой скорости и сопротивлению прокручивания коленчатого вала, давлению во впускном трубопроводе, расходу масла на угар, разрежению в цилиндре и впускном коллекторе (вакуумметр), давлению воздуха, подаваемого в цилиндры (компрессометр); определение технического состояния двигателя по местам утечек подаваемого сжатого воздуха, спектральному анализу масла, давлению масла в системе смазки, расходу топлива, составу отработавших газов, величинам тепловых зазоров, герметичности клапанов, пульсации давления в гидравлическом аккумуляторе и частоты вращения коленчатого вала. Рассмотрено диагностирование систем пуска и питания двигателей по воздухоподаче и герметичности системы питания, топливных систем по параметрам угла опережения впрыска, высокого и низкого давления топлива, создаваемого насосами, по герметичности давления топлива и качеству распыления топлива форсунками, количеству топлива, впрыскиваемого за один рабочий цикл; описаны методы и средства, преимущества и недостатки промывки форсунок, диагностирование систем охлаждения двигателей с аналоговой и микропроцессорной системами управления по дымности, температуре и составу отработавших газов, изменению мощности и давления наддува, индикаторному и механическому КПД двигателя, диагностирование системы смазки.

В разделе диагностирования электронных систем рассмотрены бортовые диагностические системы, структура программного обеспечения и нормативные требования OBD-II, структура кодов ошибок и неисправностей, протоколы обмена данными в OBD-II, международные стандарты, устанавливающие связь между блоками управления двигателем (автомобилем) и диагностическим оборудованием, диагностические коды и карты неисправностей двигателя в системе автомобиля; диагностирование двигателя бортовой системой самоконтроля, по таблицам неисправностей и функциональным параметрам, причинно-следственным связям, по расходу и давлению топлива. Освещены вопросы диагностирования электронных систем управления и работой топливного насоса, подачи топлива, регулятора давления топлива в гидравлическом аккумуляторе, контроля форсунок и цикловой подачи топлива, датчиков и исполнительных устройств электронных систем управления двигателем, правильности функционирования систем бортовой диагностики. Описаны действующие сигналы датчиков и интерпретация их осцилло-

грамм. Приведены рекомендации по локализации неисправностей системы зажигания, поиска неисправностей при аварийной работе двигателя автомобиля, контроля и диагностирования общего электрооборудования двигателя и автомобиля.

Изложенный материал характеризуется объективностью, научностью и четкой логической последовательностью, которая формирует в учащихся основные знания по технической диагностике автомобильных двигателей. А инженер имеет возможность использовать представленный в учебном пособии материал и решать конкретные практические задачи технического диагностирования автомобильных двигателей.

Содержание учебных пособий может служить хорошим источником для разработки учебных рабочих программ по предоставленным к освоению студентами базовых знаний по диагностике автомобильных двигателей, по выбору тем курсовых и дипломных работ по доводке и созданию технических заданий на проектирование диагностического обеспечения, диагностирования при техническом обслуживании, выявлении и устранении неисправностей и отказов двигателей.

Выражаю откровенную благодарность всем авторам учебников, монографий, журнальных статей и диссертаций, выдержки из которых использованы при написании этих книг и ссылки на которые сделаны в списке литературы.

Автор глубоко благодарен уважаемым рецензентам учебного пособия за важные рекомендации по улучшению его качества, за поддержку, постоянное внимание и понимание необходимости написания такого учебного пособия.

Искренне благодарен сотрудникам ХНАДУ д. т. н., профессору А. Н. Пойде и к. т. н., доценту Е. Ю. Зенкину за полезные консультации, к. т. н., доценту Н. П. Булгакову за предоставленные иллюстрации к содержанию книги, ст. преподавателю А. И. Жадану за компьютерный набор, компоновку и техническое редактирование учебного пособия.

Автор

1. ОБЪЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОГАЗОАЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДВИГАТЕЛЯ

1.1. Основные определения, параметры и эксплуатационные свойства двигателей

Основные структурные параметры ДВС, связанные с его работой приведены на рис. 1.1.

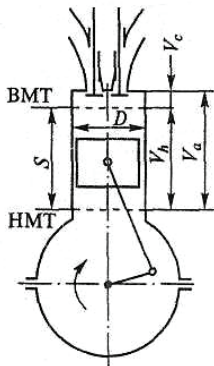
Верхняя мертвая точка (ВМТ) – крайнее верхнее положение поршня. В этой точке поршень наиболее удален от оси коленчатого вала.

Нижняя мертвая точка (НМТ) – крайнее нижнее положение поршня. Поршень наиболее приближен к оси коленчатого вала.

В мертвых точках поршень меняет направление движения, и его скорость равна нулю.

Ход поршня (S) – расстояние между мертвыми точками, проходимое поршнем в течение одного такта рабочего цикла двигателя.

Каждому ходу поршня соответствует поворот коленчатого вала на угол 180° (пол-оборота).



Такт – часть рабочего цикла двигателя, происходящего при движении поршня из одного крайнего положения в другое.

Рабочий объем цилиндра (V_h) – объем, освобождаемый поршнем при его перемещении от ВМТ до НМТ.

Объем камеры сгорания (V_c) – объем пространства над поршнем, находящимся в ВМТ.

Полный объем цилиндра (V_a) – объем пространства над поршнем, находящимся в НМТ:

$$V_a = V_h + V_c$$

Рис. 1.1. Основные параметры двигателя:

S, D, V_h, V_c, V_a - структурные параметры

Рабочий объем (литраж) двигателя – сумма рабочих объемов всех цилиндров двигателя, выраженная в литрах (см^3).

Степень сжатия (ε) – отношение полного объема цилиндра V_a к объему камеры сгорания V_c , т. е.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

Степень сжатия показывает, во сколько раз сжимается смесь в цилиндре двигателя при ходе поршня из НМТ в ВМТ.

При повышении степени сжатия увеличивается мощность двигателя и улучшается его экономичность.

Однако повышение степени сжатия ограничено качеством применяемого топлива и увеличивает нагрузки на детали двигателя.

Степень сжатия для бензиновых двигателей современных легковых автомобилей составляет 8-10, а для дизелей 15-22. При таких степенях сжатия в бензиновых двигателях не происходит самовоспламенение смеси, а в дизелях, наоборот, самовоспламенение смеси обеспечивается.

Ход S поршня и диаметр D цилиндра определяют размеры двигателя. Если отношение $S/D \leq 1$, то двигатель является короткоходным. Большинство двигателей легковых автомобилей короткоходные.

Индикаторные показатели рабочего цикла двигателя. Индикаторные показатели характеризуют эффективность действительного рабочего цикла. К индикаторным показателям относятся среднее индикаторное давление P_i , индикаторная мощность N_i , индикаторный КПД η_i и индикаторный удельный расход топлива g_i .

Средним индикаторным давлением называют такое условное, постоянное по величине давление P_i , которое, действуя на поршень, выполняет работу за один его ход от ВМТ до НМТ, равную полезной работе газов за рабочий цикл. Работа газов равна площади внутри индикаторной диаграммы. Полезная работа газов за один цикл определяется разностью площадей F_1 и F_2 .

Показателем, характеризующим экономичность действительного цикла, является удельный индикаторный расход топлива, равный отношению расхода топлива за час G_{Π} к индикаторной мощности

$$g_i = \frac{G_{\Pi}}{N_i}.$$

Связь между удельным индикаторным расходом топлива и индикаторным КПД выражается следующей формулой:

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u}.$$

Эффективные показатели двигателей. Часть индикаторной мощности двигателя расходуется на преодоление трения в сопряженных узлах двигателя и на привод вспомогательных механизмов. Поэтому мощность, которая развивается на валу двигателя и отдается силовой передаче машины, всегда меньше индикаторной. Эта мощность называется эффективной мощностью двигателя и выражается формулой

$$N_e = N_i - N_M,$$

где N_e – эффективная мощность в кВт; N_M – мощность механических потерь, затрачиваемая на преодоление трения в сопряженных узлах двигателя, на привод вспомогательных механизмов и газообмен.

Средним эффективным давлением P_e называют условно постоянное давление, при котором работа газов, выполненная в цилиндрах двигателя за один ход поршня, равна эффективной работе за цикл.

Если составляющие потерь выразить через среднее давление трения, равное работе трения, отнесенной к 1 м³ рабочего объема цилиндра, то

$$P_3 = P_i - P_M,$$

где P_3 – среднее эффективное давление, МПа; P_M – среднее давление механических потерь, МПа.

Среднее давление механических потерь P_M почти линейно зависит от средней скорости V_{II} поршня и может быть определено из зависимости

$$P_M = a + b \cdot V_{II},$$

где a и b – постоянные коэффициенты, значения которых приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Коэффициенты a и b для двигателей

Двигатели	a , МПа	b , МПа
Дизели:		
с неразделенной камерой сгорания	0,105	0,120
с разделенной камерой сгорания	0,65	0,138
Двигатели с искровым зажиганием:		
S/D > 1	0,05	0,0155
S/D < 1	0,04	0,0135

Эффективная мощность и среднее эффективное давление связаны между собой следующей зависимостью:

$$N_3 = \frac{P_3 \cdot V_h \cdot i \cdot n}{30 \cdot \tau}.$$

Отношение эффективной мощности к индикаторной мощности называется механическим КПД двигателя

$$\eta_M = \frac{N_3}{N_i} = \frac{P_3}{P_i}.$$

Заменив N_3 и P_3 , получим

$$\eta_M = \frac{N_i - N_M}{N_i} = 1 - \frac{N_M}{N_i}, \quad \eta_M = \frac{P_i - P_M}{P_i} = 1 - \frac{P_M}{P_i}.$$

Механический КПД оценивает потери на преодоление трения в сопряженных узлах двигателя, на привод вспомогательных механизмов и газообмен. К этим потерям относятся потери на трение: поршня о стенки цилиндра, в подшипниках коленчатого и кулачкового валов, деталей распределения, а также потери на привод вентилятора, масляного и водяного насосов, генератора, магнето, прерывателя-распределителя, компрессора, нагнетателя и т. д.

Механический КПД зависит от конструктивных параметров двигателя, материала и качества обработки деталей, качества масла и системы смазки, температурного режима, числа оборотов и нагрузки двигателя, числа и конструкции вспомогательных механизмов и ряда других факторов.

Механический КПД тем выше, чем меньше давление, передаваемое через сопряженные узлы, более совершенная система смазки и выше качество масла, лучшие материалы и качество обработки деталей, меньше потери на привод вспомогательных механизмов.

С увеличением числа оборотов и снижением нагрузки механический КПД уменьшается.

Эффективный КПД является показателем, который характеризует экономичность двигателя. Эффективным КПД называется отношение эффективной работы, выраженной в единицах теплоты, к расчетной теплоте сгорания топлива, израсходованного на получение этой работы.

$$\eta_o = \frac{L_o}{G_T \cdot H_u}$$

Если учесть, что

$$L_o = P_o \cdot V_h = P_i \cdot \eta_M \cdot V_h,$$

получим

$$\eta_o = \eta_M \cdot \left(\frac{P_i \cdot V_h}{G_T \cdot H_u} \right)$$

или

$$\eta_o = \eta_M \cdot \eta_i.$$

Если индикаторный КПД учитывает только тепловые потери, то эффективный КПД учитывает и тепловые, и механические потери. Для повышения эффективного КПД необходимо повышать как индикаторный, так и механический КПД. Повышение индикаторного КПД может быть достигнуто усовершенствованием рабочего цикла двигателя, а улучшение механического КПД – снижением механических потерь.

Эффективный КПД для одного и того же двигателя не остается постоянной величиной. Он изменяется в зависимости от режима работы, состава смеси, технического состояния двигателя и других факторов.

Эффективный КПД при полной нагрузке находится в пределах:

- бензиновые двигатели: 0,25-0,32;

- дизельные двигатели: 0,33-0,42.

Основными эксплуатационными свойствами двигателя являются: внешняя скоростная характеристика, топливная экономичность, экологичность и безопасность, управляемость, уровень диагностического обеспечения, надежность, ресурс и ремонтпригодность. Эти свойства двигателей во многом определяют эксплуатационные качества автомобилей.

Сравнительные характеристики дизельных и бензиновых двигателей приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Сравнение характеристик дизельного и бензинового двигателей

Характеристика	Дизельный двигатель	Бензиновый двигатель
Степень сжатия	14:1-24:1	8:1-13:1
Зажигание	Внутреннее	Внешнее
Впрыск	Необходим	Возможен
КПД	35-40-45%	25-30%
Температура выхлопа	700-900 °С	1200 °С

Структурный параметр – параметр, непосредственно характеризующий работоспособность или исправность объекта диагностирования (износ, размер детали).

По структурным (конструктивным геометрическим) параметрам определяют состояние сопряженных деталей и механизмов (износ, величина зазоров, люфтов, биений, свободного хода (например, педали), тепловой зазор в клапанных механизмах, размер и форма детали, натяг в сопряжениях деталей и др.).

На реальный процесс изменения структурных параметров оказывает ряд конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, определяющих их.

Функциональный параметр – параметр, изменение которого выше предельного значения обуславливает утрату работоспособности или неисправность составной части. В результате изменения показателей технической характеристики объекта диагностирования.

Функциональные параметры являются техническими и рабочими характеристиками, интегрально отражающими состояние структурных параметров: снижение эффективной мощности двигателя или частоты вращения вала, производительности масляного насоса, давления открытия перепускного и предохранительного клапанов, давление воздуха в шинах, углы установки управляемых колес, напряжение на элементах аккумуляторной батареи.

Определение оборотов двигателя. В качестве основного параметра для управления двигателем используется сигнал оборотов двигателя. Для этого используются датчики различных конструкций:

- индуктивные датчики;
- датчики Холла;
- интеллектуальные датчики с распознаванием направления вращения.

Сигнал датчика оборотов используется для следующих расчетов:

- синхронизации при запуске двигателя;
- функции – быстрый старт;
- точного расчета угла положения коленчатого вала;
- определения момента впрыска/зажигания;
- определения скорости вращения коленчатого вала;
- распознавания пропусков зажигания;
- диагностики/контроля работы датчика фазы;
- мониторинга изменения фаз газораспределения.

1.2. Механизмы систем двигателя и их неисправности

Двигатель автомобиля состоит из целого ряда механизмов и систем.

Бензиновый двигатель и дизель имеют кривошипно-шатунный механизм, газораспределительный механизм, смазочную систему, систему охлаждения и систему питания, а бензиновый двигатель – еще и систему зажигания.

Кривошипно-шатунный механизм (КШМ) осуществляет рабочий процесс двигателя, преобразования возвратно-поступательного движения поршней во вращательное движение коленчатого вала.

Кривошипно-шатунный механизм определяет тип двигателя по расположению цилиндров.

В двигателях автомобилей применяются различные кривошипно-шатунные механизмы: однорядные кривошипно-шатунные механизмы с вертикальным перемещением поршней и с перемещением поршней под углом применяются в рядных двигателях; двухрядные кривошипно-шатунные механизмы с перемещением поршней под углом применяются в V-образных двигателях; одно- и двухрядные кривошипно-шатунные механизмы с горизонтальным перемещением поршней находят применение в тех случаях, когда ограничены габаритные размеры двигателя по высоте.

В кривошипно-шатунный механизм входят блок цилиндров с картером и головкой цилиндров, шатунно-поршневая группа и коленчатый вал с маховиком (рис. 1.2).

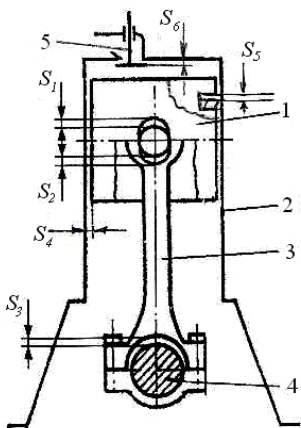


Рис. 1.2. Схема перемещений нижней головки шатуна и поршня:

1 – поршень; 2 – цилиндр корпуса двигателя (блок цилиндров); 3 – шатун; 4 – подшипниковый узел скольжения коленчатого вала; 5 – клапаны (впускные и выпускные); $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ – структурные диагностические параметры

затяжки болтов подшипников; чрезмерный зазор между полукольцами и упорными поверхностями коленчатого вала при работе на масле несоответ-

Основными диагностическими структурными параметрами ЦПГ являются (рис. 1.2): зазоры «поршень-цилиндр» (S_4), зазор между поршнем и кольцом по высоте канавки (S_5), зазор в стыках поршневых колец или соответствующие им функциональные зависимости.

Основными методами диагностирования КШМ являются компрессия, цвет отработавших газов (ОГ), падение мощности, продукты износа в масле, состав ОГ, уровни вибрации.

Диагностическими структурными параметрами КШМ являются: зазоры S_1, S_2, S_3 (рис. 1.2) из-за износа шатунных подшипников, поршневых пальцев и втулок; подплавление и выкрашивание вкладышей коренных или шатунных подшипников; эксцентricности и овальности коренных подшипников коленчатого вала; ослабление

ствующего сорта и качества. Структурными диагностическими параметрами также являются: трущиеся детали подшипниковых узлов, опор коленчатого вала; зазор S_3 (рис. 1.2); зазоры в подшипниковых узлах двигателя и трущиеся поверхности деталей насоса.

Блок цилиндров вместе с картером является остовом двигателя.

Газораспределительный механизм (ГРМ) производит открытие и закрытие впускных и выпускных клапанов двигателя. Типы газораспределительных механизмов классифицируются по числу распределительных валов, по типу привода распределительного вала, по числу клапанов на цилиндр.

Диагностическими параметрами ГРМ являются: нарушение зазоров между рычагами и кулачками распределительного вала; обгорание, засорение или деформация (износ) клапанов (параметр S_6 на рис. 1.3); ослабление (усадка), поломка клапанных пружин; износ распределительных шестерен, рабочих поверхностей привода клапанов и кулачков; износ клапанов, седла клапанов; уменьшение натяжения ремней, цепи и их износ; температурные изменения размеров толкателей, штанг и коромысел, которые приводят к неплотному прилеганию клапанов, характерному металлическому стуку и повышенному износу деталей ГРМ. Пределы регулировки тепловых зазоров для впускных клапанов – от 0,15 до 0,25 мм, для выпускных – от 0,20 до 0,35 мм и более. Гидравлические компенсаторы зазоров в системе ГРМ обеспечивают его безударную работу и полное закрытие клапанов.

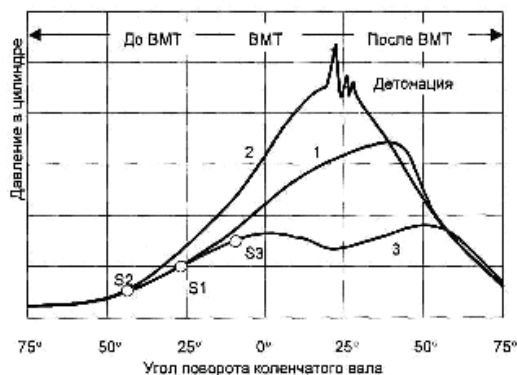


Рис. 1.3. Влияние момента зажигания на эмиссию вредных веществ:

1 – правильная установка (зажигание в точке S1); 2 – раннее зажигание (точка S2); 3 – позднее зажигание (точка S3)

ма охлаждения состоит из рубашки охлаждения головки и блока цилиндров, радиатора, насоса, термостата, вентилятора, расширительного бачка соединительных трубопроводов и сливных краников. В систему охлаждения входит также отопитель салона кузова автомобиля. Неисправности системы охлаждения вызывают переохлаждение или перегрев двигателя, повышенный расход охлаждающей жидкости.

Системы питания бензинового двигателя с впрыском топлива содержат топливный бак, топливный насос, топливный фильтр, воздушный

Смазочная система подает масло к трущимся деталям двигателя под давлением или разбрызгиванием. Смазочные системы классифицируются по конструктивным параметрам (с масляным радиатором, без масляного радиатора). Смазочная система включает в себя масляный насос, масляный фильтр, маслопроводы, указатель уровня масла.

Система охлаждения отводит теплоту от сильно нагретых деталей двигателя. Системы охлаждения бывают жидкостные и воздушные. Жидкостная система

фильтр, форсунки, регулятор давления топлива, топливопровод двигателя, трубы глушителя, резонаторы, глушитель.

Система питания готовит горючую смесь, необходимую для работы двигателя, и обеспечивает выпуск из двигателя отработавших газов.

Системы питания классифицируют по месту и по способу приготовления горючей смеси (воздух+топливо). Соотношение воздуха и топлива оказывает важное влияние на эмиссию вредных веществ и КПД двигателя.

В богатой смеси (недостаток воздуха) эмиссия СО уменьшается почти в линейной зависимости от увеличения λ . В бедной смеси (избыток воздуха) она очень низка и почти не зависит от λ . В окрестности $\lambda=1$ эмиссия СО зависит от равномерного распределения топлива по отдельным цилиндрам.

Точное согласование подготовки смеси и момента ее воспламенения привело к тому, что выброс окиси углерода в современных двигателях резко сократился. Сегодня нормой являются значения меньше 1,5% объема. Очень большая доля СО всегда является признаком слишком богатой смеси, например, из-за неправильной работы топливно-эмиссионной системы.

Применяются системы питания с приготовлением горючей смеси во впускном трубопроводе и непосредственно в цилиндрах двигателя как в дизельных, так и в бензиновых двигателях.

Системы питания с впрыском топлива обеспечивают лучшее наполнение цилиндров двигателя горючей смесью и лучшую их очистку от отработавших газов. При этом впрыскивание топлива позволяет повысить степень сжатия и максимальную мощность у бензиновых двигателей, уменьшить расход топлива и снизить токсичность ОГ.

В систему питания бензинового двигателя с впрыском топлива входят топливный бак, топливный насос, топливный фильтр, воздушный фильтр, форсунки, впускной и выпускной трубопроводы, топливопровод (аккумулятор), приемные трубки глушителя, резонатор и глушитель.

Неисправности в системе питания вызывают нарушение смесеобразования (обеднение или обогащение смеси). Такими неисправностями могут быть недостаток воздуха, увеличение отверстий жиклеров, повреждение прокладок под ними, засорение отверстия воздушных жиклеров, негерметичность закрытия клапанов экономайзера и насоса.

Система зажигания бензинового двигателя производит воспламенение горючей и рабочей смеси в цилиндрах двигателя.

Наряду с необходимым соотношением воздуха и топлива большое влияние на эмиссию вредных веществ оказывает момент зажигания (рис. 1.3). При более раннем зажигании увеличивается как эмиссия НС, так и эмиссия NO_2 . Эмиссия СО почти не зависит от момента зажигания.

Расход топлива и эмиссия вредных веществ взаимосвязаны. С повышением коэффициента избытка воздуха для компенсации небольшой скорости сгорания должно все раньше происходить зажигание, чтобы процесс сгорания оставался оптимальным. Ранний момент зажигания означает меньший расход топлива и больший момент вращения.

Чтобы найти наиболее выгодный компромисс в зависимости от числа оборотов и нагрузки, требуется сложная регулировка момента зажигания,

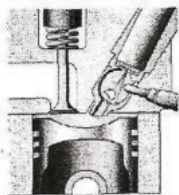
которая задается производителем и реализуется в современных электронных системах управления двигателями.

Эмиссия НС вокруг $\lambda=1$ имеет минимальное значение. В богатой области эмиссия НС возрастает, так как не все углеводороды могут сгорать. Отсутствует необходимый кислород. В бедной области сгорание происходит не оптимально. Температура в камере сгорания понижается. Однако бедная смесь имеет более продолжительное сгорание.

Очень богатая смесь легко сгорает, потому что молекулы топлива плотно упакованы и находятся близко друг к другу. Искра легко и быстро поджигает такую смесь, и фронт пламени быстро распространяется в цилиндре. Бедную смесь поджечь труднее, для этого требуется более мощная искра.

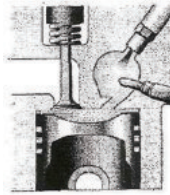
Но в действительности мощная искра редко используется при работе двигателя на обедненной смеси. Важнее оказывается не мощность искры, а ее длительность. В основном, это объясняется тем, что в объеме смеси меньше молекул топлива и искра проскакивает достаточно легко. Но для того, чтобы поджечь бедную смесь, искра должна существовать 1,3-1,5 мс, для чего первичной обмотке катушки зажигания нужна повышенная мощность. Надежная система зажигания, не требующая частых регулировок, способствует снижению вредных веществ в отработавших газах.

Процесс сгорания топлива в дизельном двигателе зависит от геометрии камеры сгорания цилиндра и способа подачи топлива, которые определяют качество смесеобразования с воздухом (рис. 1.4). При непосредственном впрыске достигается высокий КПД, низкий расход топлива, хорошие условия для запуска двигателя, работа двигателя мягче, ниже эмиссия.



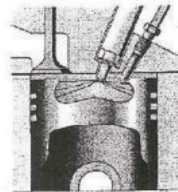
Форкамера

Во время такта сжатия воздух в форкамере сильно завихряется. Сгорание сильно дросселируется. Преимущество: сгорание протекает спокойно, выброс оксида азота незначителен.



Вихревая камера

Вихревая камера интегрирована в головку блока цилиндров. Геометрия вихревой камеры вызывает интенсивное круговое движение воздуха во время такта сжатия. В этот момент происходит впрыск топлива, которое перемешивается с воздухом. Преимущество: хорошее смесеобразование, тихая работа двигателя.



Непосредственный впрыск

Топливо впрыскивается непосредственно в основную камеру сгорания. Интенсивность подачи должна быть значительной. Преимущество: хорошее смесеобразование. Топливо сгорает очень быстро, что позволяет увеличить КПД.

Рис. 1.4. Процессы смесеобразования и сгорание топлива в двигателе

Слишком ранняя подача топлива характеризуется жесткой работой двигателя, черным выхлопом, увеличением температуры отработавших газов, неравномерностью холостого хода.

Слишком поздний впрыск топлива сопровождается очень мягкой работой двигателя, потерей мощности, белым выхлопом, плохим холодным запуском холодного двигателя, увеличением расхода топлива.

Система питания дизеля воздухом служит для забора окружающего воздуха, очистки его от пыли и распределения по цилиндрам двигателя. Газотурбинный наддув является одним из средств повышения мощности дизельного двигателя. Система питания воздухом включает в себя воздушный фильтр и впускной трубопровод. Она может быть с турбонаддувом или без турбонаддува (рис. 1.5).

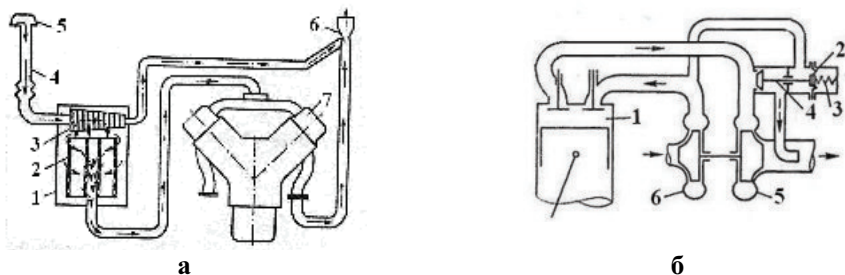


Рис. 1.5. Схема системы питания дизеля воздухом:

а – без турбонаддува: 1 – воздушный фильтр; 2 – фильтрующий элемент; 3 – решетка; 4 – труба; 5 – колпак; 6 – эжектор; 7 – цилиндр; **б – с турбонаддувом:** 1 – цилиндр двигателя; 2 – мембрана; 3 – пружина; 4 – клапан; 5 – турбина; 6 – компрессор

Надув представляет собой подачу воздуха в цилиндры двигателя при такте впуска под давлением, создаваемым компрессором. При наддуве увеличивается количество воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, количество сжигаемого топлива и повышается на 20-40% мощность двигателя.

Для создания оптимального давления наддува в последних моделях двигателей используют турбоагнетатель с изменяемой геометрией и тем самым обеспечивают оптимальное сгорание топлива, а в верхнем диапазоне регулируемых оборотов – снижение расхода топлива и токсичности отработавших газов.

Топливные системы требуют определенной степени очистки топлива. При этом топливные фильтры должны гарантировать требуемую емкость накопления загрязнений, так как иначе фильтр может быть закупорен до момента очередного ТО. Как правило, топливный фильтр интегрирован в контур низкого давления между электроподкачивающим насосом и ТНВД и расположен в моторном отсеке. Топливные системы могут содержать не только основной фильтр тонкой очистки, но и вспомогательный фильтр предварительной очистки. Следующая задача топливного фильтра – отделение несвязанной воды и эмульсии, то есть защита от коррозионных повреждений.

Контроль состояния и управление системой наддува в современных двигателях производится микромеханическими датчиками, представленными на рис. 1.6.

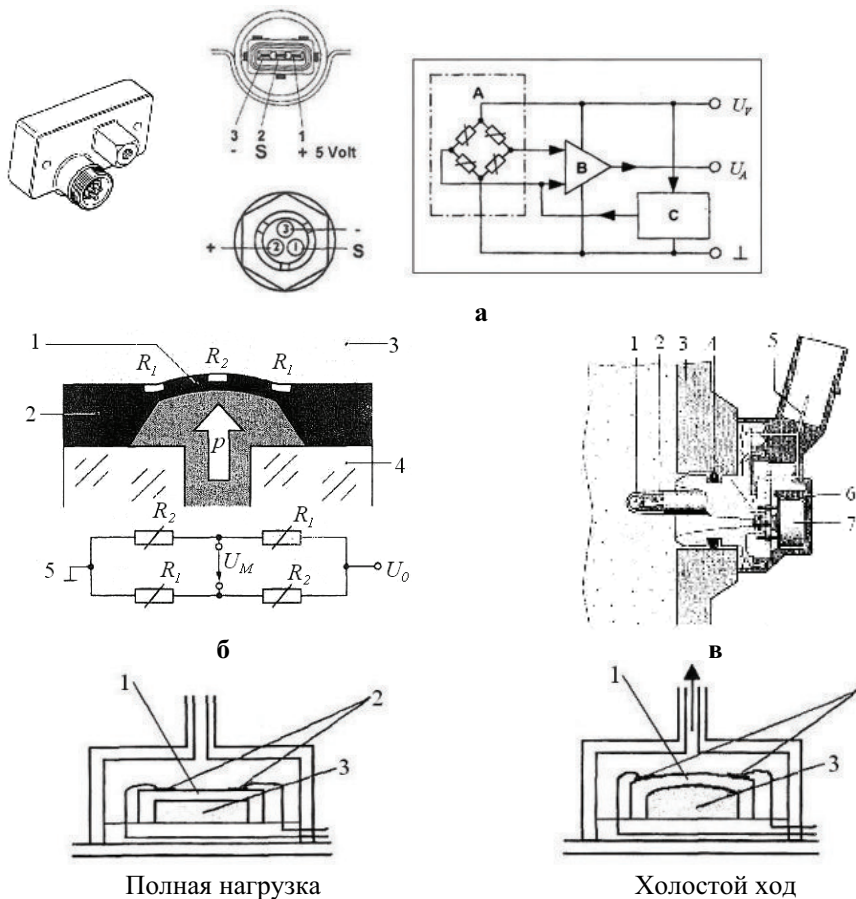


Рис. 1.6. Датчики давления наддува (а, б, в) и давления во впускном коллекторе (г):

а: А – чувствительный элемент; В – усилитель; С – схема температурной компенсации;
б: 1 – мембрана; 2 – кремниевая подложка; 3 – опорное давление; 4 – стекло; 5 – мостовая схема; **в:** 1 – датчик температуры; 2 – корпус; 3 – стенка впускного коллектора; 4 – уплотнительное кольцо; 5 – разъем; 6 – крышка корпуса; 7 – измерительная ячейка; **г:** 1 – кремниевая мембрана; 2 – полупроводниковые элементы; 3 – объем воздуха при атмосферном давлении

Для создания оптимального давления наддува в последних моделях двигателей используют турбонагнетатель с изменяемой геометрией – тем самым обеспечивается хорошее сгорание топлива, а в верхнем диапазоне регулируемых оборотов – снижение расхода топлива и токсичности ОГ.

Измерительный элемент является сердцем микромеханического датчика давления (рис. 1.6, г) и состоит из кремниевого чипа 2 (рис. 1.6, б), внутри которого микромеханическим способом вставлено тонкую диафрагму 1. На диафрагме размещены четыре измерительных резистора (R_1 и R_2), электрическое сопротивление которых изменяется, когда к диафрагме приложено давление. Чувствительный элемент на боку электронной схемы за-

крыт и герметически уплотняется крышкой, содержащей внутри зону опорного разрежения. В датчик давления также может быть встроен температурный датчик 1 (рис. 1.6, в), сигналы которого могут быть оценены отдельно. Преимущество такого устройства заключается в том, что нужен только один корпус датчика для измерения как температуры, так и давления.

Диафрагма чувствительного элемента может выгибаться на несколько микрон (10-1000 мкм) в зависимости от приложенного к ней давления. Появляющееся в результате механическое растяжение вызывает изменение сопротивления четырех измерительных резисторов, закрепленных на диафрагме (пьезорезистивный эффект).

Эти резисторы установлены на кремниевом чипе так, что, когда диафрагма деформируется из-за приложения давления, электрическое сопротивление двух резисторов увеличивается, а сопротивление двух других резисторов уменьшается. Поскольку резисторы являются частью моста Уитстона 5 (рис. 1.6, б), то при изменении величины сопротивления изменяется напряжение на концах измерительных резисторов и вместе с ним изменяется измеряемое напряжение U_d ; таким образом, оно становится мерой величины давления, приложенного к диафрагме.

Выходное напряжение, составляющее 0-5 В, через электрические выводы датчика 5 (рис. 1.6, в) подается на ЭБУ, в котором рассчитывается величина давления с помощью запрограммированной характеристической кривой микромеханического датчика давления наддува.

Привод клапана-регулятора давления наддува. Для обеспечения высокого крутящего момента двигателя на режимах малой частоты вращения турбокомпрессор проектируется таким образом, чтобы максимальное давление наддува развивалось именно в этой области.

При этом, без наличия некоторой формы регулирования, давление наддува было бы чрезмерным при высоких частотах вращения. Решением этой проблемы является перепускание части ОГ мимо турбины с помощью перепускного клапана, как это показано на рис. 1.7.

Другим решением проблемы (вместо перепускного клапана) может быть конструкция турбины со сменной геометрией соплового аппарата (VTG), что позволяет адаптировать мощность турбокомпрессора данному режиму работы двигателя. Конструктивно такое регулирование осуществляется поворотом лопаток соплового аппарата с соответствующим изменением угла их установки в канале прохождения ОГ.

Дроссельная заслонка, управляемая электропневматическим клапаном, выполняет в дизеле, в отличие от бензинового двигателя, совершенно другую функцию. В дизеле она служит для увеличения степени рециркуляции ОГ путем снижения повышенного давления во впускном коллекторе. Регулирование дроссельной заслонкой осуществляется только на малых скоростных режимах.

Заслонка во впускном коллекторе. В дизелях легковых автомобилей с насос-форсунками заслонка во впускном коллекторе служит для отсечения подачи сжатого воздуха для плавной остановки двигателя, поскольку при

этом сжимается меньшее количество воздуха. Привод заслонки осуществляется электропневматическим клапаном.

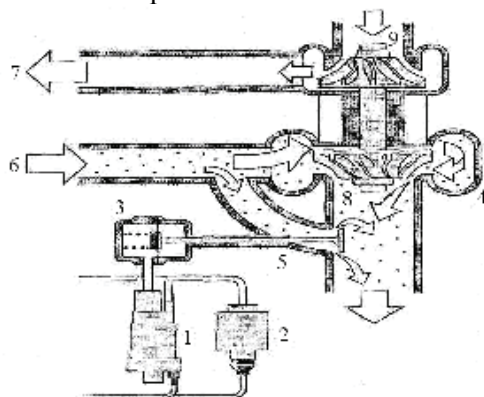


Рис. 1.7. Регулирование давления наддува клапаном:

1 – электропневматический клапан регулятора давления наддува; 2 – вакуумный насос; 3 – пневматический привод клапана-регулятора давления наддува; 4 – турбокомпрессор; 5 – перепускной клапан ОГ; 6 – вход ОГ; 7 – сжатый воздух от компрессора; 8 – турбина; 9 – компрессор

может изменяться регулятором закручивания в виде заслонки или золотникового клапана вблизи дроссельной заслонки.

Наиболее распространенными неисправностями двигателя, которые связаны с техническим состоянием турбокомпрессора, являются:

- снижение мощности;
- повышение расхода масла;
- перегрев двигателя;
- нарушение процессов сгорания топлива, что проявляется в появлении черного и синего дыма из выхлопной трубы.

Основными причинами неисправностей турбокомпрессора являются:

- нарушение процессов смазывания из-за загрязнения или недостатка масла (утечка и снижение давления);
- попадание инородных предметов;
- загрязнение воздушных каналов;
- загрязнение и отложение на лопаточном аппарате смолистых веществ, которые могут приводить к повышению дисбаланса;
- повышение температуры отработавших газов;
- деформация и износ лопаточного аппарата турбокомпрессора;
- износ (увеличение зазора) в подшипниках скольжения;
- подтекание масла в системе смазки и соединениях деталей турбокомпрессора;
- повышенный шум и вибрация турбокомпрессора;

Регулятор закручивания потока воздуха на впуске. В дизелях легковых автомобилей регулирование закручивания потока воздуха влияет на структуру закрученного потока в цилиндрах двигателя. Собственно закручивание потока обычно создается спиральной формой впускных каналов. Поскольку степень закручивания определяет интенсивность перемешивания топлива и воздуха в камере сгорания, она значительно влияет на качество процесса сгорания. Как правило, интенсивное закручивание создается на режимах малых частот вращения, а слабое закручивание – в области высоких частот вращения. Степень закручивания

- закоксование корпуса подшипников;
- утечка газов на входе или выходе турбины.

1.3. Рабочий процесс (цикл) четырехтактных двигателей

Рабочий процесс (цикл) четырехтактных двигателей состоит из тактов впуска, сжатия, рабочего хода и выпуска.

Рабочий процесс происходит за четыре хода поршня или за два оборота коленчатого вала.

Протекание рабочего цикла бензинового двигателя приведено на рис. 1.8 [1]. При такте впуска (рис. 1.8, а) поршень 4 движется от ВМТ к НМТ. Выпускной клапан 5 закрыт. Под действием вакуума, создаваемого при движении поршня, в цилиндр 3 поступает горючая смесь (бензина и воздуха) через впускной клапан 7, открытый распределительным валом 6. Горючая смесь перемешивается с остаточными отработавшими газами, образуя при этом рабочую смесь. В конце такта впуска давление в цилиндре составляет 0,08-0,09 МПа, а температура рабочей смеси – 80-120 °С.

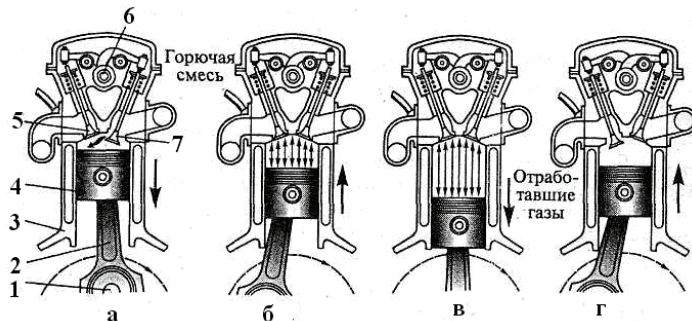


Рис. 1.8. Схема рабочего процесса четырехтактного бензинового двигателя:

а – впуск; б – сжатие; в – рабочий ход; г – выпуск; 1 – коленчатый вал; 2 – шатун; 3 – цилиндр; 4 – поршень; 5 – выпускной клапан; 6 – распределительный вал; 7 – впускной клапан

Такт сжатия (рис. 1.8, б) происходит при перемещении поршня от НМТ к ВМТ. Впускной и выпускной клапаны закрыты. Объем рабочей смеси уменьшается, а давление в цилиндре повышается и в конце такта сжатия составляет 0,9-1,5 МПа. Повышение давления сопровождается увеличением температуры рабочей смеси до 450-500 °С.

При такте рабочего хода (рис. 1.8, в) впускной и выпускной клапаны закрыты. Воспламененная в конце такта сжатия от свечи зажигания рабочая смесь быстро сгорает (в течение 0,001-0,002 с). Температура и давление образовавшихся газов в цилиндре возрастают соответственно до 2200-2500 °С и 4-5,5 МПа. Газы давят на поршень, он движется от ВМТ до НМТ и совершает полезную работу, вращая через шатун 2 коленчатый вал 1. По мере перемещения поршня к НМТ и увеличения объема пространства над ним давление в цилиндре уменьшается и в конце такта составляет 0,35-0,45 МПа. Снижается и температура газов до 900-1200 °С.

Такт выпуска (рис. 1.8, г) происходит при движении поршня от НМТ к ВМТ. Впускной клапан закрыт. Отработавшие газы вытесняются поршнем из цилиндра через выпускной клапан, открытый распределительным валом. Давление и температура в цилиндре уменьшаются и в конце такта составляют 0,1-0,12 МПа и 700-800 °С.

Из рассмотренного рабочего процесса (цикла) следует, что полезная работа совершается только в течение одного такта – рабочего хода. Остальные три такта (впуск, сжатие, выпуск) являются вспомогательными, и на их осуществление затрачивается часть энергии, накопленной маховиком двигателя, который установлен на заднем конце коленчатого вала, при рабочем ходе.

Газораспределительный механизм двигателя с механической системой управления и нижним расположением распределительного вала показан на рис. 1.9 [1]. Газораспределительный механизм верхнеклапанный, с шестеренным приводом и двумя клапанами на цилиндр.

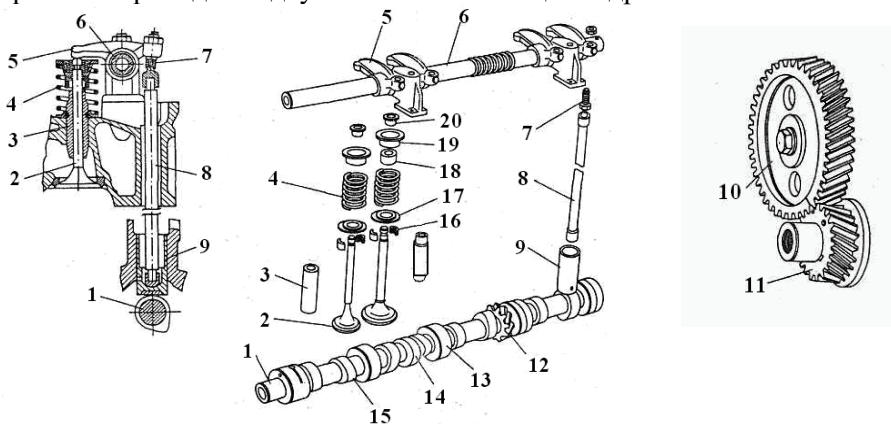


Рис. 1.9. Газораспределительный механизм двигателя с механической системой управления и нижним расположением распределительного вала:

1 – распределительный вал; 2 – клапан; 3, 20 – втулки; 4 – пружина; 5 – коромысло; 6 – ось; 7 – винт; 8 – штанга; 9 – толкатель; 10, 11, 12 – шестерни; 13 – шейка; 14 – эксцентрик; 15 – кулачок; 16 – сухарь; 17, 19 – шайбы; 18 – колпачок

Механизм включает в себя распределительный вал 1, привод распределительного вала, толкатели 9, штанги 8 толкателей, регулировочные винты 7, ось 6 коромысел, коромысла 5, клапаны 2, направляющие втулки 3 клапанов и пружины 4 с деталями крепления.

Распределительный вал имеет пять опорных шеек 13, кулачки 15 (впускные и выпускные), шестерню 12 привода масляного насоса и распределителя зажигания, а также эксцентрик 14 привода топливного насоса.

Привод распределительного вала осуществляется через прикрепленную к его переднему концу ведомую шестерню 10, находящуюся в зацеплении с ведущей шестерней 11, установленной на коленчатом валу. Обе шестерни выполнены косозубыми для уменьшения шума и обеспечения плавной работы. Передаточное отношение шестеренного привода – отношение числа зубьев

ведущей шестерни к числу зубьев ведомой шестерни и равно 1:2. Это необходимо для того, чтобы за два оборота коленчатого вала распределительный вал совершал один оборот, обеспечивая за полный цикл двигателя открытие впускного и выпускного клапанов каждого цилиндра по одному разу.

Толкатели 9 служат для передачи усилия от кулачков распределительного вала к штангам 8, а их торцы, соприкасающиеся с кулачками, выполнены сферическими. Толкатели перемещаются в направляющих отверстиях блока цилиндров. Штанги 8 передают усилие от толкателей 9 к коромыслам 5, которые предназначены для передачи усилия от штанг к клапанам.

Газораспределительный механизм работает следующим образом. При вращении распределительного вала его кулачки поочередно набегают на толкатели 9 в соответствии с порядком работы цилиндров двигателя. Усилие от толкателей 9 через штанги 8 передается к коромыслам 5, которые, поворачиваясь на оси 6, воздействуют на стержни клапанов 2, преодолевают сопротивление пружин 4 и открывают клапаны. При дальнейшем повороте распределительного вала кулачки сходят с толкателей, которые вместе со штангами и коромыслами возвращаются в исходное положение под действием пружин, закрывающих также клапаны.

Диагностическими параметрами механических систем газораспределительного механизма являются разрегулировка и износ сопряжений шестерен 10, 11, 12, кулачков 15, коромысел 5, втулок подшипников скольжения оси 6, клапанов 2, изменение усилия (усадка) пружин 4 (см. рис. 1.9).

Тепловые зазоры между кулачками и рычагами впускных и выпускных клапанов для двигателя модели ВАЗ-2106 должны быть равны 0,15 мм на холодном двигателе и 0,20 мм на прогретом. Для двигателей ЯМЗ величина теплового зазора у впускного и выпускного клапанов устанавливается одинаковой и регулируется в пределах 0,25-0,30 мм.

Принцип действия системы изменения фаз газораспределения современного двигателя приведена на рис. 1.10.

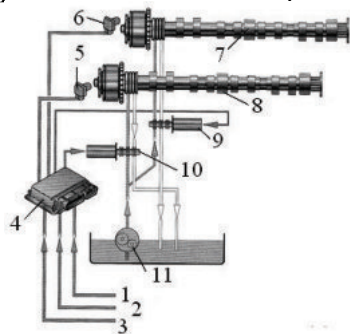


Рис. 1.10. Система изменения фаз газораспределения двигателя

На рис. 1.10 цифрами обозначены: 1 – частота вращения вала двигателя; 2 – расход воздуха и его температура (данные для определения нагрузки двигателя); 3 – температура охлаждающей жидкости; 4 – блок управления двигателем; 5 – датчик Холла 2 (G163); 6 – датчик Холла 1 (G40); 7 – впускной распределительный вал; 8 – выпускной распределительный вал; 9, 10 – электрогидравлические распределители; 11 – масляный насос.

Управление системой изменения фаз газораспределения осуществляется блоком управления двигателем. Для этого блок управления должен получать информацию о частоте вращения вала двигателя, его нагрузке и температуре, а также о мгновенном положении коленчатого и распределительных валов.

Кулачковый и коленчатый валы имеют передаточное отношение 1:2. Их положение показывает: в каком такте – сжатие или выпуск – находится поршень при движении к ВМТ. Датчик фазы кулачкового вала передает эту информацию блоку управления. Для производства сигнала используется эффект Холла. Датчик фазы может быть проверен осциллографом по выходному сигналу и замером опорного напряжения.

Управление положением распределительных валов производится блоком управления посредством электрогидравлических распределителей. Эти распределители открывают каналы подвода масла, расположенные в корпусе механизма газораспределения. Масло из системы смазки двигателя поступает через каналы в корпусе механизма газораспределения и в распределительных валах в гидроуправляемые муфты. Муфты поворачивают распределительные валы в соответствии с командами блока управления двигателем. Поворот впускного вала по фазе производится по сигналам блока управления во всем рабочем диапазоне частот вращения вала двигателя. Диапазон поворота равен 52° по коленчатому валу двигателя. Управление поворотом распределительного вала по фазе осуществляется в соответствии с характеристиками, записанными в памяти блока управления.

Конструкция гидроуправляемой муфты впускного распределительного вала состоит из встроеного в звездочку впускного вала наружного корпуса и неподвижно соединенного с впускным валом ротора.

Целью изменения фаз газораспределения PSA BMW THD-Motor является:

- сдвиг фаз угла поворота в направлении «рано» max 36° ;
- регулирование объема поступающего в двигатель воздуха;
- увеличение мощности двигателя в нижнем диапазоне нагрузок.

Сдвиг распределительного вала в направлении «позже» осуществляется при:

- высоких нагрузках: за счет позднего открытия впускного клапана происходит лучшее заполнение камеры сгорания свежим воздухом;
- холостом ходу: за счет отсутствия «зоны перекрытия» в камере сгорания нет остаточных ОГ и это способствует более стабильной работе на холостом ходу.

Компенсация теплового зазора и износа сопрягаемых деталей. В настоящее время в газораспределительных механизмах двигателей легковых автомобилей для привода впускных и выпускных клапанов находят широкое применение гидравлические толкатели.

Гидравлические толкатели автоматически обеспечивают постоянный (безззорный) контакт кулачков распределительного вала с клапанами, компенсируют износ сопрягаемых деталей (распределительного вала и клапанной группы) и исключают необходимость регулирования теплового зазора клапанов в эксплуатации.

Протекание рабочего процесса в дизельном двигателе. Схема четырехтактного дизеля без вспомогательных агрегатов представлена на рис. 1.11 [2].

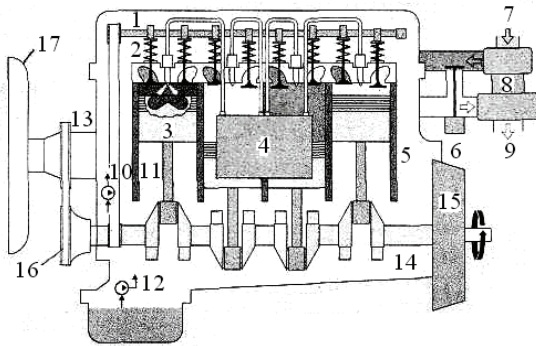


Рис. 1.11. Четырехтактный дизельный двигатель без вспомогательных агрегатов с микропроцессорным управлением:

1 – распределительный вал; 2 – клапан; 3 – поршень; 4 – система впрыска; 5 – цилиндр; 6 – система рециркуляции ОГ; 7 – впускной трубопровод; 8 – нагнетатель воздуха (турбоагнетатель); 9 – выпускной коллектор; 10 – система охлаждения; 11 – шатун; 12 – система смазки; 13 – блок цилиндров; 14 – коленчатый вал; 15 – маховик; 16 – привод (ремень, цепь); 17 – вентилятор

Рабочий процесс четырехтактного дизеля существенно отличается от рабочего цикла бензинового двигателя по смесеобразованию и воспламенению рабочей смеси. основное различие рабочих циклов состоит в том, что в цилиндры дизеля при такте впуска поступает не горючая смесь, а воздух, и при такте сжатия в цилиндры впрыскивается мелкораспыленное топливо, которое самовоспламеняется под действием высокой температуры сжатого воздуха, а запасенная в нем химическая энергия преобразуется в механическую работу.

Таким образом, дизель – это двигатель с внутренним смесеобразованием и воспламенением горючей смеси от сжатия.

Таким образом, дизель – это двигатель с внутренним смесеобразованием и воспламенением горючей смеси от сжатия.

Дизели работают как по двухтактному, так и по четырехтактному принципу. Сегодня на автомобилях используются преимущественно четырехтактные дизели.

Дизель – это двигатель внутреннего сгорания с высокоэффективным КПД (более 50% в крупных низкооборотных версиях). Связанные с этим низкий расход топлива и низкая токсичность ОГ и уменьшенный предварительным впрыском шум придают этим силовым агрегатам большое значение.

В четырехтактном дизеле (рис. 1.11, 1.12 [1, 2]) клапаны механизма газораспределения управляют впуском воздуха и выпуском ОГ. Они открывают или закрывают впускные и выпускные каналы головки цилиндров. Каждый впускной и выпускной канал может иметь один, два или три клапана.

Типичные диагностические параметры механических систем ЦПГ и КШМ показаны на рис. 1.2, износа и разрегулировки механизмов газораспределительной системы – на рис. 1.10 и 1.11; износ подшипников скольжения коленчатого вала (14, рис. 1.11); трущихся поверхностей насосов системы смазки (12, рис. 1.11), подачи топлива и охлаждения; нагнетателя (8) воздуха (турбокомпрессор); закоксование и загрязнение проходных отверстий форсунок подачи топлива и его распыления (1 б, 4 а, рис. 1.14), кулачков (1, 10, рис. 1.13; 1, 6, рис. 1.14) и коромысел (рис. 1.10 и 1.14).

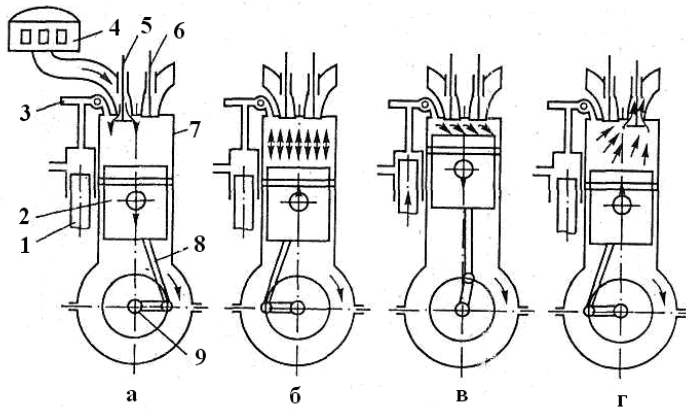


Рис. 1.12. Схема рабочего процесса четырехтактного дизеля:

а – впуск; б – сжатие; в – рабочий ход; г – выпуск; 1 – топливный насос; 2 – поршень; 3 – форсунка; 4 – воздушный фильтр; 5 – впускной клапан; 6 – выпускной клапан; 7 – цилиндр; 8 – шатун; 9 – коленчатый вал

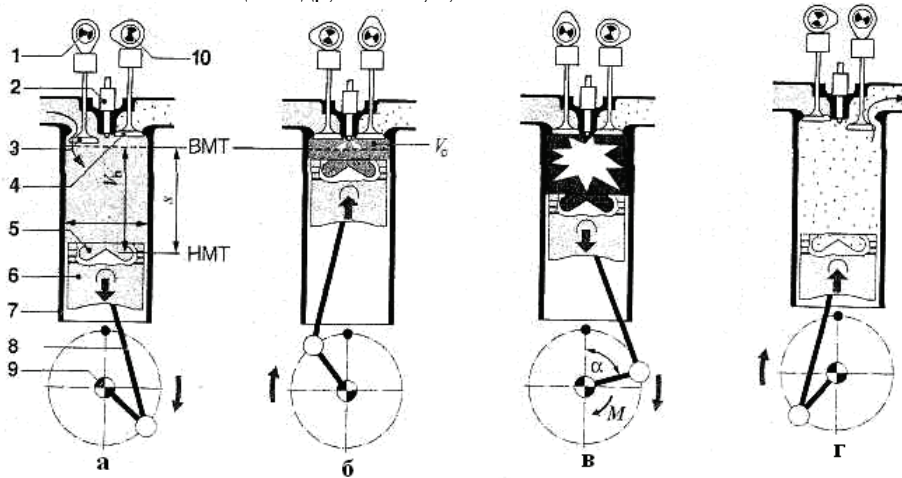


Рис. 1.13. Рабочий цикл четырехтактного дизеля:

1 – впускной распределительный вал; 2 – форсунка; 3 – впускной клапан; 4 – выпускной клапан; 5 – выемка в днище поршня; 6 – поршень; 7 – стенка цилиндра; 8 – шатун; 9 – коленчатый вал; 10 – выпускной распределительный вал

На рис. 1.13 [2] обозначены: α – угол поворота коленчатого вала; d – диаметр цилиндра; M – крутящий момент; s – ход поршня; V_c – объем камеры сгорания; V_h – рабочий объем; ВМТ – верхняя мертвая точка поршня; НМТ – нижняя мертвая точка поршня.

Первым тактом двигателя является впуск (рис. 1.12, а), второй – сжатие (б), третий – рабочий ход (в), четвертый – выпуск (г).

Принцип работы механической и электромагнитной систем насос-форсунок и индивидуального ТНВД показан на рис. 1.1, 1.14 [4].

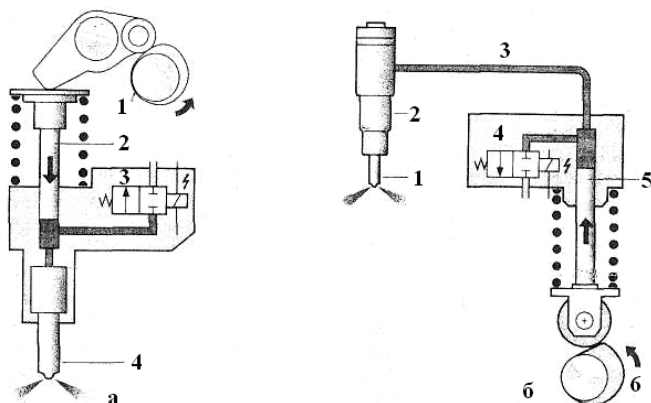


Рис. 1.14. Насос-форсунка (а) и индивидуальный ТНВД (б) с электромагнитным клапаном:

а: 1 – кулачок привода ТНВД; 2 – плунжер; 3 – электромагнитный клапан высокого давления; 4 – распылитель форсунки; **б:** 1 – распылитель форсунки; 2 – форсунка; 3 – магистраль высокого давления; 4 – электромагнитный клапан высокого давления; 5 – плунжер; 6 – кулачок привода

1.4. Гидравлические системы топливоподачи и впрыска топлива дизеля с электромеханической системой управления

Система питания дизельного двигателя должна обеспечивать точную дозировку и своевременную подачу топлива в каждый цилиндр через равные угловые интервалы, очистку воздуха, которое подается в цилиндры и удаление отработавших газов.

Система низкого давления включает в себя топливный бак, фильтр грубой очистки, фильтр тонкой очистки, топливоподкачивающий насос и топливопроводы низкого давления.

Система высокого давления состоит из насоса высокого давления, форсунок и топливопроводов высокого давления.

Топливоподкачивающий насос дизеля КамАЗ-740 (рис. 1.15) всасывает топливо из бака через фильтры грубой и тонкой очистки. По топливопроводам низкого давления топливо поступает к насосу высокого давления. В соответствии с порядком работы цилиндров насос подает топливо топливопроводами высокого давления к форсункам, которые расположены в головках цилиндров. Форсунки распыливают и впрыскивают топливо в камеры сгорания. Топливоподкачивающий насос подает к насосу больше топлива, чем это необходимо для работы дизеля, поэтому лишнее топливо, а с ним и воздух, попавший в систему, дренажными топливопроводами отводится из насоса и фильтра тонкой очистки назад в топливный бак. Топливо, просочившееся через зазор между корпусом распылителя и головкой форсунки, сливается в бак топливопроводами.

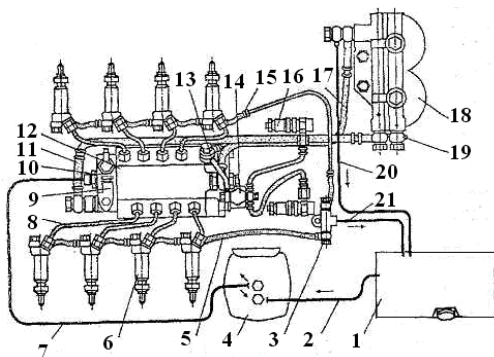


Рис. 1.15. Схема системы питания дизеля КамАЗ-740 с электромагнитной системой управления:

- 1 – топливный бак; 2, 5, 7, 8, 11, 13, 15, 17, 19-21 – топливопроводы; 3 – тройник; 4, 18 – фильтры соответственно грубой и тонкой очистки топлива; 6 – форсунка; 9 – ручной подкачивающий насос; 10 – топливоподкачивающий насос; 12 – топливный насос высокого давления; 14 – электромагнитный клапан; 16 – факельная свеча

тый воздух под высоким давлением (12-14 МПа) через форсунку впрыскивается топливо, которое давлняется, нагревается до температуры самовоспламенения и сгорает. Все эти процессы происходят за тысячные доли секунды – 20-40° поворота коленчатого вала.

Чтобы топливо полностью испарялось и сгорало, его необходимо распыливать на мельчайшие капельки и равномерно распределять их по всему объему камеры сгорания.

Гидравлические системы управления бензиновым двигателем с впрыском топлива несущественно отличаются от таких систем дизельных двигателей; в основном только уровнями давлений топлива в системах.

Контрольные вопросы к подразделам 1.1-1.4

1. Перечислить основные механические и газогидроаэродинамические системы двигателя.
2. Какие основные конструктивные параметры двигателя?
3. Привести основные эксплуатационные свойства двигателя.
4. В чем отличие рабочего процесса дизельного двигателя от бензинового?
5. Какие основные функциональные параметры двигателя?
6. Привести конструктивные особенности КШМ и какие его основные диагностические параметры?
7. Какое назначение ЦПГ и какие ее основные диагностические параметры?
8. Какое назначение ГРМ?
9. Назвать зоны повышенного износа контактирующих поверхностей ГРМ.
10. Почему необходимо выполнять регулирование теплового зазора ГРМ?
11. Привести типовые диагностические параметры механических ГРМ.

Кроме упомянутых приборов в систему питания дизельного двигателя входят также впускной и выпускной трубопроводы, воздушный фильтр, глушитель шума выпуска отработавших газов, регулятор частоты вращения коленчатого вала, указатель уровня топлива в баке, манометр и другие приборы.

В дизельных двигателях нет принудительного зажигания рабочей смеси. В цилиндре двигателя сжимается не рабочая смесь, а воздух. Давление воздуха составляет 3-7 МПа, в зависимости от степени сжатия, которое колеблется в пределах 12-21.

Благодаря высокому давлению температура воздуха повышается до 500-800 °С. В этот сжатый

12. Назвать типовые диагностические параметры механических систем дизельного двигателя.

13. Привести состав и основные структурные параметры системы питания и зажигания бензинового двигателя.

14. Какие системы дизельного двигателя с электромеханической системой управления вы знаете и как устроена система их питания?

1.5. Компоненты систем питания воздухом

Схема всасывания воздуха показана на рис. 1.16, а конструктивные элементы системы автомобилей Toyota – на рис. 1.17.



Рис. 1.16. Схема всасывания воздуха

На рис. 1.17 цифрами обозначены: 1 – воздухоочиститель; 2 – расходомер воздуха; 3 – соединительный воздухопровод; 4 – корпус дроссельной заслонки (воздушная заслонка); 5 – камера всасываемого воздуха (всасывающий коллектор).

Воздух из воздухоочистителя проходит через расходомер воздуха и открывает измерительную пластину перед попаданием в камеру всасываемого воздуха. Объем потока воздуха к камере всасываемого воздуха определяется степенью открытия дроссельной заслонки (рис. 1.18 [3]).

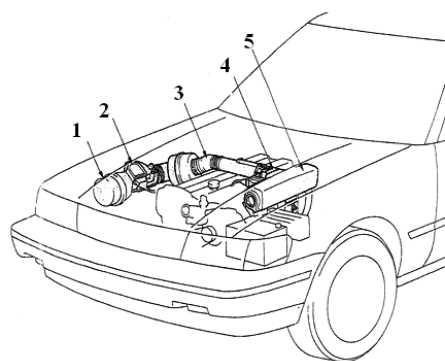


Рис. 1.17. Компоненты системы всасывания воздуха автомобилей

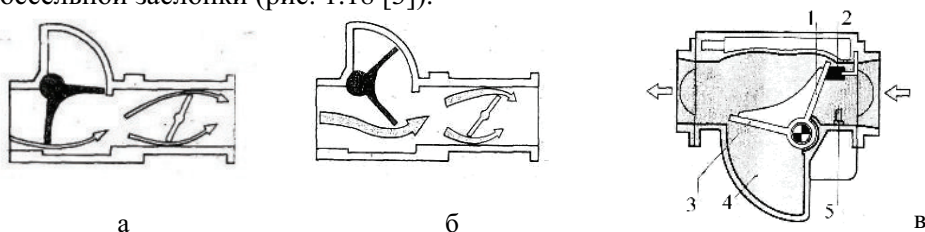


Рис. 1.18. Регулировка объема воздуха заслонкой:

а – при малых оборотах; б – при больших оборотах или большой нагрузке двигателя; в – расходомер воздуха LMM: 1 – основная заслонка; 2 – упор; 3 – компенсационная заслонка; 4 – демпфирующий объем; 5 – датчик температуры воздуха

Дроссельная заслонка регулирует объем воздуха, всасываемого цилиндрами двигателя. Чем больше открытие заслонки, тем больше воздуха попадает в цилиндры. При низких скоростях поток воздуха меньше и измерительная пластина будет открыта незначительно. При высоких скоростях и больших нагрузках поток воздуха будет больше и открытие измерительной пластины соответственно также будет больше (рис. 1.18, б).

Из камеры всасываемого воздуха он распределяется к каждому коллектору и всасывается в камеру сгорания. Когда двигатель холодный, воздушная заслонка открыта, и воздух проходит в камеру всасывания воздуха. Даже если дроссельная заслонка закрыта, воздух проходит в камеру для увеличения частоты вращения холостого хода двигателя (называется «увеличенные обороты холостого хода»).

Датчик массового расхода воздуха фирмы Bosch состоит из температурного датчика и нагревательного резистора. Проходящий воздух охлаждает один из датчиков, а электронная схема датчика преобразует эту разность температур в выходной сигнал для электронного блока управления. В разных вариантах систем впрыска топлива могут применяться датчики массового расхода воздуха двух типов. Они отличаются по устройству и по характеру выдаваемого сигнала, который может быть частотным или аналоговым. В первом случае в зависимости от расхода воздуха меняется частота сигнала, а во втором случае – напряжение. Электронный блок управления (ЭБУ) использует информацию от датчика массового расхода воздуха для определения длительности импульса открытия форсунок.

Конструкция и выходные характеристики термоанемометрического датчика расхода воздуха с нитью накала и пленочным термоэлементом показаны на рис. 1.19 и 1.20.

Принцип действия датчика основан на зависимости тепловой мощности, рассеиваемой нагретой платиновой нитью, от массового расхода воздуха, поток которого обтекает эту нить. Общий расход воздуха (6) определяется расчетным путем по количеству воздуха (5), проходящего по каналу нити накала (рис. 1.20, б).

В процессе работы электронная схема поддерживает постоянный перегрев нити относительно потока воздуха на уровне 150 °С. Во время работы двигателя засасываемый в него воздух охлаждает нагреваемые элементы.

Электрическая мощность, требуемая для поддержания заданного превышения температуры над температурой окружающего воздуха, является параметром для определения массового расхода воздуха, проходящего через датчик.

Выходным сигналом расходомера служит падение напряжения на прецизионном резисторе, включенном в смежное с нагреваемой нитью плечо измерительного моста. Это напряжение электронный блок управления преобразует в часовой расход воздуха (кг/час, рис. 1.21).

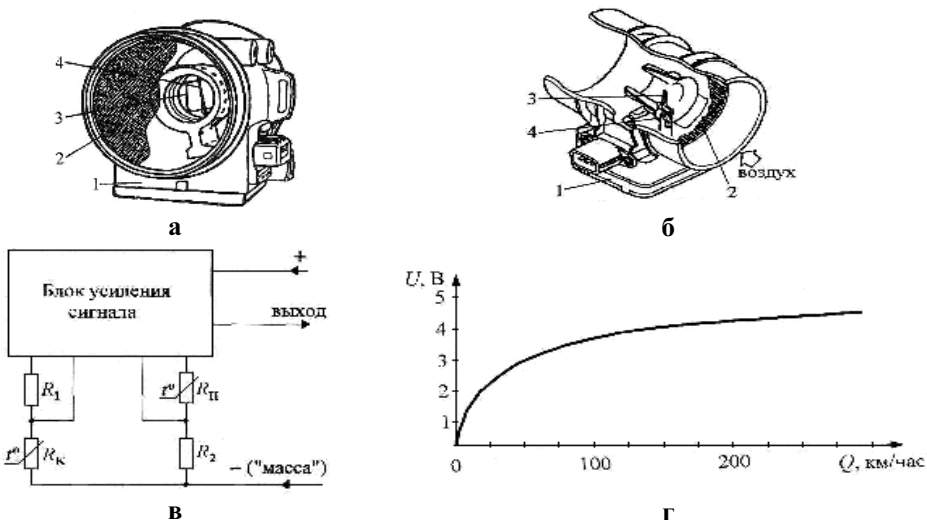


Рис. 1.19. Конструкция (а, б) и электрическая схема (в) термоанемометрических датчиков расхода воздуха с нитью накала (а), пленочным (б) измерительным элементом и выходные характеристики (г) термоанемометрических датчиков расхода воздуха:
 1 – корпус; 2 – решетка-стабилизатор; 3 – измерительный элемент; 4 – термокомпенсационный резистор; R_n – измерительный элемент; R_k – термокомпенсационный резистор; R_1, R_2 – элементы измерительной схемы

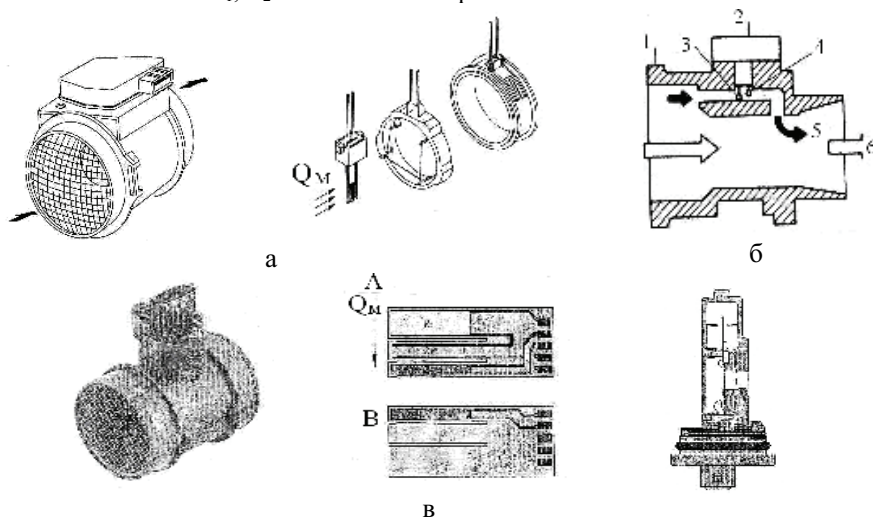


Рис. 1.20. Расходомер воздуха с нитью накала (а, б) и пленочным термозлементом НФМ2 (в)
 На рис. 1.20 (б) цифрами обозначены: 1 – корпус; 2 – электронная схема; 3 – нить накала; 4 – терморезистор; 5 – воздух, проходящий через канал с нитью; 6 – общий поток воздуха.

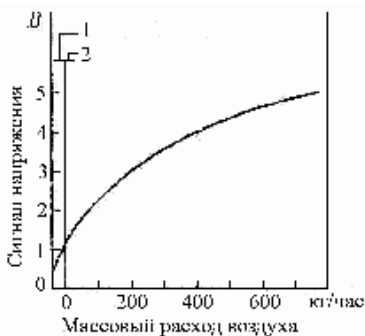


Рис. 1.21. Сигнал напряжения датчика как функция массового расхода воздуха, который обтекает датчик

В датчик HFM5 может также быть встроены температурный датчик для выполнения вспомогательных функций. Он размещен в пластмассовом корпусе и не является обязательным для измерения массового расхода воздуха.

Датчики температуры. Конструкция датчика с отрицательным уменьшением сопротивления с увеличением температуры показана на рис. 1.22.

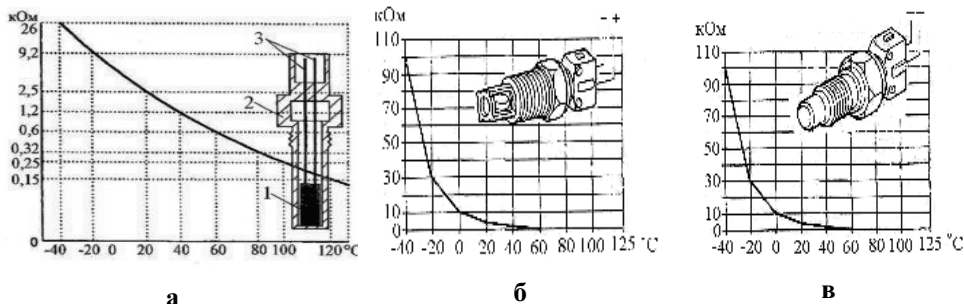


Рис. 1.22. Конструкция и типичные характеристики датчиков:

а, в – температуры жидкости; б – температуры воздуха; 1 – полупроводниковый резистор; 2 – металлический корпус; 3 – электрические контакты; б, в – автомобиль Fiat Morelli IAW

Характеристики датчиков, применяемых различными производителями, отличаются друг от друга, однако в принципе они похожи. В корпусе монтируется измерительный терморезистор, который обычно имеет отрицательный температурный коэффициент (NTC, Negative Temperature Coefficient); реже используется положительный температурный коэффициент (PTC, Positive Temperature Coefficient); то есть сопротивление датчика существенно понижается (NTC) или повышается (PTC) при увеличении температуры.

Измерительный резистор является элементом схемы делителя напряжения, которое обеспечивается напряжением 5 В. Так как сопротивление изменяется при перемене температуры, то изменяется и приложенное к ре-

На рис. 1.21: 1 – обратный поток воздуха; 2 – прямой поток воздуха.

С учетом частоты вращения коленчатого вала, контроллер пересчитывает часовой расход воздуха в цикловую подачу воздуха в цилиндр (мг/цикл). По цикловой подаче воздуха определяется цикловая подача топлива, впрыскиваемого через форсунку во впускной коллектор.

Форма кривой характеристики является такой, что диагностические устройства, встроенные в ЭБУ, могут определять такие неисправности, как обрыв цепи.

зистору напряжение. Напряжение, которое является мерой температуры сенсора, считывается аналого-цифровым преобразователем. В блоке управления двигателя «защиты» параметрические значения, по которым каждому значению сопротивления (соответственно выходного напряжения) соответствует определенная температура. Системы Common Rail могут содержать следующие датчики температуры:

- датчик температуры охлаждающей жидкости, соответственно, температуры двигателя;

- датчик температуры топлива;
- датчик температуры выхлопных газов;
- датчик температуры поступающего воздуха.

Датчики температуры могут быть проверены следующим образом: замер сопротивления, замер падения напряжения, считывание действительных значений при помощи KTS.

Типичная зависимость сопротивления датчика от температуры охлаждающей жидкости представлена на рис. 1.22 (а, в). Практически такие же характеристики имеют и датчики температуры всасываемого воздуха. Более того, очень часто в датчиках температуры охлаждающей жидкости и всасываемого воздуха используется один и тот же тип терморезистора. В этом случае такие датчики отличаются только конструкцией корпуса.

Одна из функциональных схем системы питания воздухом приведена на рис. 1.23.

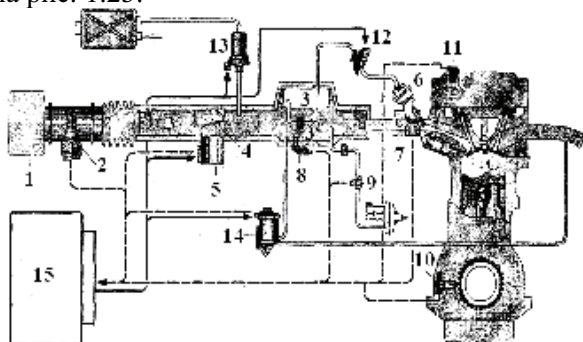


Рис. 1.23. Функциональная схема системы питания воздухом

На рис. 1.23 приняты следующие обозначения:

1 – воздушный фильтр; 2 – датчик массового расхода воздуха (G70) с датчиком температуры воздуха на впуске (G42) для более точного определения нагрузки двигателя; 3 – впускной коллектор; 4 – дроссельная заслонка; 5 – блок управления дроссельной заслонкой (J338); 6 – вакуумный привод узла управления геометрией впускного коллектора; 7 – потенциометр впускных заслонок G336; 8 – датчик давления во впускном трубопроводе (G71) для расчета количества отработавших газов, которые перепускаются; 9 – датчик давления (G294) для регулирования разрежения в магистрали к вакуумному усилителю тормозного привода; 10 – датчик углового положения коленчатого вала; 11 – датчик углового положения распределительного вала; 12 – клапан управления приводом заслонок N316; 13 – клапан продувки адсорбера (N80); 14 – электромагнитный клапан системы рециркуляции отработавших газов (G212, N18) с увеличенным проходным сече-

нием для перепускания большего количества газов; 15 – блок управления системой Motronic MED 9.5.10 (J220).

Воздушный поток, который поступает сквозь фильтр, отклоняет на определенный угол напорную заслонку, связанную с потенциометрическим датчиком угла отклонения этой заслонки. Сигнал с датчика о положении воздушной заслонки поступает в электронный блок управления, который определяет необходимое в данный момент времени количество воздуха и выдает соответствующий сигнал управления на открывание форсунок на соответствующее время. Дополнительные датчики (рис. 1.23 [5]) позволяют точно дозировать топливо в различных эксплуатационных режимах работы двигателя.

Для определения дозирования топлива необходимо знать количество воздуха, всасываемого в каждый цилиндр. Регулирование впрыскивания может осуществляться по изменению давления во впускном трубопроводе и частоты вращения коленчатого вала или по измерению расхода воздуха, попадающего в цилиндры.

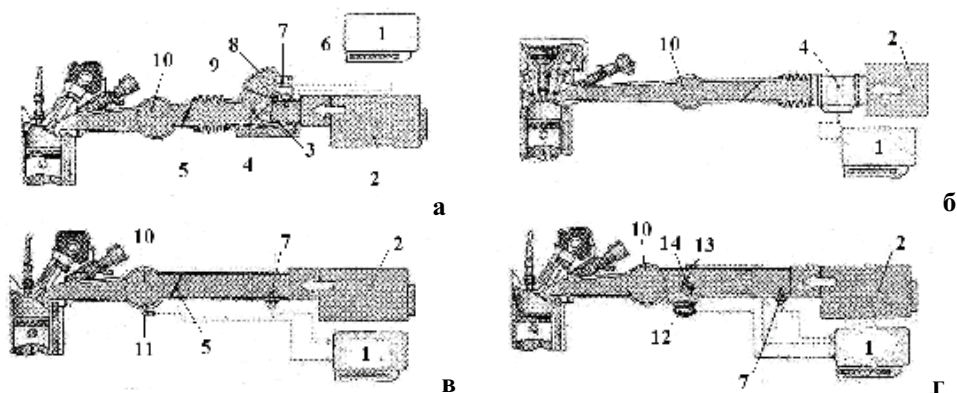


Рис. 1.24. Способы определения нагрузки на двигатель:

1 – ЭБУ; 2 – воздушный фильтр; 3 – клапанный затвор; 4 – расходомер воздуха; 5 – дроссельная заслонка; 6 – потенциометр; 7 – термочувствительный элемент; 8 – демпфирующая камера; 9 – компенсационный клапан; 10 – впускной коллектор; 11 – датчик давления во впускном трубопроводе; 12 – привод дроссельной заслонки; 13 – потенциометр дроссельной заслонки; 14 – дроссельная заслонка

Определение нагрузки на двигатель в системах распределенного впрыскивания топлива обычно выполняют такими способами (рис. 1.24, а-г):

- а) с помощью объемного измерителя расхода воздуха;
- б) с помощью массового (Hitzdraht-Luftmassenmesser, Heissfilm-Luftmassenmesser) измерителя расхода воздуха;
- в) с помощью датчика разрежения во впускном трубопроводе;
- г) с помощью потенциометра дроссельной заслонки.

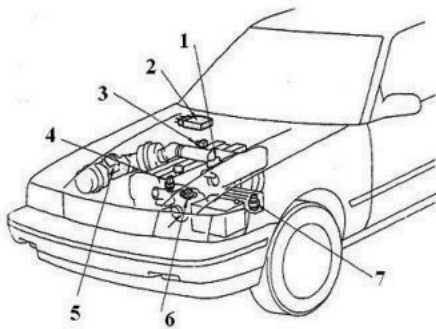


Рис. 1.25. Система управления впрыском:

1 – датчик положения дроссельной заслонки; 2 – ЭБУ ЭВТ; 3 – реле размыкания цепи; 4 – реле времени форсунки холодного запуска; 5 – расходомер воздуха (датчик температуры всасываемого воздуха); 6 – датчик температуры воды; 7 – главное реле

сигналы к форсункам. Форсунки впрыскивают топливо во всасывающий коллектор согласно этим сигналам. Объем впрыска зависит от длительности сигнала от ЭБУ. Блок-схема системы электронного управления показана на рис. 1.26.

Система подачи дополнительных порций воздуха. Кратковременная подача воздуха у выпускной коллектор после пуска двигателя приводит к дополнительному сгоранию несгоревших углеводородов (СН), содержащихся в ОГ. Это снижает эмиссию углеводородов. С другой стороны, это сокращает время нагревания каталитического нейтрализатора, который быстрее достигает своей рабочей температуры.

Входными сигналами подачи вторичного воздуха являются:

- сигналы кислородных датчиков;
- температура охлаждающей жидкости;
- нагрузка двигателя – сигнал измерителя массового расхода воздуха;
- частота вращения коленчатого вала.

Система подачи вторичного воздуха (рис. 1.27) обеспечивает снижение выброса вредных веществ с отработавшими газами после пуска холодного двигателя. При прогреве двигателя отработавшие газы содержат повышенное количество несгоревших углеводородов. Непрогретый нейтрализатор не способен их переработать, так как его температура еще не достигла рабочих значений и равный единице коэффициент избытка воздуха также не способствует этому. Вдуванием воздуха в каналы за выпускными клапанами достигается обогащение отработавших газов кислородом. В результате создаются условия для дожигания их несгоревших компонентов. Выделяющееся при этом тепло ускоряет разогрев нейтрализатора до рабочих температур.

Электронная система управления состоит из датчиков, которые сигнализируют о различных состояниях двигателя; ЭБУ, который рассчитывает объем (длительность) впрыска в соответствии с сигналами (данными) от датчиков; и исполнительных механизмов, которые управляют впрыском топлива, основываясь на этих сигналах от ЭБУ (рис. 1.25). Датчики сигнализируют об объеме всасываемого воздуха, скоростном режиме двигателя, нагрузке двигателя, температуре охлаждающей жидкости и всасываемого воздуха, ускорении (или замедлении) и посылают сигналы к ЭБУ. ЭБУ определяет требуемую длительность впрыска и посылает

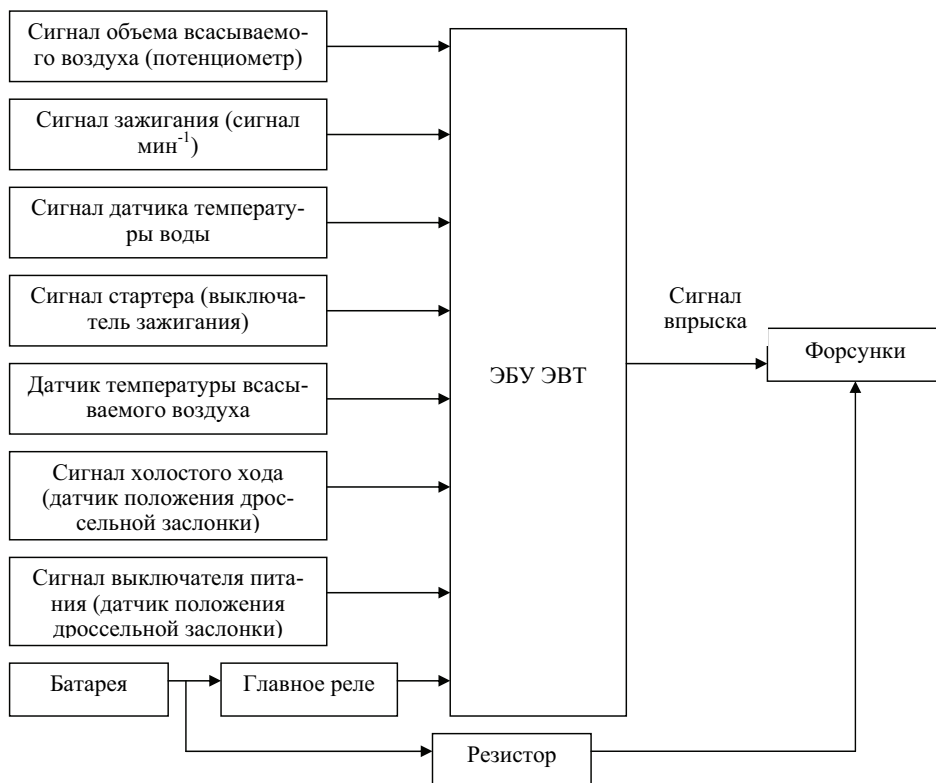
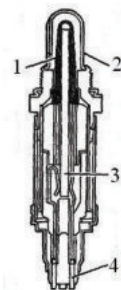
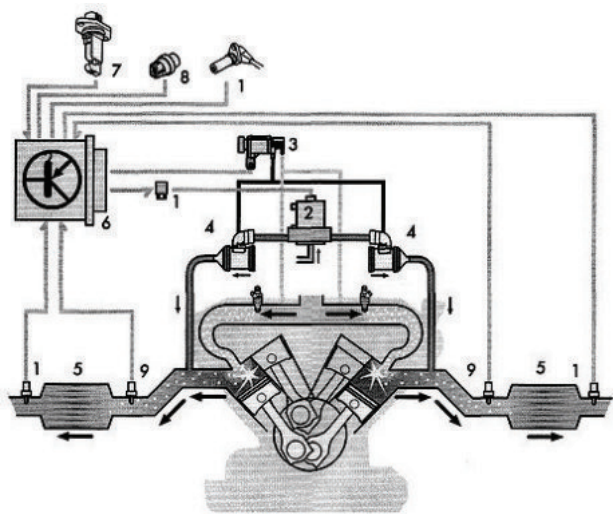


Рис. 1.26 Регулирование объема воздуха

В соответствии с входными сигналами блок управления двигателем вырабатывает команды на одновременное включение насоса вторичного воздуха (через его реле) и открытие клапана управления подачей вторичного воздуха. Распространяющееся через клапан управления разрежение приводит в действие комбинированный клапан. В результате в поток отработавших газов за выпускными клапанами кратковременно вдувается воздух, подаваемый насосом. Система подачи вторичного воздуха отключается при увеличении нагрузки двигателя.

Датчик кислорода. Системы, управляющие двигателем с обратной связью, оснащены датчиком кислорода, который анализирует содержание кислорода в выхлопных газах. Избыток кислорода в выхлопных газах свидетельствует о богатой смеси, а его недостаток – о бедной смеси. При работе системы управления в режиме с обратной связью сигнал датчика кислорода заставляет ЭБУ изменить длительность импульсов управления форсунками так, чтобы соотношение воздух/топливо было близко к стехиометрическому. Реально коэффициент избытка воздуха должен находиться в пределах 0,97-1,03. При этом достигается полное сгорание топлива, катализатору будет меньше работы и он прослужит дольше.



б:
1 – чувствительный элемент; 2 – защитная крышка; 3 – нагревательный элемент; 4 – электрический разъем

Рис. 1.27. Система подачи вторичного воздуха (а) и датчик кислорода (б):

1 – реле насоса вторичного воздуха; 2 – насос вторичного воздуха; 3 – клапан управления подачей вторичного воздуха; 4 – комбинированный клапан; 5 – каталитический нейтрализатор; 6 – блок управления двигателем; 7 – измеритель массового расхода воздуха; 8 – датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя; 9 – датчик кислорода, устанавливаемый перед нейтрализатором; 10 – датчик кислорода, устанавливаемый после нейтрализатора; 11 – датчик частоты вращения коленчатого вала

Работа системы управления с обратной связью начинается, когда двигатель прогреется и достигнет рабочей температуры. Если двигатель не прогрелся или работает с полной нагрузкой, или идет выбег, ЭБУ работает без обратной связи. При работе без обратной связи ЭБУ допускает работу двигателя на богатой и бедной смеси. Этим предотвращается неустойчивая работа двигателя, например при ускорении на полном дросселе.

Датчик кислорода имеет керамическую основу и установлен в выпускном коллекторе, перед каталитическим нейтрализатором. Датчик имеет разные названия – лямбда-зонд, кислородный датчик и даже датчик кислорода в выхлопных газах.

Количество кислорода, оставшегося после сгорания, служит отличным индикатором дефицита или избытка воздуха в смеси. Датчик кислорода дает ЭБУ информацию, по которой он может практически мгновенно (в пределах 50 мс) отрегулировать продолжительность впрыска. При электронном управлении двигателем, когда состав смеси держится близким к стехиометрическому, всегда достигается практически полное сгорание смеси.

Датчик кислорода имеет два электрода из пористой платины. Эти электроды расположены на наружной и внутренней поверхностях датчика. Наружный электрод омывается выхлопными газами и покрыт пористой керамикой. Внутренний электрод открыт в сторону наружного воздуха.

В настоящее время используются два типа датчиков. В датчике первого типа, наиболее распространенном, используется циркониевый элемент.

Сигнал в виде напряжения формируется пропорционально разности содержания кислорода на двух электродах датчика. Это напряжение передается в ЭБУ, благодаря чему ЭБУ определяет содержание кислорода в выхлопных газах. По сигналу этого датчика ЭБУ может поддерживать коэффициент избытка воздуха в диапазоне $1,0 \pm 0,02$.

Напряжение датчика при работе системы управления в режиме с обратной связью очень мало и составляет 100 мВ для бедной смеси и 1,0 В для богатой. Сигнал имеет прямоугольную форму, как у выключателя, и меняется практически мгновенно.

Датчик кислорода второго типа выполнен из диоксида титана. Изменение содержания кислорода в нем приводит к изменению сопротивления датчика. Датчик реагирует на изменение содержания кислорода значительно быстрее, чем датчик из циркония, сигнал остается стабильным в широком диапазоне температуры.

К сожалению, управляемость ухудшается, если настроить двигатель на значения коэффициента избытка воздуха во всем диапазоне его изменения. Управление двигателем по идеальному значению состава смеси вызывает неустойчивость работы двигателя, появление «черных дыр», что делает в ряде случаев двигатель неуправляемым. Поэтому при управлении двигателем по составу смеси во время движения с постоянной скоростью включается режим с обратной связью, а при ускорениях или прогреве двигателя система переходит на режим без обратной связи и для предотвращения неустойчивой работы двигателя смесь при этих условиях обогащается.

Датчик кислорода начинает работать только после того, как достигнет температуры 300 °С. Для ускорения достижения датчиком рабочей температуры в датчик встроен нагревательный элемент. Питание на нагреватель обычно подается с реле топливного насоса. Этим обеспечивается работа датчика только на время работы двигателя.

Хотя управление двигателем с использованием датчика кислорода дает хорошие результаты, все может измениться при появлении хотя бы незначительной неисправности двигателя. Практически все проблемы, влияющие на процесс сгорания, повышают содержание кислорода в выхлопных газах. Например, сбой зажигания из-за неисправности системы зажигания приводит к тому, что сгорание не завершилось и уровень содержания кислорода вырос.

ЭБУ воспримет этот сбой как обеднение смеси и увеличит продолжительность впрыска. Если используется распределенный одновременный впрыск или центральный впрыск топлива, смесь во всех цилиндрах окажется обогащенной. Вот почему последовательному впрыску следует отдать предпочтение. Только в этом случае обогащенной окажется смесь в неисправном цилиндре.

Контрольные вопросы

1. Приведите основные компоненты системы питания двигателя воздухом.
2. Какие существуют датчики контроля расхода воздуха, какие их конструктивные особенности?

3. Зачем измеряют температуру и расход воздуха, попадающего в цилиндр?
4. По каким параметрам производится регулирование объема воздуха, попадающего в цилиндр?
5. Какие компоненты электронных систем управления подачей воздуха в цилиндр двигателя являются объектом диагностирования?
6. Расскажите о системе подачи вторичного воздуха в двигатель.

1.6. Системы улавливания паров бензина, анализа состава отработавших газов и их выпуска

Вентиляция топливного бака. Существует много разных способов вентиляции топливного бака. На рис. 1.28 приведена схема вентиляции топливного бака OBD-II. Основным контролируемым параметром системы вентиляции является ее герметичность.

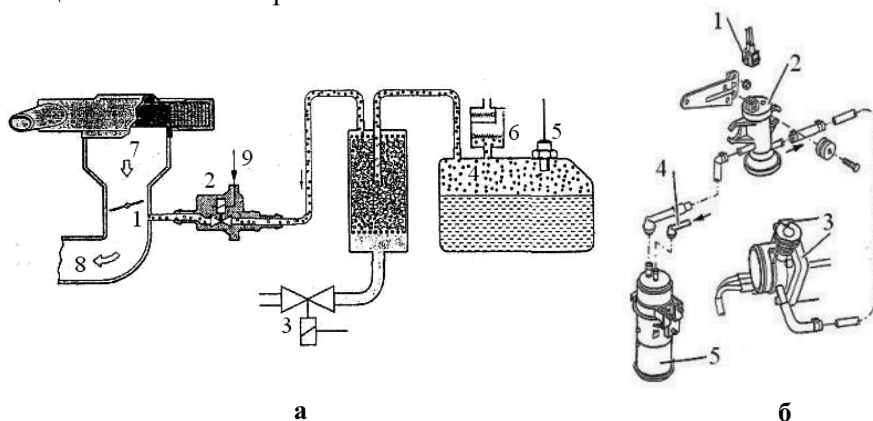


Рис. 1.28. Схема вентиляции топливного бака:

- а – система OBD-II;** 1 – впускной коллектор; 2 – клапан вентиляции топливного бака; 3 – запорный клапан; 4 – топливный бак; 5 – датчик дифференциального давления; 6 – защитный клапан; 7 – воздух; 8 – подача воздуха к двигателю; 9 – электроуправление;
- б – компоненты системы вентиляции топливного бака VAG Simos;** 1 – разъем клапана вентиляции топливного бака; 2 – клапан вентиляции топливного бака; 3 – блок дроссельной заслонки; 4 – шланг от топливного бака; 5 – угольный фильтр

Газоанализ. Экологическая норма Euro-5, которая вступила в силу с 2010 года, ставила перед конструкторами автомобильных систем (и в частности, дизельных двигателей) высокие требования. Причем новые концепции не должны ухудшать топливную экономичность дизеля, поскольку это связано с общими выбросами диоксида углерода. Отсюда стремление к максимально чистому, с малым количеством выброса вредных веществ. Ключевую роль при этом играет система впрыска, поскольку чем рациональнее она обеспечивает процесс подачи топлива на разных режимах работы двигателя, тем меньше выбросы вредных веществ. Большое значение здесь имеют высокое давление впрыска и дифференцированное управление форсунками.

Компоненты системы вентиляции топливного бака, широко применяемой в двигателях, приведены на рис. 1.29.

Входными сигналами для регулирования системы вентиляции топливного бака являются:

- частота вращения коленчатого вала;
- нагрузка двигателя – сигнал измерителя массового расхода воздуха;
- температура двигателя;
- сигналы датчиков кислорода;
- сигнал с блока управления дроссельной заслонкой.

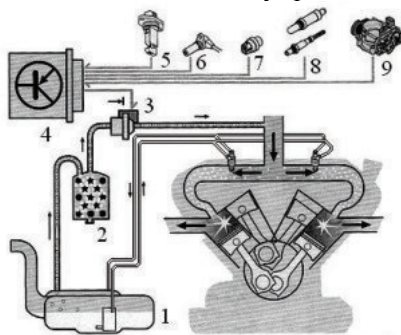


Рис. 1.29. Система вентиляции топливного бака двигателя

Пары топлива удерживаются в адсорбере, заполненном активированным углем. После обработки входных сигналов блок управления двигателем выдает команду на открытие электромагнитного клапана. В результате накопленные в адсорбере пары топлива отводятся во впускной трубопровод двигателя и затем сжигаются в его цилиндрах. При этом кратковременно изменяется соотношение топлива и воздуха. Это изменение смеси регистрируется датчиками кислорода, по сигналам которых вступает в действие система регулирования состава смеси, контролируемая блоком управления двигателем. В результате коэффициент избытка воздуха вновь приводится к единице.

Однако если поддерживать коэффициент избытка воздуха к всегда на уровне 1,0, то двигатель на некоторых режимах станет неуправляемым. По этой причине при холодном пуске, прогреве двигателя, при резком ускорении и полностью открытой дроссельной заслонке ЭБУ переходит на режим работы без обратной связи, когда коэффициент избытка воздуха может меняться в более широком интервале.

Когда обороты двигателя превышают установленный уровень, для защиты двигателя от разноса ЭБУ прерывает работу форсунок. Подача топлива прекращается также при выбеге автомобиля в целях экономии топлива. Подача топлива восстанавливается, когда скорость выбега падает ниже наперед заданного значения. Если некоторое время автомобиль двигался с закрытой дроссельной заслонкой, то при ее открытии подача топлива возобновляется, но в контролируемой форме, так чтобы избежать рывков при ускорении.

Пример. При использовании адаптированной карты применительно к датчику кислорода на бензиновом двигателе система может быстрее реаги-

На рис. 1.29 приняты обозначения: 1 – топливный бак; 2 – адсорбер с активированным углем; 3 – клапан адсорбера; 4 – блок управления двигателем; 5 – измеритель массового расхода воздуха; 6 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 7 – датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя; 8 – датчики кислорода; 9 – блок управления дроссельной заслонкой.

Система вентиляции бака должна предотвращать выход образующихся в нем паров топлива в окружающую атмо-

ровать на изменившиеся условия движения и сохранять контроль над составом выхлопных газов. Во время работы ЭБУ с обратной связью базовые значения впрыска топлива в зависимости от загрузки и оборотов двигателя хранятся в карте впрыска. Если базовые значения впрыска выводят коэффициент избытка воздуха за разрешенные пределы диапазона 0,97-1,03, смесь становится либо слишком богатой, либо слишком бедной. Датчик кислорода должен сообщить об этом нарушении ЭБУ, который, в свою очередь, откорректирует состав смеси. Этот процесс происходит очень быстро, а ЭБУ запоминает это скорректированное значение. С этого момента состав смеси войдет в допуск и ЭБУ останется только вносить мелкие изменения, чтобы держать параметр в пределах допуска.

Коррекция исходных карт происходит при следующих обстоятельствах:

- при работе клапана продувки угольного фильтра;
- при работе клапана холостого хода;
- при регулировании оборотов холостого хода и состава рабочей смеси;
- при регулировке состава смеси на частичных нагрузках.

При продувке угольного фильтра состав смеси обогащается дополнительными парами топлива из угольного фильтра, поэтому смесь становится слишком богатой и на это реагирует датчик кислорода.

Неисправности системы смесеобразования могут вызывать постоянное переобогащение или переобеднение смеси. Для контроля состава отработавших газов применяют лямбда-регулирование коррекции подачи топлива. Схема сигналов датчиков контроля состава отработавших газов показана на рис. 1.30. Примеры установки лямбда-зондов приведены на рис. 1.31. Для проверки функционирования катализатора в систему устанавливается второй лямбда-зонд.

Блок управления определяет сдвиг фаз между сигналами обоих лямбда-зондов. Если этот сдвиг фаз превышает запрограммированную границу, то блок управления интерпретирует это как признак старения катализатора.

Устройство и принцип действия обоих зондов одинаковы. Для проведения такой проверки необходимо одновременное выполнение следующих условий:

- лямбда-регулирование в активном состоянии, нагрузка 25-45%;
- скорость около 75 км/ч и постоянна;
- температура охлаждающей жидкости более 10 мин удерживается не менее 75°;
- частота сигнала лямбда-зонда не менее 1,5 Гц;
- амплитуда сигнала лямбда-

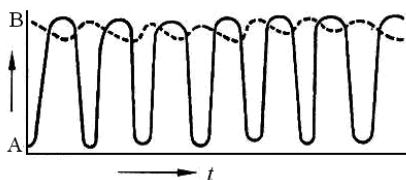


Рис. 1.30. Схема сигналов зонда перед катализатором (А) и после катализатора (В)

зонда после катализатор около 200 мВ.

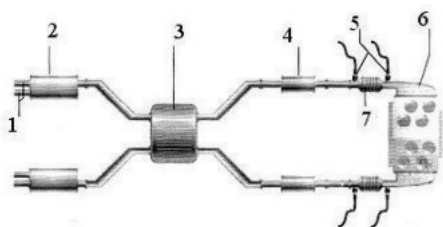


Рис. 1.31. Система выпуска W8:

1 – выхлопные трубы; 2 – концевой глушитель; 3 – основной глушитель; 4 – резонатор; 5 – кислородные датчики; 6 – выпускной коллектор; 7 – каталитический нейтрализатор

В зависимости от модификации ЭСУД и ее адаптации к тем или иным нормам токсичности могут быть реализованы разные схемы и алгоритмы установки λ -зондов.

1) Euro-1 и Euro-2: один двухуровневый λ -зонд перед трехкомпонентным нейтрализатором;

2) Euro-3: два одинаковых двухуровневых λ -зонда, один перед, другой за нейтрализатором ОГ. Первый λ -зонд осуществляет коррекцию топливовоздушной смеси, второй – контроль технического состояния нейтрализатора;

3) Euro-4 и Euro-5: перед нейтрализатором размещен широкополосный λ -зонд, который точно определяет величину коэффициента избытка воздуха, за нейтрализатором – второй двухуровневый λ -зонд для контроля технического состояния нейтрализатора.

Контрольные вопросы

1. Какое назначение системы вентиляции топливного бака?
2. Какое назначение датчика лямбда-зонда? Сколько, где и с какой целью его необходимо устанавливать?
3. Назвать компоненты системы вентиляции топливного бака.

1.7. Компоненты аккумуляторной системы подачи топлива бензинового двигателя

1.7.1. Классификация систем питания

Классификация систем питания ДВС может быть проведена по следующим признакам:

1. Способ подачи смеси или компонентов: карбюрация; впрыск; непосредственно в камеру сгорания; во впускной тракт; распределительный впрыск; центральный впрыск.

2. Число форсунок (инжекторов): с индивидуальной форсункой для каждого цилиндра (распределительный впрыск); с индивидуальной форсункой для каждого цилиндра и с одной пусковой форсункой; одной форсункой

для всех цилиндров (центральный впрыск).

3. Время дозирования: непрерывные; периодические.

4. Род энергии, используемой в элементах топливной аппаратуры: механические; гидравлические; пневматические; тепловые; электрические.

5. Тип материалов, используемых в элементах: механические; электротехнические; электронные.

6. Принцип действия регулирующего органа: дросселирующие; дозирующие.

7. Дозирование: дозирование смеси; дозирование компонентов.

8. Регулирование состава смеси по: разрежению во впускном тракте; углу поворота дроссельной заслонки; расходу воздуха.

9. Место смесеобразования: в цилиндрах (двигатели с внутренним смесеобразованием); в специальных устройствах (двигатели с внешним смесеобразованием).

1.7.2. Аккумуляторы системы подачи топлива

Компоненты аккумуляторной системы топливоподачи приведены на рис. 1.32 [5].

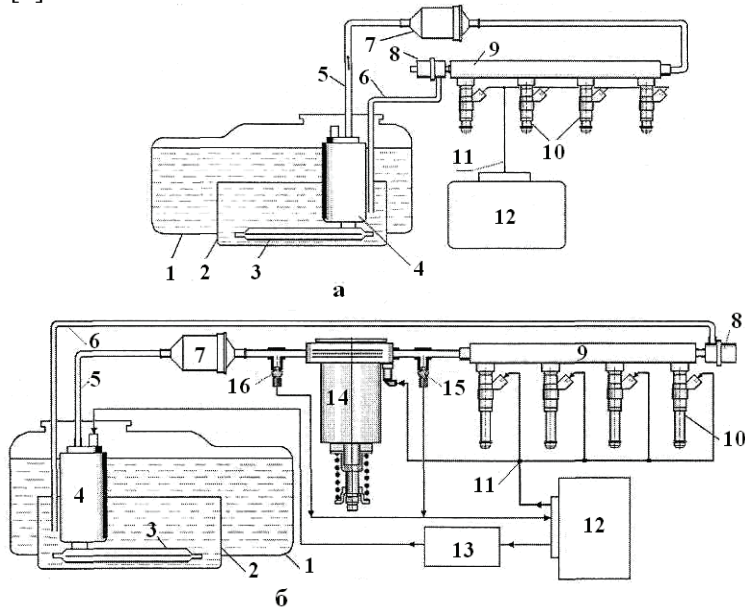


Рис. 1.32. Функциональная схема систем впрыскивания бензина:

1 – топливный бак; 2 – накопитель топлива; 3 – входной фильтр; 4 – топливный насос низкого давления с электроприводом; 5, 6 – трубопроводы нагнетающий и обратного слива топлива; 7 – топливный фильтр; 8 – клапан регулятора давления; 9 – топливный аккумулятор; 10 – электромагнитные форсунки; 11 – соединительные проводники; 12 – электронный блок управления двигателем; 13 – электронный блок управления топливным насосом низкого давления; 14 – топливный насос высокого давления; 15, 16 – датчики низкого и высокого давления топлива

Гидравлический аккумулятор (рампа) предназначен для накопления запаса топлива с постоянным давлением и подачи его к форсункам. С одной стороны на нем расположен штуцер для контроля за давлением топлива, а с другого – регулятор давления. Регулятор давления изменяет давление в топливном аккумуляторе от 380 до 320 кПА, что зависит от разрежения в ресивере, поддерживая постоянный перепад между ними. Это необходимо для точного дозирования топлива форсунками. Давление топлива в аккумуляторе можно изменять в зависимости от режима работы двигателя. Электрический способ управления клапанами форсунок позволяет, кроме того, оперативно управлять началом и длительностью впрыскивания топлива.

На рис. 1.32 также представлены варианты аккумуляторной топливной системы для впрыскивания бензина во впускные клапаны цилиндров двигателя. Аккумулятор высокого давления впрыска бензина показан на рис. 1.33.

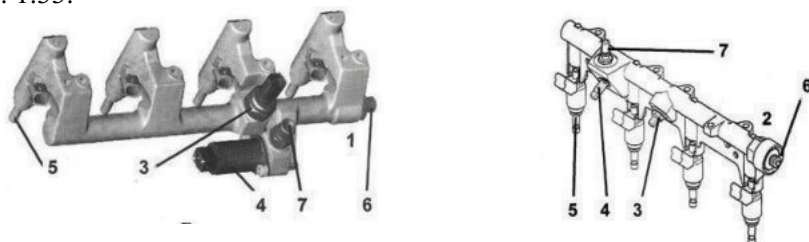


Рис. 1.33. Аккумулятор высокого давления впрыска топлива:

1 – Rail C200CGI; 2 – Rail PSA; 3 – датчик; 4 – регулятор давления; 5 – форсунка; 6 – вход; 7 – обратный слив

В аккумуляторных топливных системах фирмы Bosch защита от чрезмерного повышения давления топлива в магистрали высокого давления выполняется ограничительным (предохранительным) клапаном. Конструкция такого клапана показана на рис. 1.34 (а).

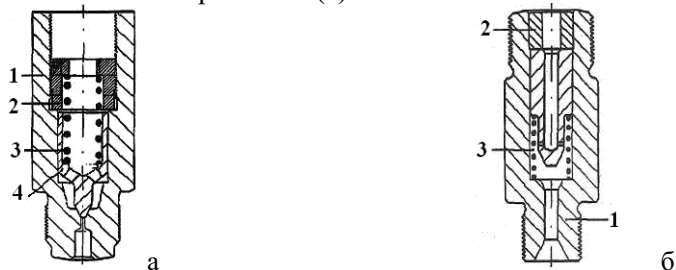


Рис. 1.34. Устройство клапана ограничителя давления в аккумуляторе (а) и ограничителя расхода топлива в цилиндры и управления подачей (б):

1 – корпус; 2 – регулировочная втулка; 3 – пружина; 4 – поршень

Нижним каналом клапан сообщен с аккумулятором, верхним – со сливной магистралью. Значение давления, при котором клапан открывается, определяется затяжкой пружины, зависящей от положения регулировочной втулки. При открытом клапане топливо из аккумулятора сливается в бак. При уменьшении давления ниже заданного клапан под воздействием пружины закрывается.

жины закрывается и в аккумуляторе может быть восстановлено исходное давление.

Для аварийного снижения давления (предохранительный режим) такой клапан должен снабжаться защелкой, закрепляющей его в открытом положении. Подача топлива в цилиндры прекращается, двигатель останавливается и его пуск возможен только после разблокирования клапана.

Защита от потери герметичности в каналах подачи топлива в цилиндры и управления подачей форсунок из-за зависания иглы, управляющего клапана, обрыва трубопровода, раскрытия стыков и т. п. и ограничение расхода топлива при задержках закрытия иглы и управляющего клапана осуществляются ограничителями, установленными на выходах из аккумулятора. Устройство одного из вариантов ограничителя расхода топлива показано на рис. 1.34 (б).

Наличие в аккумуляторной электронной топливной системе (ЭТС) большого числа деталей, постоянно находящихся под высоким давлением, объективно создает угрозу аварий при выходе их из строя. Поэтому опытные образцы аккумуляторных ЭТС снабжались комплексом аварийных защит. В его состав входили: электронная система аварийного опорожнения аккумулятора при любых нештатных ситуациях прежде всего при разное двигателя, механический предохранительный клапан, автоматическое отключение части магистрали высокого давления, относящейся к отдельной форсунке, при снижении герметичности любого элемента такой части магистрали или отключение хотя бы только форсунки, в которой чрезмерно увеличился общий расход топлива на впрыскивание и управление. Автоматические отключения вышедших из строя элементов магистрали высокого давления повышают отказоустойчивость аккумуляторных ЭТС, сохраняя работоспособность ее не отключенной части. Некоторые элементы таких комплексов имеются и в составе аккумуляторных ЭТС, предназначенных для серийных двигателей.

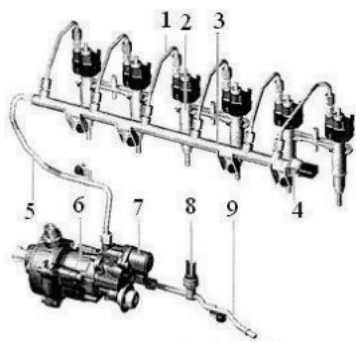


Рис. 1.35. Контур высокого давления BMW N53
муляторе контролирует датчик 4. Регулятор расхода топлива обеспечивает необходимое количество топлива для соответствующего режима работы двигателя.

Системы высокого давления, например, автомобиля BMW N53 (рис. 1.35), позволяют создавать давление до 200 бар.

На рис. 1.35 обозначены: 1 – трубопровод Rail-Injektor; 2 – Piezo-Injektor (Siemens); 3 – топливный аккумулятор; 4 – датчик высокого давления топлива; 5 – трубопровод HDP-Rail; 6 – трехплунжерный HDP (Siemens); 7 – регулятор подачи топлива; 8 – датчик низкого давления топлива; 9 – трубопровод подачи топлива от ЕКР.

Регулятор подачи топлива 7 создает требуемое давление. Давление топлива в аккумуляторе контролирует датчик 4. Регулятор расхода топлива обеспечивает необходимое количество топлива для соответствующего режима работы двигателя.

Датчики и исполнительные устройства бензинового впрыска Ford EEC V и Ford EEC IV представлены на рис. 1.36.

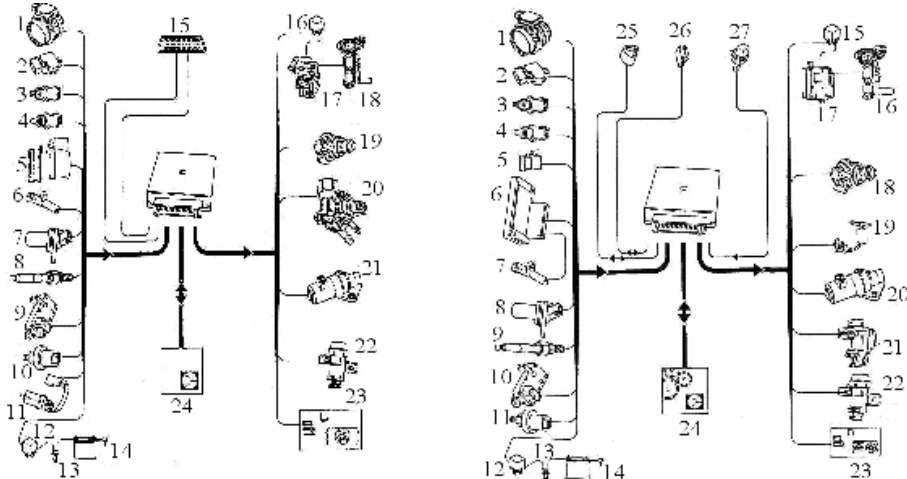


Рис. 1.36. Компоненты системы впрыска Ford EEC V (а) и Ford EEC IV (б):

а: 1 – расходомер воздуха; 2 – потенциометр дроссельной заслонки; 3 – датчик температуры воздуха; 4 – датчик температуры двигателя; 5 – магнитная муфта компрессора кондиционера; 6 – датчик числа оборотов/синхронизации; 7 – фазовый датчик; 8 – лямбда-зонд; 9 – датчик дифференциального давления; 10 – выключатель гидроусилителя руля; 11 – датчик скорости; 12 – главное реле; 13 – замок зажигания; 14 – аккумуляторная батарея; 15 – диагностический разъем; 16 – реле бензонасоса; 17 – аварийный выключатель; 18 – погружной бензонасос; 19 – форсунка; 20 – клапан вентиляции топливного бака; 21 – регулятор холостого хода; 22 – магнитный клапан рециркуляции выхлопа; 23 – управление кондиционером/вентилятором; 24 – иммобилайзер;

б: 1 – расходомер воздуха; 2 – потенциометр дроссельной заслонки; 3 – датчик температуры воздуха; 4 – датчик температуры двигателя; 5 – магнитная муфта компрессора кондиционера; 6 – EDIS-4 модуль (только с АКПП); 7 – датчик числа оборотов/ синхронизации; 8 – фазовый датчик; 9 – лямбда-зонд; 10 – датчик дифференциального давления; 11 – выключатель гидроусилителя руля; 12 – главное реле; 13 – замок зажигания; 14 – аккумуляторная батарея; 15 – реле бензонасоса; 16 – погружной бензонасос; 17 – аварийный выключатель; 18 – форсунка; 19 – клапан вентиляции топливного бака; 20 – регулятор холостого хода; 21 – магнитный клапан вторичного воздуха; 22 – магнитный клапан рециркуляции выхлопа; 23 – управление кондиционером/вентилятором; 24 – электронное управление АКПП; 25 – диагностический разъем блинк-кода; 26 – диагностический разъем FDS 2000; 27 – разъем октан-корректора

1.7.3. Виды, устройство и работа электромагнитных форсунок

Основными компонентами системы распределенного впрыскивания бензина во впускной коллектор являются: топливный насос с электрическим приводом, топливный гидроаккумулятор, регулятор давления топлива и электромагнитные клапанные форсунки.

Форсунка (рис. 1.37) представляет собой гидравлический клапан с приводом от электромагнита и является конечным исполнительным устрой-

ством аппаратуры впрыскивания, которое дозирует и распыливает топливо [5].

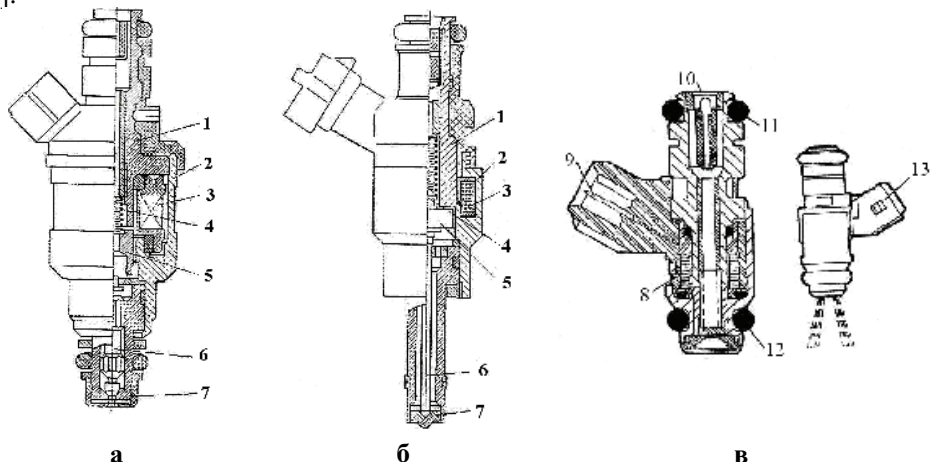


Рис. 1.37. Конструкция электромагнитных форсунок впрыскивания бензина:

1, 2 – внутренний и внешний корпус-магнитопровод; 3 – обмотка электромагнита; 4 – возвратная пружина; 5 – якорь электромагнита; 6 – игла распылителя; 7 – корпус распылителя; 8 – электрическая обмотка; 9 – контакты подключения; 10 – сетка на входе; 11 – уплотнение от планки; 12 – уплотнение к головке; 13 – разъем

Электромагнитные форсунки 10 (рис. 1.32) входят во впускной трубопровод таким образом, что струя впрыскивания попадает в зону перед тарелкой или непосредственно на тарелку впускного клапана (в некоторых случаях также на несколько впускных клапанов). Здесь во впускном трубопроводе топливо вместе со всасываемым воздухом образует рабочую смесь. Каждый цилиндр оснащен форсункой.

Форсунками управляет блок управления двигателя в тактовом режиме. Длительность сигналов на впрыскивание определяет количество впрыскиваемого топлива. В зависимости от типа впрыскивания форсунки работают одновременно или по отдельности. В новых разработках используется только последовательное или индивидуальное впрыскивание топлива для каждого цилиндра. В каждый цилиндр впрыскивается точно дозированное количество топлива в самый подходящий для этого момент.

В зависимости от числа впускных клапанов в цилиндре, конструкции впускного тракта и возможности размещения форсунок в двигателях с распределенным впрыскиванием топлива используют форсунки с различным углом конуса распыливания, одноструйные, двухструйные и с боковым направлением факела.

На подачу топлива влияют:

- зазоры в сопряжениях деталей клапана форсунки;
- проходное сечение отверстий распылителя;
- жесткость пружины;
- сопротивление и индуктивность катушки.

Техническое состояние форсунки ухудшается вследствие: усадки пружины форсунки; износа контактирующих поверхностей «иголка-пружина-регулировочный винт»; износа запорного конуса иглы-распылителя; загрязнения распылительных отверстий и уменьшения проходных сечений.

Характерным примером электромагнитной форсунки может служить форсунка фирмы Bosch, показанная на рис. 1.37 (а). Электромагнитные форсунки применяются для впрыскивания топлива в цилиндры при давлении топлива только до 12-15 МПа. Такого давления достаточно для непосредственного впрыскивания легких топлив – бензина, сжиженных газов и некоторых синтетических – в большинстве случаев в цилиндры двигателей с искровым зажиганием.

На рис. 1.37 (в) показана форсунка Fiat Bravo.

Распределенное впрыскивание бензина предусматривает размещение на впускном коллекторе нескольких форсунок, количество которых равно количеству цилиндров. Бензин впрыскивается дискретно в область впускных клапанов, где он испаряется, перемешивается с воздухом, образуя готовую гомогенную топливовоздушную смесь. Различают три способа управления форсунками:

- одновременное впрыскивание всеми форсунками;
- попарно-параллельное впрыскивание;
- последовательное (фазированное) впрыскивание.

При одновременном и попарно-параллельном способах форсунки срабатывают один раз за каждый оборот коленчатого вала, то есть впрыскивают бензин дважды за рабочий цикл. Это создает неодинаковые условия смесеобразования, потому что для некоторых форсунок впрыскивание приходится на такую фазу рабочего процесса, когда открытый впускной клапан, в то время как для других форсунок впрыскивание происходит при закрытых впускных клапанах.

Последовательное (фазированное) впрыскивание обеспечивает равные условия смесеобразования для всех цилиндров, потому что бензин впрыскивается при закрытых впускных клапанах.

Для бензиновых двигателей с впрыскиванием топлива во впускной коллектор существует три разновидности сигнала управляющего импульса на форсунке: для традиционной (16 Ом) форсунки системы распределенного впрыскивания бензина, для низкоомной (1,5-4 Ом) форсунки, для обеих систем – распределенного и централизованного впрыскивания бензина. В зависимости от варианта сигнала необходимо по-разному учитывать действительную продолжительность управляющего импульса.

Количество впрыскиваемого топлива за цикл при постоянстве давления на входе в форсунку зависит только от длительности управляющего импульса.

В реальной форсунке время открытого состояния клапана не совпадает с длительностью управляющего импульса. После подачи управляющего электрического импульса на форсунку в обмотке электромагнита возникает ток самоиндукции, препятствующий нарастанию магнитного потока в сис-

теме. Клапан открывается с задержкой по времени (рис. 1.38). При прекращении подачи управляющего импульса в результате самоиндукции сохраняющийся магнитный поток будет препятствовать быстрому отпусканью запирающего элемента. Поэтому длительность открытого состояния клапана форсунки τ_n отличается от длительности электрического управляющего импульса. На запаздывание срабатывания форсунки дополнительно влияют механические потери в системе перемещения элементов форсунки.

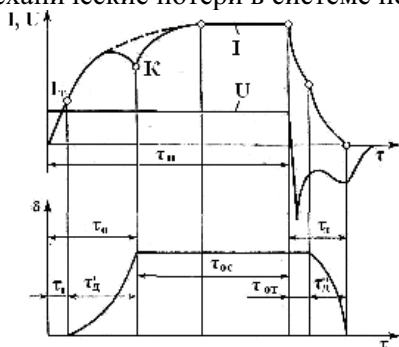


Рис. 1.38. Диаграмма изменения электрических и механических параметров электромагнитной форсунки:

τ_0 – фаза открытия клапана; τ_τ , $\tau'_д$ – периоды трогания с места и движения запирающего элемента при открытии клапана; $\tau_{ос}$ – фаза открытого состояния форсунки; τ_3 – фаза закрытия клапана; $\tau_{от}$, $\tau''_д$ – периоды отпускания и движения запирающего элемента; τ_n – длительность управляющего электрического импульса; I , U – ток и напряжение в обмотке электромагнита; δ – рабочий ход запирающего элемента

проходящего через форсунку в единицу времени при заданном давлении и полностью открытом клапане форсунки. Фирмы выпускают семейства форсунок с разными статическими расходами, что позволяет обеспечить работу двигателей с разным рабочим объемом цилиндров.

Форсунки, используемые концерном Фольксваген в системах впрыскивания бензина в камеру сгорания (рис. 1.37, б), отличаются от предыдущих удлиненной частью распылителя, так как работают в более тяжелых температурных условиях, и формой магнитопровода и количеством витков катушки электромагнита, ибо непосредственное впрыскивание бензина имеет ограничение во времени, поэтому электромеханические преобразователи (ЭМП) должны иметь большее быстродействие.

Но для всех приведенных вариантов форсунок характерным признаком является наличие элементов электромеханических преобразователей: ферромагнитного магнитопровода, который охватывает катушку, и подвиж-

Повысить быстродействие электромагнитной форсунки можно за счет уменьшения числа витков обмотки электромагнита и ее индуктивности. Однако при этом уменьшается сопротивление обмотки и увеличивается потребляемый ею ток. Для ограничения силы тока последовательно с обмоткой включают резистор.

При подборе форсунки для конкретного двигателя необходимо учитывать ее основные характеристики:

- статический расход топлива;
- динамический диапазон работы;
- минимальную цикловую подачу топлива;
- время открытия и время закрытия форсунки;
- угол конуса распыливания и дальнобойность факела топлива;
- мелкость распыливания и распределение топлива в факеле.

Статический расход топлива характеризуется количеством топлива,

ного якоря. То есть, все они электромеханические с электромагнитным приводом непосредственного действия.

ЭМП является интерфейсом связи между электрической частью системы управления и механическим клапаном форсунки. В основу его работы положен принцип преобразования электрической энергии в механическую.

Форсунки, имеющие ЭМП, который непосредственно поднимает клапан (иглу), получили название электромеханических. В большинстве известных конструкций электромеханических форсунок (ЭМФ) запираание клапана (иглы) осуществляется с помощью пружины. При этом игла жестко связана с подвижной частью электромеханического привода. Величина цикловой подачи в ЭМФ определяется продолжительностью включения электромеханического привода и величиной давления топлива на входе в форсунку.

По принципу действия электромеханические преобразователи делятся на: электромагнитные, электродинамические, магнитострикционные и пьезоэлектрические. Электромагнитные и электродинамические преобразователи основаны на внешних эффектах взаимодействия магнитных полей, создаваемых различными методами. Магнитострикционные и пьезоэлектрические построены на использовании внутренних физических свойств веществ и особенностей их кристаллического строения. Эти свойства проявляются при взаимодействии кристаллов в соответствии с магнитным и электрическим полем.

Динамический диапазон работы форсунки (ДДР) определяется отношением максимальной и минимальной цикловых подач топлива в диапазоне их изменения, при котором с точностью до 2-3% сохраняется линейная связь между продолжительностью импульса открытия форсунки и величиной цикловой подачи топлива. Величина ДДР – важный фактор, так как определяет возможность сохранения точного управления подачей топлива при изменении нагрузки; на нее оказывает большое влияние масса подвижного элемента форсунки (якоря электромагнита с клапаном).

Нарушение линейности характеристики в значительной мере связано с влиянием переходных процессов открытия и закрытия форсунки. Помимо массы подвижного элемента на эти процессы влияет сила пружины клапана. Увеличение затяжки пружины повышает время открытия форсунки

В табл. 1.3 показаны величины ДДР у нескольких конструкций штифтовых форсунок фирмы Bosch с разной массой подвижного элемента. Увеличение ДДР достигнуто благодаря улучшению системы электромагнитного привода. За счет совершенствования конструкции форсунок в последние годы время открытия и закрытия, клапана удалось уменьшить в 2-3 раза по сравнению с указанными в табл. 1.3.

Качество распыливания топлива зависит от давления впрыскивания и конструкции распылителя. Обычно давление впрыскивания составляет 2-4,5 бар. У распыливающих форсунок средний диаметр каплей – 150-200 мкм. Путем совершенствования конструкции распыливающих отверстий или применения специальных мер для улучшения распыливания средний диаметр каплей может быть уменьшен примерно до 60 мкм.

Динамический диапазон работы форсунок

Масса подвижного элемента, г	Время от- крытия, мс	Время за- крытия, мс	ДДР
4,3	1,55	0,89	8
4,3	1,49	0,72	10
2,7	1,32	0,55	17

Для управления качеством смесеобразования применяют форсунки с воздушным распыливанием топлива. Воздух к форсунке подается под естественным перепадом давления во впускном тракте и в окружающей среде. В этом случае по мере прикрытия дроссельной заслонки количество подаваемого воздуха увеличивается и, следовательно, улучшается качество распыливания. Реже используют принудительную подачу воздуха к форсунке под избыточным давлением.

В двигателях с распределенным впрыскиванием топлива применяют как одновременное впрыскивание топлива всеми форсунками, так и фазированное впрыскивание, когда каждая форсунка подает топливо к цилиндру в определенной фазе цикла. При одновременном впрыскивании упрощается управление форсунками, но не удастся обеспечить одинаковые условия смесеобразования во всех цилиндрах. Фазированное впрыскивание обеспечивает равные условия смесеобразования во всех цилиндрах. Для обеспечения стабильности смесеобразования подачу топлива стремятся закончить к моменту начала открытия впускного клапана, что, однако, сокращает возможную продолжительность открытия форсунки. Такая организация впрыскивания требует коррекции начала подачи топлива при изменении величины цикловой подачи. Вычисление необходимого момента начала подачи проводится аналогично определению момента опережения начала впрыскивания топлива в дизелях.

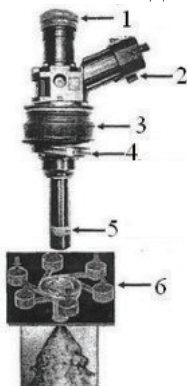


Рис. 1.39. Форсунка высокого давления

- электромагнитный привод;
- размещается на стороне всасывания в головке цилиндров;
- контроль срабатывания;

В системах с центральным впрыскиванием топлива в зону над дроссельной заслонкой величина цикловой подачи топлива также определяется длительностью открытия клапана форсунки. Чтобы обеспечить равномерное распределение топлива по цилиндрам, синхронизируют впрыскивание топлива с тактами всасывания всех цилиндров.

На рис. 1.39 представлена форсунка высокого давления Siemens (VDO). На рисунке цифрами обозначены: 1 – резиновое кольцо; 2 – разъем подключения; 3 – защита от коррозии; 4 – прокладка; 5 – тефлоновое кольцо; 6 – закручивание потока.

Особенностями таких форсунок являются:

- управляющее напряжение около 75 В;

- давление впрыска от 40 до 120 бар;
- перед впрыском поток топлива закручивается;
- подключение к гидроаккумулятору через резиновое кольцо;
- уплотнение в головке тефлоновое (сменное);
- возможность реализации трех впрысков (Porsche-DFI);
- скорость впрыска при 40 бар и 0,6 мс длительности впрыска – 80 мг/такт;
- скорость впрыска при 120 бар и 5,2 мс длительности впрыска – 80 мг/такт;
- высота подъема иглы форсунки 50 микрон;
- размер капли около 30 микрон в диаметре.

1.7.4. Топливная система двигателя с пьезоэлектрическими форсунками

Эта система непосредственного впрыска второго поколения позволяет расширить диапазон работы двигателя на бензиновой смеси, развивать большую мощность и высокий крутящий момент.

На рис. 1.40 приведен общий вид двигателя V6 CGI (а) и топливная система с пьезоэлектрическими форсунками (б). Активными элементами в пьезоэлектрических форсунках являются пьезокристаллы.

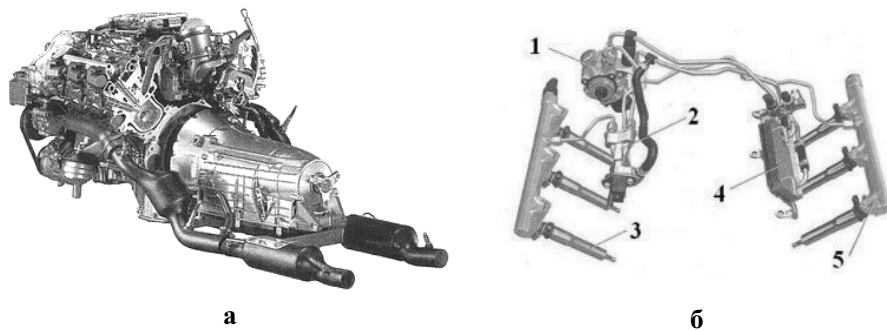


Рис. 1.40. Двигатель V6 CGI (а) и топливная система с пьезоэлектрическими форсунками (б):

- 1 – топливный насос высокого давления; 2 – распределитель; 3 – пьезоэлектрическая форсунка; 4 – охладитель топлива; 5 – общая напорная магистраль

Второе поколение систем непосредственного впрыска топлива, расширяя область работы двигателя в условиях ламинарного потока бедной смеси, обуславливает лучшие показатели эффективности и топливной экономичности, чем при работе с гомогенной смесью. В существующих системах до последнего времени эффективность работы двигателя с ламинарным зарядом смеси ограничивалась условиями процесса сгорания. Именно бедная смесь использовалась только при низкой частоте вращения коленчатого вала двигателя.

При бедной смеси происходит более полное сгорание топлива вследствие избытка воздуха. Ламинарное состояние заряда топливной смеси дос-

тигается за счет впрыска топлива при высоком давлении в конце такта сжатия в зону, максимально приближенную к свече зажигания. Распыленные частицы топлива находятся в окружении избыточного воздуха, образуя ламинарный, «слоистый», заряд смеси. Избыточный воздух одновременно снижает температуру в камере сгорания, вследствие чего задерживается образование оксидов азота NO_x и снижается тенденция к преждевременному возгоранию смеси. Для нового двигателя предусмотрено применение бензина с октановым числом 95 при повышенной степени сжатия 12,2:1, что также улучшает эффективность работы. В двигателе автомобиля CLS 350 степень сжатия 10,7:1.

В первом поколении систем непосредственного впрыска струя бензина из форсунки отражалась от днища поршня, формируя воздушно-бензиновую смесь до момента зажигания. При этом некоторое малое количество топлива всегда конденсируется на поверхности, приводя к неполному сгоранию, что в свою очередь снижает эффективность работы и увеличивает выброс окиси углерода CO.

Во втором поколении систем непосредственного впрыска топлива применены разработанные компанией Bosch пьезоэлектрические форсунки, в которых под воздействием напряжения электрического тока происходит расширение пьезокерамического стержня, поднимающего дозирующую иглу. Впрыск топлива происходит при давлении 20 мПа, что на 25% выше, чем у систем первого поколения. При этом образуется поток распыленного бензина в форме полого конуса. Днище поршня имеет специальный профиль. Форсунки размещаются сверху камер сгорания, что обеспечивает сохранение стабильности подачи топлива на всех режимах работы двигателя.

При работе в условиях ламинарного состояния заряда с частичной загрузкой двигателя впрыск топлива осуществляется дважды с интервалом 50 мкс: перед мертвой точкой такта сжатия и сразу после мертвой точки. Двигатель может работать на бедной смеси в расширенном диапазоне частоты вращения вала и крутящего момента, обеспечивая существенное улучшение экономических показателей.

Пьезоэлектрические системы на порядок превосходят системы с соленоидами по быстродействию и позволяют осуществить впрыск топлива 5-6 раз в течение одного цикла (а в лабораторных условиях значительно больше).

Лазер вместо свечей зажигания. Инженеры фирмы Carinthian Tech Research, г. Виллах (Австрия), предложили уменьшить лазер до размеров свечей зажигания. Таким образом стало возможным лазерное зажигание в бензиновых и газовых двигателях без каких-либо изменений камеры сгорания. Совместно с фирмой AVL List, специализирующейся на изготовлении двигателей и измерительной техники, г. Грац (Австрия), Carinthian Tech Research в настоящее время работает над практическим применением своего лазера.

По сравнению с традиционной системой зажигания высокого напряжения лазерное зажигание имеет некоторые преимущества, так как воспламеняющая плазма в камере сгорания может располагаться практически в

любом месте и можно значительно улучшить процесс сгорания. Другое преимущество – возможность многофазного зажигания, которое осуществляется лазерной свечой. Как и система многофазного впрыска, она способствует сгоранию с меньшим выбросом токсичных веществ в отработавших газах. С помощью лазера могут воспламеняться значительно более бедные смеси, что также уменьшает выброс CO_2 .



Рис. 1.41. Блок-схема типичной электронной системы управления бензиновым двигателем

Наряду с уменьшением габаритов новый лазер выдерживает воздействие возникающих в двигателе вибрации и температуры.

Блок-схема типичной электронной системы управления бензиновым двигателем представлена на рис. 1.41.

Микропроцессорная система используется при этом как техническое средство для реализации информационных связей в управлении потоками энергии в процессе топливоподачи. В микропроцессорной системе управления (МПСУ) осуществляется сбор и обработка информации от датчиков, а также используется информация, полученная путем математического и физического моделирования в процессе испытания и доводки двигателя. Информация, содержащаяся в контроллере в виде многочисленных таблиц, преобразуется в сигналы управления, которые подаются на форсунки. Носителем информации в микропроцессорной системе является электрический сигнал, а питание системы осуществляется от бортовой электрической сети автомобиля. Поэтому сначала информационный сигнал малой мощности на выходном каскаде (драйвере) МПСУ усиливается по мощности, а потом передается на активатор, частью которого является электромеханический преобразователь (ЭМП), расположенный в форсунке. Таким образом, в ЭМП решается задача преобразования некоторой части электрической энергии бортовой сети в механическое влияние на поток управляющей энергии [9].

МПСУ существенно расширили использование информационных связей, что позволяет реализовать сложные законы управления, учесть большое количество влияющих факторов и более эффективно управлять энергетическими процессами. Величина расхода электрической энергии определяется сопротивлением среды, в которой находится исполнительное звено ЭМП, а также силами инерции и скоростью перемещения исполнительного звена ЭМП. Часто возникают задачи, в которых от ЭМП требуется большое механическое усилие при высоком быстродействии.

1.7.5. Насосы и регуляторы давления

Насос объемного типа выполнен в виде моноблока (рис. 1.42).

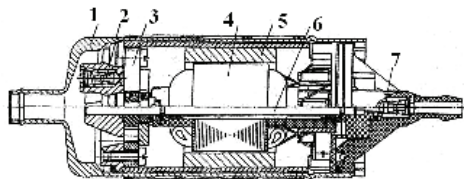


Рис. 1.42. Конструкция погружного бензонасоса:

1 – корпус насоса; 2 – предохранительный клапан; 3 – насосный узел; 4 – якорь электродвигателя; 5 – постоянный магнит; 6 – ось электродвигателя; 7 – обратный клапан

дает возможности слива топлива из системы.

В корпусе 1 расположены: насосный узел 3 и электродвигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов 5. Якорь 4 двигателя вместе с коллектором интенсивно охлаждаются топливом. В зоне искрения щеточного узла есть бензин, но нет воздуха, поэтому его загорание принципиально невозможно. Предохранительный клапан 2 соединяет пустоты нагнетания и всасывания, а обратный клапан 7 не

Регулятор давления топлива. Регулятор по информации, получаемой от датчика давления, поддерживает заданное давление путем сброса части топлива из магистрали высокого давления через исполнительный электромагнитный клапан, представленный на рис. 1.43.

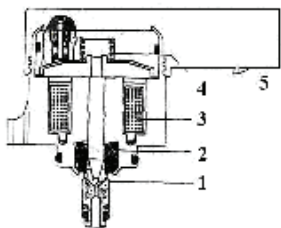


Рис. 1.43. Исполнительный электромагнитный клапан регулятора давления:

1 – шариковый клапан; 2 – толкатель тарельчатого якоря; 3 – обмотка электромагнита; 4 – пружина; 5 – штепсельный разъем

сопротивление пружины, пытается втянуть диафрагму, открывая клапан. С другой стороны на диафрагму давит топливо, также сжимая пружину. В результате клапан открывается, и часть топлива «сравливается» через сливной трубопровод назад в бак. При нажатии на педаль акселератора разрежение за дроссельной заслонкой уменьшается, диафрагма под действием пружины прикрывает клапан – давление топлива увеличивается. Если же дроссельная заслонка закрыта, разрежение за ней максимальное, диафрагма сильнее оттягивает клапан – давление топлива снижается. Перепад давления задается жесткостью пружины и размерами отверстия клапана.

Если давление в аккумуляторе отсутствует, пружина 4 держит шариковый клапан 1 в закрытом состоянии. При определенном давлении в аккумуляторе пружина сжимается и клапан открывается. Сила включенного электромагнита закрывает затвор.

Изменение сброса топлива производится широтно-импульсной модуляцией сигнала, подаваемого на электромагнит, которая может быть дополнена частотно-импульсной (широтно-импульсная модуляция – изменение относительной длительности, а частотно-импульсная – частоты). Модуляция изменяет среднее значение относительной длительности открытого положения затвора, а следовательно, и расход топлива через клапан.

Сброс топлива из магистрали высокого давления в бак вызывает дополнительные потери энергии, в частности из-за нагрева топлива в баке. Это может привести к необходимости охлаждения топлива, увеличению ТНВД и мощности его привода. Целесообразно регулирование давления в аккумуляторе осуществлять исполнительными механизмами, действующими на всасывании ТНВД, т. е. в магистрали низкого давления. Оптимально по соотношению сложности исполнения и качества управления давлением в аккумуляторе регулирование давления на всасывании ТНВД изменением частоты вращения топливоподкачивающего насоса, в особенности если он имеет электрический привод.

Топливоподкачивающий насос. Наполнение надплунжерного пространства ТНВД обеспечивается топливоподкачивающим насосом. Большинство аккумуляторных систем подачи топлива (АСТП) оснащены подкачивающими насосами шестеренного типа, реже лопастными, встроенными в корпус ТНВД, или электрическими центробежными насосами. Для поддержания постоянного давления подкачки насос оснащен клапаном-регулятором давления, что позволяет поддерживать давление покачивания на уровне 200-300 кПа независимо от режима работы двигателя.

1.7.6. Датчики систем измерения давления и положения дроссельной заслонки

Датчики двигателей. Назначение, технические характеристики и неисправности датчиков двигателей достаточно подробно описаны в работах [6, 7]. В данной работе будут приведены только выходные характеристики некоторых датчиков, по которым можно контролировать их техническое состояние.

Конструкция и характеристики датчиков давления топлива разной чувствительности приведены на рис. 1.44, 1.45, 1.46.

Эти датчики могут быть использованы для диагностирования быстропротекающих изменений давления в гидросистемах, в частности в гидравлическом аккумуляторе топливных систем двигателей.

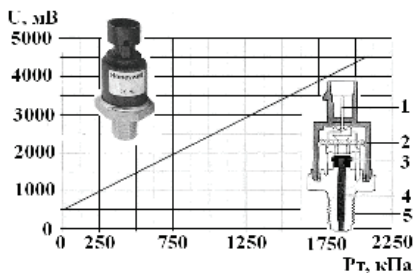


Рис. 1.44. Выходная характеристика датчика давления Honeywell MLN 300PSB01A:

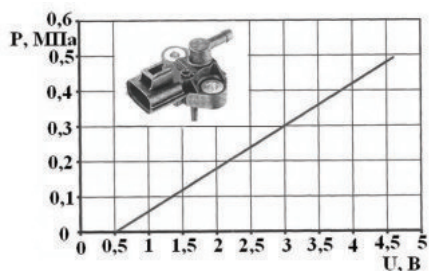


Рис. 1.45. Калибровочная характеристика выходного сигнала датчика давления PST-F

На рис. 1.44 обозначены: 1 – разъем подключения к жгуту проводки; 2 – микросхема усиления сигнала; 3 – стальной стакан с мембраной и тензорезисторами; 4 – канал подвода топлива; 5 – крепежная резьба.

На рис. 1.47 приведены внешний вид, конструкция и характеристика одного из видов датчика положения дроссельной заслонки.

Датчик положения дроссельной заслонки представляет собой переменный резистор (потенциометр). Подвижная часть датчика соединена с осью дроссельной заслонкой. Характеристика датчика линейна. В зависимости от положения дроссельной заслонки, изменяется сопротивление датчика и падение напряжения на нем. По величине падения напряжения на

датчике электронный блок управления определяет степень ее открытия. Выходное напряжение, изменяющееся в пределах от 0 до 5 В, измеряется блоком управления. При закрытом положении дроссельной заслонки выходное напряжение до 0,7 В, при полностью открытом – не более 4,8 В.

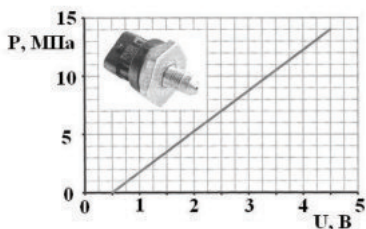


Рис. 1.46. Калибровочная характеристика выходного сигнала датчика давления PSS-260

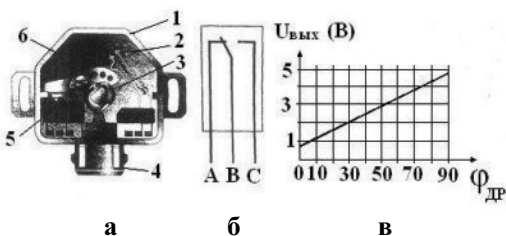


Рис. 1.47. Датчик положения дроссельной заслонки концевой типа

На рис. 1.47 обозначены: а – конструкция; б – электрическая схема; в – характеристика; 1 – корпус; 2 – контакты полной нагрузки; 3 – ось дроссельной заслонки; 4 – электрический разъем; 5 – микровыключатель холостого хода; 6 – эксцентрик.

Дроссельная заслонка в дроссельном патрубке автомобиля управляет посредством механизма привода и не имеет механической связи с педалью акселератора. Водитель, увеличивая или уменьшая угол наклона педали акселератора, выдает задание на увеличение или уменьшение скорости автомобиля (при включенной передаче коробки передач) или на сохранение заданной скорости при изменении внешней нагрузки. Электронная система управления воспринимает это задание водителя с помощью датчика педали акселератора, оценивает требуемый крутящий момент на ведущих колесах и с учетом потребностей других потребителей мощности, выдает управляющий сигнал на двигатель механизма привода дроссельной заслонки, который через редуктор поворачивает дроссельную заслонку на требуемый угол.

При возникновении неисправности в цепи датчика (обрыв, короткое замыкание) контроллер фиксирует коды неисправности. Управление двигателем при этом переходит в резервный режим – значение циклового наполнения определяется в соответствии с частотой вращения вала двигателя и положением дроссельной заслонки. Если и в цепи датчика положения дроссельной заслонки обнаружена неисправность, то значение часового расхода воздуха устанавливается равным некоторой постоянной величине, что позволяет двигаться на автомобиле до станции техобслуживания.

Для ликвидации загрязнений измерительного элемента предусмотрена кратковременная (длительностью около 1 с) подача повышенного напряжения на элемент, увеличивающая его температуру до 1000 °С. Такой кратковременный импульс подается в условиях эксплуатации после остановки двигателя и позволяет выжечь все загрязнения, осевшие на нить. Его можно наблюдать визуально по кратковременному свечению нити датчика после выключения зажигания, если отсоединен входной воздушный патрубок.

1.7.7. Смесеобразование, распыление топлива и режимы работы двигателя

Карбюраторная система является одной из первых систем, в которой пытались использовать электронные средства управления для улучшения показателей двигателя, сохранив принцип карбюрации.

К системам с центральным расположением дозаторов относятся карбюраторные системы и системы с центральным впрыском, которые еще называют моновпрыскивающими. Однако по ряду причин в системах с центральным расположением дозирующего органа не удастся получить хорошие результаты по показателям экономичности и токсичности отработавших газов.

В современных двигателях подача – топлива в цилиндры осуществляется механическим способом под управлением микропроцессорных систем преимущественно путем распыления с помощью клапанных форсунок. Форсунки соединяются с гидроаккумулятором, в котором поддерживается постоянное давление. Предварительное сжатие топлива добавляет топливной струе механическую энергию, что обеспечивает необходимую дальность и направленность факела, а также позволяет получить мелкие капли распыленного топлива – условия, необходимые для хорошего смесеобразования

Состав смеси определяется соотношением доз компонентов, поступающих в цилиндр. Изменение расхода, как известно, можно осуществлять дозирующими регулирующими органами, т. е. изменяя сопротивление движению или движущую силу.

Смесеобразование. Основная задача процесса смесеобразования состоит в получении гомогенной (однородной) смеси топлива с воздухом и обеспечения полного испарения топлива. Весь процесс смесеобразования можно представить как последовательность процессов дозирования, распыления, испарения топлива и перемешивания его пара с воздухом. В реальных условиях эти процессы протекают с перекрытием, поэтому процесс образования горючей смеси представляют двумя стадиями: дозирование топлива (обеспечение количественного соотношения между топливом и воздухом) и гомогенизация, то есть получение однородной топливовоздушной смеси.

Органы, дозирующие топливо, могут быть общими для всех цилиндров или индивидуальными для каждого цилиндра. В зависимости от расположения дозирующих органов различают центральные (с общими дозаторами) и распределенные (с индивидуальными дозаторами) системы топливоподачи. По этим признакам среди система внешнего смесеобразования двигателей с принудительным зажиганием различают следующие методы дозирования и распыления топлива [5]:

- карбюрация;
- центральное впрыскивание;
- распределенное впрыскивание – непрерывное или дискретное.

Независимо от способа подачи топлива система должна обеспечивать однородную (однородную) топливовоздушную смесь, способную загораться и эффективно сгорать на всех режимах работы двигателя.

К системам с распределенными дозаторами относятся системы с электроуправляемыми форсунками и системы с неуправляемыми форсунками (инжекторами). При этом в карбюраторах и в системах с инжекторами обеспечивается непрерывная подача топлива, а в системах с электроуправляемыми форсунками – дискретная.

В современных двигателях с впрыском бензина во впускной коллектор дозирование подачи топлива осуществляется с помощью управления электромагнитной форсункой.

Микропроцессорная система управления позволяет существенно расширить связи (энергетические, вещественные, информационные), учитывать большое количество влияющих факторов, реализовать оптимальные законы управления.

Режимы работы двигателя. Смесеобразование может определять следующие режимы работы бензинового двигателя с непосредственным впрыском (рис. 1.48):

Режимы	ВМТ	НМТ	ВМТ	НМТ
	Впуск	Сжатие	Рабочий ход	
Гомогенный	■		■	■
Послойный			■	■
Гомогенно-обедненный	■		■	■
Гомогенно-послойный	■		■	■
Гомогенно-раздельный	■		■	■
Гомогенно-антидетонац.	■		■	■
Послойн.-нагрев катал-ра	■			■
Посл.-разогрев накоп. NO _x			■	■
Послойный-стартовый			■	■

■ Впрыск ■ Зажигание

Рис. 1.48. Режимы работы бензинового двигателя

При гомогенном (однородном) режиме топливо подается в точно стехиометрическом соотношении 14,7:1 к поступившему воздуху. Топливо впрыскивается в такте впуска, чтобы иметь достаточно времени для полноценного смешивания (гомогенизации) смеси. При гомогенном режиме загорание происходит возле границы детонации и контролируется блоком управления. Необходимый крутящий момент определяется количеством поступившего воздуха и моментом зажигания (рис. 1.49, а).

При послойном (стратифицированном) режиме топливо подается в такте сжатия. Топливо перемешивается только с частью воздуха. В результате образуется идеально расположенное облако (слой) окруженное чистым воздухом. Начало впрыска очень важно при этом режиме. Облако должно быть достаточно гомогенизированным и расположенным между клапанами

так как вокруг него должен образоваться слой воздуха то в целом смесь получается обедненной. Здесь возникает необходимость дорогостоящей обработки образовавшихся NO_x .



Рис. 1.49. Моменты впрыска

Впрыск топлива происходит в последней трети такта сжатия. Для приготовления смеси остается около 40° - 50° поворота коленчатого вала. Зажигание должно производиться в довольно узком диапазоне. Необходимый крутящий момент зависит от количества впрыскиваемого топлива, масса воздуха и зажигания на него сильно не влияют.

Управление нагрузкой двигателя происходит за счет изменения количества впрыска топлива без использования дроссельной заслонки, которая остается полностью открытой. Этот режим работы возможен в диапазоне низких оборотов (от холостого хода до 3500 мин^{-1}) и частичной нагрузки. Это позволяет снизить расход топлива за счет снижения насосных и дроссельных потерь и улучшения эффективности сгорания. Компоненты системы управления крутящим моментом представлены на рис. 1.50.

Давление во впускном коллекторе остается в пределах от 600 до 800 мбар. При более высоких требованиях нагрузки двигатель переходит непосредственно на гомогенный впрыск. Режим послойной нагрузки невозможен, начиная с определенного количества оборотов, из-за постоянно сокращающегося времени впрыска.

Работа на обедненных смесях (рис. 1.49, б) считается приоритетной, поскольку позволяет существенно снизить расход топлива. Согласно исследований на его долю приходится около 75% рабочего времени двигателя.

Послойный режим может быть использован до половины нагрузки на двигатель. При повышении нагрузки смесь постепенно обогащается и двигатель переходит в гомогенный режим работы.

В зависимости от условий работы и других требований (ускорение, сокращение выбросов) двигатель может временно выйти из режима работы на обедненной смеси (рис. 1.51).

Гомогенно-обедненная. В переходном режиме от послойного до гомогенного двигатель может работать на обедненной гомогенной смеси ($\text{Lambda} > 1$). Применяется для устранения потерь при дросселировании. В таком режиме работы двигателя увеличивается выброс NO_x .

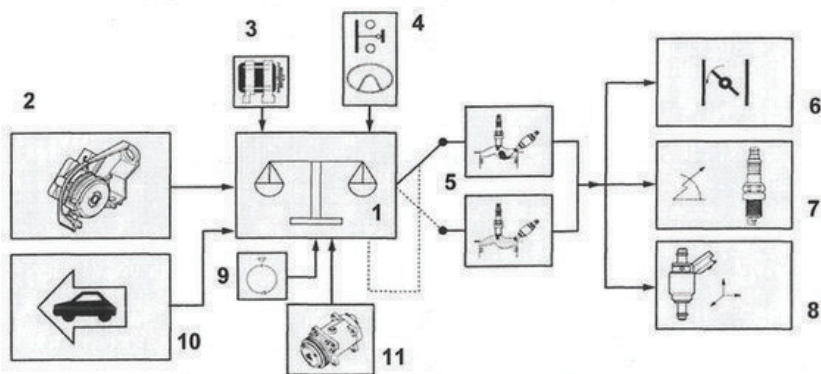


Рис. 1.50. Управление крутящим моментом:

1 – блок управления двигателем; 2 – датчик педали акселератора; 3 – генератор с прогрессивной нагрузкой; 4 – рулевой привод с сервоприводом – пневматический выключатель; 5 – режим работы; 6 – сервопривод дросселя; 7 – функция зажигания (момент зажигания); 8 – функция впрыска (давление, момент впрыска, длительность); 9 – информация по числу оборотов; 10 – регулировка скорости; 11 – компрессор кондиционера

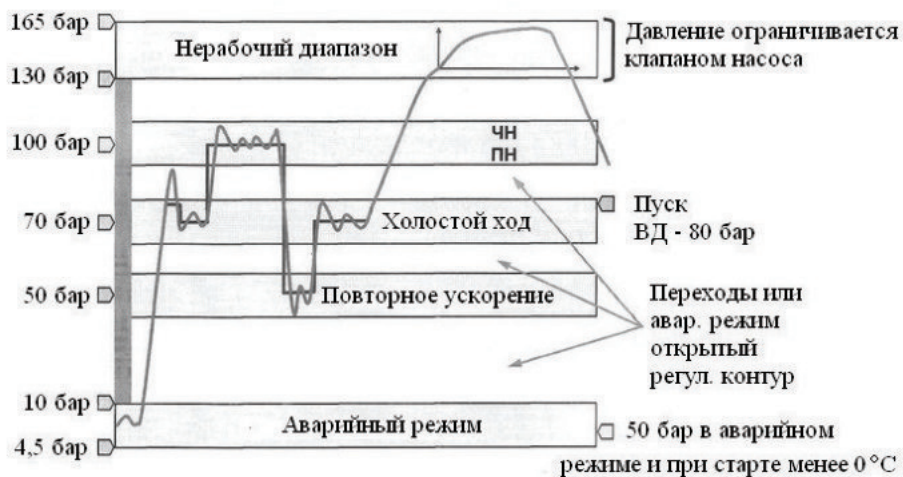


Рис. 1.51. Режимы работы двигателя

Гомогенно-послойный. При гомогенно-послойном режиме вся камера сгорания заполнена обедненной смесью. Это достигается впрыском основного количества топлива на такте впуска. Второй впрыск (Doppelein-spritzung) происходит на такте сжатия. Этот впрыск создает более богатую зону в районе свечи зажигания. Этот слой легко воспламеняется и за счет этого происходит воспламенение остальной смеси в камере сгорания.

Гомогенно-послойный режим активируется в течение нескольких циклов при переходе из послойного на гомогенное смесеобразование. В результате система может лучше управлять крутящим моментом двигателя во время перехода на другой режим.

Послойный - разогрев катализатора. Это другой тип двойного впрыска, позволяющий быстро разогреть выпускной тракт. Здесь при обедненной смеси полученной в такте сжатия (послойный режим) осуществляется добавочный впрыск в рабочем такте. Эта часть топлива сгорает очень поздно и сильно разогревает выпускной тракт. Режим используется для разогрева накопителя NO_x до температуры свыше 650°C , для удаления накопившейся серы.

Послойный - стартовый. При таком режиме впрыск производится не на такте впуска, а на такте сжатия. Преимущество заключается в том, что впрыск производится в уже сжатый и, соответственно, разогретый воздух. В результате большая часть топлива, которая при холодном двигателе оставалась жидкой на стенках цилиндра и не участвовала в сгорании, теперь переходит в газообразное состояние и сгорает. Количество впрыскиваемого топлива таким образом можно уменьшить, что приводит к снижению выбросов углеводородов. Это важно с точки зрения концепции снижения общего выброса ОГ.

Гомогенно-раздельный режим (Homogen-Split) – специальный переходной режим к гомогенно-послойному с двойным впрыском. Он используется в фазе разогрева двигателя для того, чтобы быстрее разогреть катализатор. При стабилизирующем втором впрыске в такте сжатия момент зажигания очень поздний (от 15° до 30° после ВМТ). Поэтому большая часть энергии используется не на увеличение крутящего момента, а на увеличение температуры выхлопных газов. Таким образом, катализатор разогревается за несколько секунд.

Гомогенно-антидетонационный. При этом режиме применяется добавочный впрыск при полной нагрузке, без сдвига в поздний угол зажигания, при появлении детонации. Второй впрыск является стабилизирующим и препятствует возникновению детонации. Положительным является то, что раннее зажигание позволяет сохранять высокий крутящий момент.

Протекание процессов смесеобразования и последующее сгорание смеси зависят от многих факторов, в том числе и от способа подачи топлива и воздуха.

Распыление. После выхода струи топлива из распылителя карбюратора начинается ее распад. Этот способ распыления называется воздушным или пневматическим, так как для дробления топлива используется кинетическая энергия воздуха.

Для обеих систем дисперсность распыленного топлива зависит от давления, формы распылительных отверстий распылителя форсунки (инжектора) и скорости (расхода) топлива в них, а также от вязкости и поверхностного напряжения.

Процессы формирования смеси и равномерность распределения ее по цилиндрам зависят от:

- фракционного состава топлива, температуры испарения отдельных фракций топлива и антидетонатора;
- температуры топлива и воздуха, интенсивности подогрева смеси;
- времени испарения;

- относительной скорости воздуха и капель топлива, степени турбулентности потока, площади поверхности испарения.

Для улучшения распыления топлива с целью более равномерного перемешивания смеси, распределения ее по цилиндрам и улучшения процесса сгорания используются различные устройства. По способу воздействия на поток смеси они подразделяются на группы:

- подогрева воздуха, поступающего на дозирование;
- подогрева топливно-воздушной эмульсии при смешивании;
- подогрева воздуха во впускном трубопроводе;
- механического воздействия на топливно-воздушную смесь;
- обработки смеси физическими воздействиями различного рода.

Механизмы смешивания при карбюрации и централизованном впрыске имеют много общего, так как топливо в обоих случаях вводится в воздушный поток в одном и том же месте впускного тракта – перед впускным трубопроводом.

Блок управления ЕКР топливным насосом выполняет следующие функции:

- включает ЕКР на 3 с при включении зажигания;
- при запуске двигателя, с учетом температуры двигателя, включает ЕКР примерно на 5 с с максимальным напряжением создавая циркуляцию (Горячий старт);

- после запуска переходит в режим работы в соответствии с нагрузкой. На холостом ходу уровень напряжения на ЕКР примерно 8-9 В. При увеличении потребления топлива увеличивается уровень напряжения.

- при изменяющемся сигнале управления ЕКР ток потребления от 6 до 14 А.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных компонентов состоит топливная аккумуляторная система?
2. Привести признаки классификации системы питания двигателя топливом.
3. Какое назначение топливного аккумулятора?
4. Назвать основные компоненты системы подачи и впрыска топлива бензинового двигателя, которые должны быть объектом диагностирования.
5. Какие существуют ограничители подачи и расхода топлива?
6. Какие существуют способы управления форсунками?
7. По каким параметрам осуществляется управление временем открытия клапана форсунки?
8. Какие структурные параметры форсунки оказывают влияние на запаздывание времени ее срабатывания?
9. Какие особенности конструкции и управления работой форсунки необходимо учитывать при подборе форсунки?
10. Как определяется динамический диапазон работы форсунок?
11. От каких параметров смешивания зависит качество распыления топлива?
12. Привести краткую характеристику погружного бензинового насоса.
13. Как производится регулирование давления топлива в топливном аккумуляторе?
14. Как при возникновении неисправности в топливной системе можно проконтролировать исправность датчика давления?

15. Какие существуют способы смесеобразования и распыления топлива в двигателях?
16. Привести весь процесс смесеобразования топлива.
17. Представьте анализ гомогенного и послойного смесеобразования, их преимущества и недостатки.
18. Какие существуют способы распыления топлива?
19. Привести примеры использования датчиков для контроля и диагностирования аккумуляторных топливных систем.
20. Какие компоненты регуляторов давления могут быть основным объектом диагностирования?
21. Какие основные компоненты топливных насосов могут быть объектом диагностирования?

1.8. Топливные насосы и регуляторы давления топлива дизельных двигателей

Требования к топливным насосам. Все более ужесточающиеся нормы выброса вредных веществ, ограничения по шумности двигателей и необходимость повышения топливной экономичности предъявляют повышенные требования к топливным системам дизелей. В зависимости от особенностей процесса сгорания в цилиндрах дизелей (предкамерные дизели или с непосредственным впрыском топлива) для того, чтобы обеспечить нужное образование топливовоздушной смеси, топливная система должна давать возможность впрыска топлива в цилиндры под давлением в диапазоне 350-1700 бар при точном дозировании топливоподачи. При этом должно быть предусмотрено регулирование дизеля в зависимости от нагрузки и частоты вращения без дросселирования расхода воздуха. То есть устойчивая работа дизеля на режимах холостого хода должна обеспечиваться системой автоматического регулирования с обратной связью.

В большинстве серийных дизелей грузовых автомобилей, тепловозов и судов пока еще имеют систему автоматического регулирования с механическими регуляторами частоты вращения с центробежными грузами. С другой стороны, быстроходные дизели легковых автомобилей требуют установки топливной системы, имеющей небольшую массу, минимальный занимаемый объем и максимально возможную точность регулирования. В двигателях современных легковых автомобилей и некоторых грузовых автомобилей механические регуляторы все больше вытесняются системами электронного управления (EDC).

Процессы сгорания в дизеле в решающей мере зависят от того, в каком количестве и каким образом нагнетается топливо, с какой степенью оно сжимается, а также как подводится в камеру сгорания. Здесь важнейшими критериями являются:

- момент начала и продолжительность впрыскивания;
- распределение топлива в камере сгорания;
- момент начала воспламенения;
- зависимость количества впрыскиваемого топлива от угла поворота коленчатого вала;

- соответствие общего количества впрыскиваемого топлива нагрузке на двигатель.

Технические характеристики топливных систем дизелей представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Топливные системы дизелей: характеристики и свойства

Тип топливной системы	Характеристики топливной системы				Характеристики двигателя			
	Цикловая порция топлива см ³	Максимальное давление впрыска бар	Тип регулятора частоты вращения/ системы регулирования ¹⁾	Тип камеры сгорания ²⁾	Двухфазный впрыск	Число цилиндров	Максимальная частота вращения мин ⁻¹	Максимальная цилиндровая мощность кВт/цил
Рядные ТНВД								
М	0,06	550	m, e	IDI	-	4-6	5000	20
А	0,12	750	m	DI/IDI	-	2-12	2800	27
MW	0,15	1100	m	DI	-	4-8	2600	36
P 300	0,25	950	m, e	DI	-	4-12	2600	45
P 7100	0,25	1200	m, e	DI	-	4-12	2500	55
P 8000	0,25	1300	m, e	DI	-	6-12	2500	55
P 8500	0,25	1300	m, e	DI	-	4-12	2500	55
H 1	0,24	1300	e	DI	-	6-8	2400	55
H 1000	0,25	1350	e	DI	-	5-8	2200	70
ТНВД распределительного типа с аксиальным плунжером								
VE	0,12	1200/350	m	DI/IDI	-	4-6	4500	25
VE...EDC ³⁾	0,07	1200/350	e, em	DI/IDI	-	3-6	4200	25
VE...MV	0,07	1400/350	e, MV	DI/IDI	-	3-6	4500	25
Роторные ТНВД								
VR...MV	0,135	1700	e, MV	DI	-	4-6	4500	37
Индивидуальные ТНВД								
PF(R)...	0,15-18,0	800-1500	m, em	DI/IDI	-		300-2000	75-1000
UI 30 ⁴⁾	0,16	1600	e, MV	DI	VE	8 ^{5a)}	3000	45
UI 31 ⁴⁾	0,3	1600	e, MV	DI	VE	8 ^{5a)}	3000	75
UI 32 ⁴⁾	0,4	1800	e, MV	DI	VE	8 ^{5a)}	3000	80
UI P1 ⁵⁾	0,062	2000	e, MV	DI	VE	6 ^{5a)}	5000	25
UP 12 ⁶⁾	0,1	1600	e, MV	DI	VE	8	4000	35
UP 20 ⁶⁾	0,15	1800	e, MV	DI	VE	8	4000	70
UP(PF[R])	3,0	1400	e, MV	DI	-	6-20	1500	500

Тип топливной системы	Характеристики топливной системы				Характеристики двигателя			
	Цикловая порция топлива см ³	Максимальное давление впрыска бар	Тип регулятора частоты вращения/ системы регулирования ¹⁾	Тип камеры сгорания ²⁾	Двухфазный впрыск	Число цилиндров	Максимальная частота вращения мин ⁻¹	Максимальная цилиндровая мощность кВт/цил
Аккумуляторная система Common Rail								
CR ⁷⁾	0,1	1350	e, MV	DI	VE ^{7a)} /NE	3-8	5000 ^{7b)}	30
CR ⁸⁾	0,4	1400	e, MV	DI	VE ^{8a)} /NE	6-16	2800	200

Примечание.

¹⁾: m – механический; e – электронный; em – электромеханический; MV – с электромагнитным клапаном; ²⁾: IDI – впрыск топлива в предкамеру; DI – непосредственный впрыск топлива; ³⁾: EDC – система электронного управления дизеля; ⁴⁾: UI – насос-форсунки для грузовых автомобилей; ⁵⁾: UI – насос-форсунки для легковых автомобилей; ^{5a)}: возможная установка двух ЭБУ на многоцилиндровые двигатели; ⁶⁾: UP – индивидуальные ТНВД для грузовых автомобилей; ^{7a)}: регулируемый впрыск топлива до 90° поворота коленчатого вала (п.к.в.) до ВМТ; ^{7b)}: до 5500 мин⁻¹ (максимально допустимая частота вращения); ⁸⁾: CR – для грузовых автомобилей, автобусов и тепловозов; ^{8a)}: угол опережения впрыска до 30° п.к.в. до ВМТ.

Типы насосов. Современные электронные системы управления дизельным впрыском топлива легковых автомобилей показаны на рис. 1.52, а технические характеристики топливных насосов – на рис. 1.53.

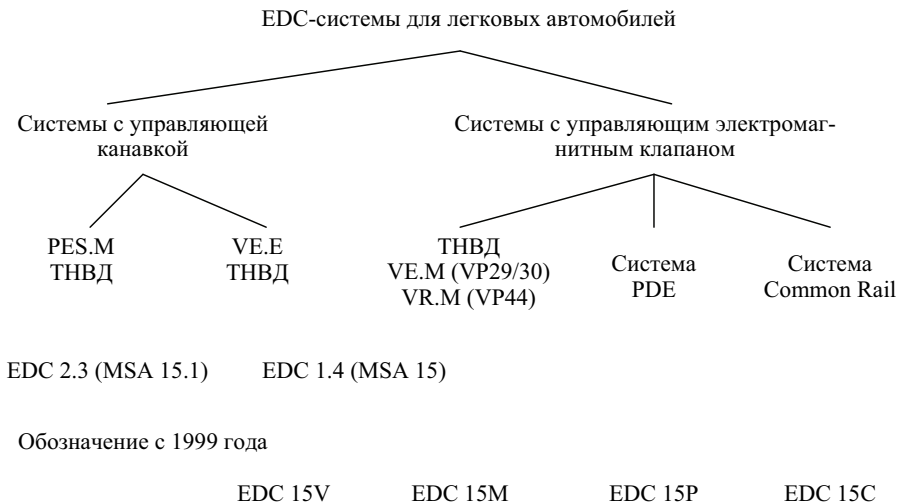


Рис. 1.52. Топливные системы управления дизельным впрыском топлива

На рис. 1.52 обозначены: PES.M – рядный с электромагнитным клапаном; VE.E – распределительный с электронным управлением; VE-M и VR-M – насосы с электрическим клапаном; PDE – насос-форсунки для легковых автомобилей; CR – Common Rail; P – рядный насос; C – Common Rail; M – с электромагнитным клапаном.

Название	ТНВД VE Распределительный	Рядный ТНВД PES.M	ТНВД VR-M, VE-M	UIS PDE насос-форсунка	Common Rail
Максимальное давление впрыска, бар	до 900	до 700	до 1800	до 2200	до 1600
Применение	VP 15 Audi, BMW, PSA VP36/37 VAG, PSA, BMW, Fiat	Mercedes Benz	Opel, BMW, Audi, Ford	VW	Alfa, Audi, BMW, PSA, MB, Rover, Fiat,...
Мощность на цилиндр, кВт	до 25	до 15	до 50	до 30	до 30
VP 15	В качестве датчика обратной связи – потенциометр				
VP 36/37	В качестве датчика обратной связи – датчик HDK, 36-IDI, 37-IDI				
VP 29/30	Регулировка подачи – электромагнитным клапаном, дополнительный блок управления ТНВД, 29-IDI, 30-DI				
VP 44	Регулировка подачи – электромагнитным клапаном, дополнительный блок управления ТНВД, CAN-шина				
M	Регулирование подачи топлива				
MS	Регулирование подачи топлива и начала впрыска				
MSA	Регулирование подачи, начала впрыска, управление системой рециркуляции выхлопа				

Рис. 1.53. Топливные насосы систем впрыска топлива

Дизельные топливные системы фирмы Bosch имеют следующие обозначения: M, MW, A, P, ZWM, CW – многоплунжерные рядные ТНВД, обозначенные по мере увеличения размеров; PF – одноплунжерные ТНВД; VE – ТНВД распределительного типа с аксиальным плунжером; VR – роторные ТНВД распределительного типа; UPS – система с индивидуальными ТНВД; UIS – система с насос-форсунками; CR – система Common Rail.

1.8.1. Системы впрыска с рядным ТНВД

Рядные ТНВД с электромагнитным управлением относятся к оснащению самых первых дизельных двигателей, которые снабжались механическим регулятором частоты вращения коленчатого вала и момента впрыскивания топлива. Рядные ТНВД – это «классика» техники впрыскивания дизельного топлива. Эти ТНВД постоянно совершенствовались и приспособлялись к соответствующим областям применения, поэтому их много-

численные варианты используют и сегодня. Особые преимущества рядных ТНВД – надежность и удобство обслуживания.

Все рядные многоплунжерные ТНВД имеют отдельную плунжерную пару для каждого цилиндра. Этот термин включает в себя втулку и плунжер, который при активном ходе, то есть для подачи топлива, перемещается под воздействием кулачкового вала ТНВД с приводом от коленчатого вала двигателя, а возвращается под действием возвратной пружины.

В рядном ТНВД с дозирующей муфтой регулирование цикловой подачи осуществляется перемещением муфты вверх/вниз вдоль плунжера. Положение дозирующей муфты, определяющей активный ход плунжера, то есть момент открытия перепускного отверстия, регулируется валом привода.

Положение дозирующей муфты является функцией различных переменных. По сравнению с рядными ТНВД РЕ: вариант с дозирующей муфтой позволяет получить дополнительную степень свободы.

В ТНВД типа РЕ начало подачи определяется входным отверстием, которое закрыто верхней кромкой плунжера. Величина подачи ограничивается перепускным отверстием, которое открывается спиральной отсечной кромкой, выполненной в плунжере фрезерованием. Положение рейки ТНВД устанавливается механическим регулятором (с центробежными грузами) или регулятором с электромагнитным клапаном (EDC).

Топливоподкачивающий насос должен при всех условиях эксплуатации снабжать ТНВД достаточным количеством дизельного топлива. Кроме того, он имеет избыточную производительность для охлаждения ТНВД, причем топливо воспринимает тепло и поступает обратно в бак через перепускной клапан. Используются также электрические подкачивающие насосы и модели для многотопливных двигателей. В некоторых редких случаях рядный ТНВД может снабжаться топливом без подкачивающего насоса в режиме подачи топлива из бака самотеком, то есть под действием разницы уровней горючего.

Конструкция рядного ТНВД имеет плунжерные пары 4-1 по числу цилиндров (рис. 1.54) [4].

Во время работы плунжер 4 смещается в направлении подачи, приводимым от двигателя кулачковым валом. Возвратная пружина 5 приводит плунжер в исходное положение. Отдельные секции ТНВД расположены в ряд – отсюда и название «рядный». Избыточное давление созданное внутри плунжерной пары открывает механическую форсунку и происходит впрыск топлива в камеру сгорания. Величина активного хода плунжера изменяется его поворотом вокруг собственной оси с помощью рейки ТНВД, что позволяет регулировать величину цикловой подачи топлива. Рейка управляется механическим центробежным регулятором, а в более продвинутых системах – электроприводом.

Разновидностью ТНВД этого типа являются рядные ТНВД с дополнительными втулками 8 (рис. 1.55) [4]. Изменяя положение втулки с помощью исполнительного механизма, регулируют момент начала впрыска, независимо от частоты вращения коленчатого вала.

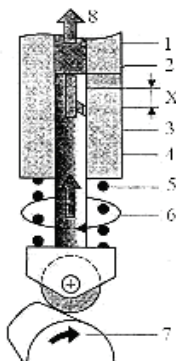


Рис. 1.54. Система впрыска с рядным ТНВД:

1 – гильза плунжера; 2 – впускное окно; 3 – регулирующая кромка плунжера; 4 – плунжер; 5 – возвратная пружина плунжера; 6 – поворот плунжера регулирующей рейкой; 7 – кулачковый вал; 8 – подача топлива к форсунке; X – активный ход плунжера

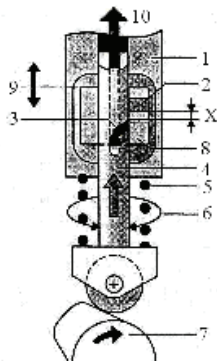


Рис. 1.55. Система впрыска с рядным ТНВД с дополнительной втулкой:

1 – гильза плунжера; 2 – впускное окно; 3 – регулирующая кромка плунжера; 4 – плунжер; 5 – возвратная пружина плунжера; 6 – поворот плунжера регулирующей рейкой; 7 – кулачковый вал; 8 – дополнительная втулка; 9 – изменение хода плунжера за счет регулирующей втулки; 10 – подача топлива к форсунке; X – активный ход плунжера

1.8.2. Системы впрыска с распределительным ТНВД

Процессы сгорания в дизельном двигателе зависят в решающей мере от того, как подготовлено топливо системой впрыска. Существенную роль при этом играет ТНВД, создающий давление топлива, под которым оно нагнетается через магистрали высокого давления к форсункам и впрыскивается ими в камеры сгорания. Для малоразмерных быстроходных дизелей требуются системы впрыска с высокой мощностью, большой цикличностью, малым весом и минимальными конструктивными размерами. Этим требованиям отвечают так называемые распределительные ТНВД, которые при компактном размере объединяют в себе топливоподкачивающий насос, ТНВД и регулятор частоты вращения коленчатого вала.

ТНВД распределительного типа могут иметь механический регулятор частоты вращения или электронную систему управления со встроенным автоматом опережения впрыска. ТНВД распределительного типа имеют только одну плунжерную пару для всех цилиндров двигателя.

История развития ТНВД показана на рис. 1.56 [2].

Распределительные ТНВД различаются по способу регулирования, методу управления цикловой подачей и развиваемому ими максимальному давлению (рис. 1.57).

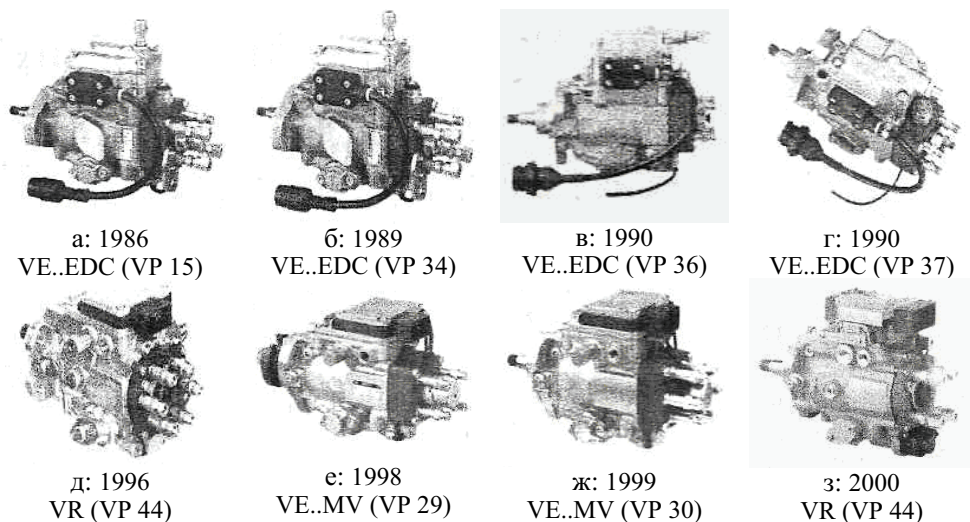


Рис. 1.56. Распределительные ТНВД с электронным управлением:

а, в, е – дизели с разделенными камерами сгорания; б, г, д, ж, з – дизели с непосредственным впрыском топлива (з – со встроенным блоком управления работой дизеля PSG 16)

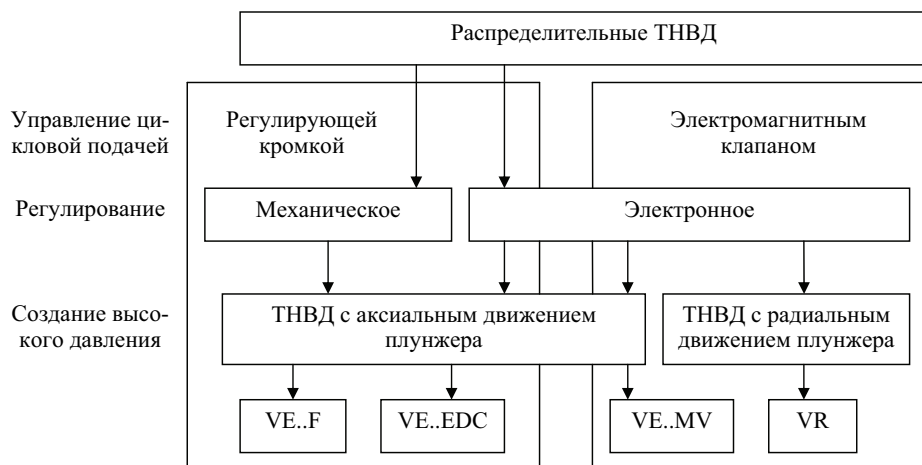


Рис. 1.57. Виды распределительных ТНВД

На рис. 1.58 приведен механический распределительный ТНВД модели VE с шиберным подкачивающим насосом.

Распределительные ТНВД с управлением регулирующей кромкой работают по принципу аксиального движения плунжера, причем все цилиндры двигателя обслуживает только один элемент высокого давления. Регулирующие кромки, отверстия и втулка регулируют величину цикловой подачи. Гидравлическое устройство управляет моментом начала впрыскивания. Регулирование осуществляется при помощи механической системы или

электромагнитного исполнительного механизма. Эти типы ТНВД отличаются простотой обслуживания, малым весом и размерами.

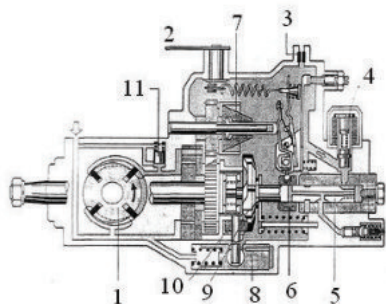


Рис. 1.58. Распределительный ТНВД модели VE:

1 – шиберный подкачивающий насос; 2 – рычаг подачи топлива; 3 – перепускной дроссель; 4 – ELAB – электронное отключение подачи топлива; 5 – распределительный плунжер; 6 – золотник; 7 - центробежный регулятор; 8 – поршень механизма опережения впрыска; 9 – кулачковая шайба; 10 – роликовая обойма; 11 – клапан регулятора давления

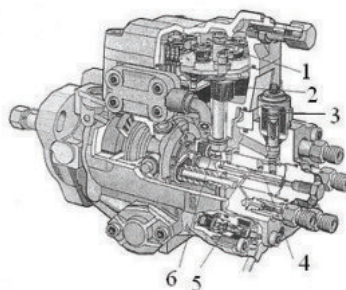


Рис. 1.59. Распределительный ТНВД модели VE с индуктивным датчиком HDK:

1 – датчик Холла дозатора; 2 – электромагнит регулировки подачи топлива; 3 – ELAB – электронное отключение подачи топлива; 4 – плунжер; 5 – электромагнит регулятора впрыска; 6 – дозатор

ТНВД этой конструкции обозначается как модель VE. С созданием в 1986 году модели EP/VA с электромагнитным исполнительным механизмом (рис. 1.59) диапазон мощностей модели VE значительно расширился. ТНВД обеспечивает необходимое давление впрыскивания топлива. Топливо нагнетается через магистраль высокого давления к форсунке, которая впрыскивает его в камеру сгорания. Распределительные ТНВД с управлением регулирующей кромкой используются для малых быстроходных дизелей как с непосредственным впрыском топлива, так и с разделенными камерами сгорания.

Постоянно сужающиеся границы допустимого уровня эмиссии ОГ для дизелей и требования дальнейшего снижения расхода топлива приводит к совершенствованию распределительных ТНВД с электронным управлением. Управление высоким давлением с помощью электромагнитного клапана подразумевает более высокую точность определения моментов начала и окончания подачи топлива, а также более высокую точность его дозирования, чем при управлении регулирующей кромкой. Кроме того, становятся возможными осуществление предварительного впрыскивания и коррективка равномерности величин цикловых подач по цилиндрам.

Существенным отличием от распределительных ТНВД с управлением регулирующей кромкой в этом случае являются:

- управление высоким давлением с помощью электромагнитного клапана;
- расположение на ТНВД прибора регулирования;

- управление работой электромагнитного клапана высокого давления по принципу «угол-время» с помощью встроенного в ТНВД датчика угла поворота приводного вала ТНВД.

Распределительные ТНВД с электронным регулированием. Электронное регулирование работы дизеля по сравнению с механическим предусматривает дополнительные возможности. Благодаря электрическим измерениям оно позволяет осуществить гибкую электронную обработку сигналов и создание контура регулирования с электрическими исполнительными механизмами. Дополнительно может учитываться ряд специальных параметров, что невозможно при механическом регулировании.

Принципиально различаются два типа распределительных ТНВД;

- с аксиальным движением плунжера (серии VE.MV или VP 30), рис. 1.59, где HDK – индуктивный датчик с дифференциальными кольцами;
- с радиальным движением плунжеров (серии VR или VP 44), рис. 1.60.

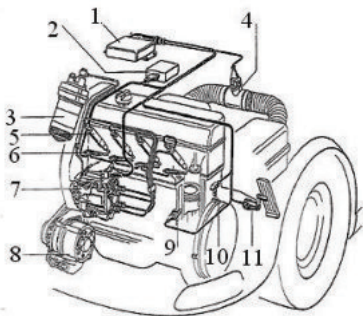


Рис. 1.60. Система впрыска на базе распределительного ТНВД с радиальным движением плунжеров и электромагнитным клапаном. Блоки управления двигателем и ТНВД разделены

Имеющиеся модификации различаются по области применения, числу цилиндров двигателя, конструкции привода и т. д.

Гидравлические характеристики первого типа ТНВД разнообразны и подходят как для двигателей с разделенными камерами, так и для моторов с непосредственным впрыском топлива с давлением в форсунки порядка 1400 бар.

В ТНВД распределительного типа с аксиальным расположением плунжера топливо в корпус ТНВД подается лопастным топливным насосом низкого давления. Высокое давление и распределение топлива по цилиндрам обеспечиваются центральным плунжером. За один оборот вала привода плунжер совершает число рабочих ходов, равное числу цилиндров двигателя. Поступательно-вращательное движение передается плунжеру торцевыми кулачками на кулачковой шайбе, которые набегают на ролики, закрепленные на роликовом кольце при вращении вала привода.

Активный ход плунжера и, соответственно, количество подаваемого топлива в серийных ТНВД VE с механическими регуляторами частоты

На рис. 1.60 приняты следующие обозначения: 1 – блок управления двигателем; 2 – блок управления временем включения свечей накаливания; 3 – топливный фильтр; 4 – датчик массового расхода воздуха; 5 – форсунка; 6 – штифтовая свеча накаливания; 7 – распределительный ТНВД с радиальными плунжерами VP 44 и блок управления PSG 5; 8 – генератор; 9 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 10 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 11 – датчик хода педали акселератора.

вращения осуществляется дозирующей муфтой, как и в ТНВД с электромагнитным приводом дозирующей муфты. Начало подачи топлива регулируется автоматом опережения впрыска путем соответствующего поворота кольца с роликами. В ТНВД с электронным управлением величину топливоподачи вместо дозирующей муфты регулирует клапан с быстродействующим электромагнитным приводом. Управляющие сигналы с обратной связью и без обратной связи обрабатываются в двух ЭБУ (ЭБУ двигателя и ЭБУ ТНВД). Быстродействие контролируется соответствующими электронными устройствами.

В роторных ТНВД топливо в корпус насоса подается лопастным топливным насосом низкого давления. Насос высокого давления с кулачковым кольцом и двумя или четырьмя радиально расположенными плунжерами обеспечивает формирование высокого давления и распределение топлива по форсункам, количество которого измеряется электромагнитным клапаном высокого давления. Автомат опережения впрыска регулирует начало подачи, поворачивая кулачковое кольцо в нужном направлении. Как и в ТНВД с аксиальным плунжером и с электромагнитным управлением дозирующего клапана, все сигналы с обратной и без обратной связи обрабатываются в двух ЭБУ, при этом быстродействие также контролируется соответствующими электронными устройствами.

Насос в системе распределительного впрыска имеет единый нагнетательный элемент для всех цилиндров. Топливоподкачивающий насос нагнетает топливо в камеру высокого давления 6. Высокое давление создается с помощью аксиального плунжера 4 (рис. 1.61 – аксиальный ТНВД) или нескольких радиальных плунжеров 4 (рис. 1.62 – радиальный ТНВД). Враща-

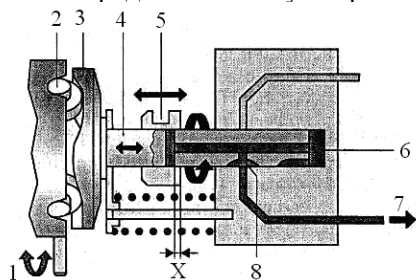


Рис. 1.61. Система впрыска с распределительным аксиальным ТНВД:

1 – траектория поворота роликового кольца; 2 – ролик; 3 – кулачковая шайба; 4 – аксиальный плунжер-распределитель; 5 – регулирующая втулка; 6 – камера высокого давления; 7 – подача топлива к форсункам; 8 – распределительный паз; X – активный ход плунжера

ющийся центральный плунжер-распределитель направляет топливо через распределительный паз 8 к форсункам. В аксиальном ТНВД величину цик-

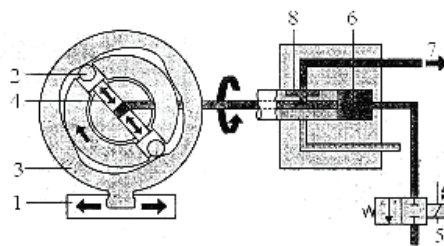
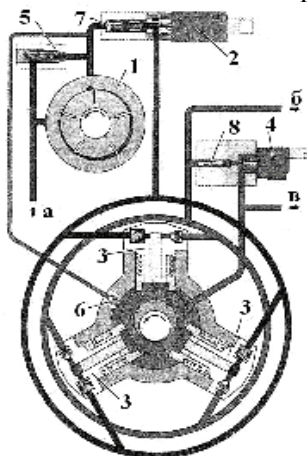


Рис. 1.62. Система впрыска с распределительным радиальным ТНВД:

1 – регулировка момента впрыска поворотом кулачковой шайбы; 2 – ролик; 3 – кулачковая шайба; 4 – радиальный плунжер; 5 – электромагнитный клапан высокого давления; 6 – камера высокого давления; 7 – подача топлива к форсункам; 8 – распределительный паз

ловой подачи определяет положение регулирующей втулки 5, момент начала впрыска устанавливается поворотом роликового кольца на необходимый угол (рис. 1.61). В радиальном ТНВД регулировка момента начала впрыска устанавливается поворотом кулачковой шайбы на необходимый угол. Кроме того, эта регулировка и управление величиной цикловой подачи топлива осуществляется электромагнитным клапаном 5 (рис. 1.62).

В систему впрыска фирмы Siemens (рис. 1.63) топливо поступает под давлением, создаваемым лопастным топливоподкачивающим насосом, который засасывает его через фильтр из топливного бака и подает к насосу высокого давления. Давление подкачки регулируется редукционным клапаном на уровне 4 бар. Насос высокого давления содержит три плунжера. Они расположены радиально и приводятся от эксцентрика через общий толкатель. Эксцентрик и толкатель смазываются топливом, которое прокачивается через внутреннюю полость насоса и используется одновременно для его охлаждения. Расход топлива регулируется специальным клапаном.



На рис. 1.63 приняты следующие обозначения: 1 – лопастной топливоподающий насос; 2 – электромагнитный клапан, дросселирующий поток топлива на впуске насоса высокого давления; 3 – плунжерная пара; 4 – клапан, ограничивающий давление в аккумуляторе; 5 – редукционный клапан в контуре низкого давления; 6 – клапан, дозирующий прокачку топлива; 7, 8 – фильтры; а – подвод топлива; б – подача топлива под высоким давлением; в – слив топлива.

Рис. 1.63. Топливоподающая система

Плунжеры подают топливо в аккумулятор, давление в котором измеряется датчиком, подключенным к блоку управления двигателем. Оно регулируется посредством двух электромагнитных клапанов. Один из них выполняет функции ограничителя предельного давления и содержит нагруженный пружиной шарик, который в обесточенном состоянии способен удерживать давление не более 50 бар. При работе двигателя обмотка электромагнитного клапана получает питание от электронного блока управления в виде импульсов тока, продолжительность которых зависит от режима работы двигателя. Действующее на шарик усилие изменяется при этом в широком диапазоне: при пуске двигателя клапан регулируется на давление 150 бар, а при работе на полной мощности он способен удерживать давление до 1500 бар. Активное действие клапана используется практически только для ускорения сброса давления в аккумуляторе при переходе двигателя с режима полной нагрузки на холостой ход или при его остановке.

Рабочее давление в аккумуляторе регулируется на всех режимах посредством клапана, ограничивающего подвод топлива к насосу высокого давления до уровня, при котором поддерживается требуемое значение на линии его нагнетания. В обесточенном состоянии этот клапан закрыт. При подаче на обмотку электромагнита напряжения он открывается по мере увеличения продолжительности импульсов, изменяемой блоком управления.

Топливные насосы фирмы Delphi имеют встроенный топливopодкачивающий насос для создания низкого давления. Управление подачей – дроселированием на впуске. Плунжеры секций высокого давления движутся навстречу друг другу и приводятся с мощностью кулачкового кольца специального профиля подобно радиальным ТНВД распределительного типа. Создаваемое давление 160-180 МПа. В отличие от насосов Bosch насосы Delphi всегда имеют разделенную клапанную группу и четное число плунжеров. Топливные насосы Nippon Denso изготавливаются одно- и двухсекционные, соответственно с двумя и четырьмя плунжерами, причем двухплунжерные насосы сконструированы аналогично ТНВД Bosch третьего поколения с эксцентриковым приводным валом. Основным отличием ТНВД Denso от Bosch и Delphi является применение синхронно срабатывающих электроклапанов управления. То есть, если в насосах Bosch и Delphi клапаны для регулирования давления или наполнения надплунжерной полости изменяют проходное сечение при определенной скважности сигнала управления и не привязаны к моменту нагнетания топлива плунжерной парой, то у насосов Denso электроклапан открывается синхронно с моментом наполнения надплунжерной полости при движении плунжера вниз. Производительность насоса регулируется временем открытого состояния электроклапана и, соответственно, количеством топлива, которое за этот промежуток времени успело заполнить надплунжерную секцию. Насос развивает давления до 180 МПа.

Для ТНВД аккумуляторной системы топливopодачи к одинаковым с традиционной топливной аппаратурой неисправностям можно отнести следующие:

- износ плунжерной пары;
- поломка пружины плунжера;
- заклинивание плунжера.

К неисправностям, присущим только аккумуляторным системам относятся:

- неисправность клапана низкого давления;
- неисправность клапана высокого давления;
- неисправность обратного клапана сброса топлива в линию низкого давления.

Регуляторы управления подачей топлива. Двухплунжерные насосы (HPD Continental – Siemens) по сигналу блока управления MED позволяют топливу поступать ко второму поршню насоса, в то время как первый поршень создает давление в топливном аккумуляторе. На клапан управления подачей топлива не подается управляющий сигнал, в результате чего происходит снижение давления в магистрали высокого давления. При превы-

шении уровня высокого давления в 140 бар для ограничения давления в топливной рампе открывается предохранительный клапан и топливо сбрасывается в магистраль низкого давления.

При неисправном регуляторе подачи топлива и если по другим причинам невозможно создать высокое давление, срабатывает клапан низкого давления и топливо с низкой стороны под давлением, создаваемым ЕКР, попадает в топливный аккумулятор.

1.8.3. Система впрыска с индивидуальным ТНВД

Особенностью этой системы является отсутствие (или минимальная длина в системе UPS (Unit Pump System)) магистрали высокого давления, что позволяет достигать давления впрыска до 2050-2200 бар и улучшить протекание процесса впрыска. Имеются две конструкции, построенные по этой системе:

1. Система впрыска UIS (Unit Injector System). В ней насос и форсунка объединены в один агрегат (рис. 1.14, а). Привод насос-форсунки осуществляется от кулачка распределительного вала. Регулировка параметров впрыска происходит с помощью электромагнитного клапана высокого давления 3. Устанавливаются насос-форсунки в головке блока цилиндров, отдельно для каждого цилиндра, и приводятся в действие или непосредственно кулачком, или от распределительного вала через толкатель клапана.

По сравнению с рядными насосами и ТНВД распределительного типа из-за отсутствия трубопроводов линии высокого давления насос-форсунки позволяют получить значительно более высокое давление впрыска (до 2200 бар). Столь высокие значения давления впрыска вместе с электронной системой управления, включающей в себя заложенные в память компьютера программируемые матрицы характеристик, в том числе данные по продолжительности процесса впрыска (величины цикловой подачи) означает возможность значительного снижения эмиссии вредных веществ с ОГ при улучшении формы кривой характеристики подачи топлива.

Использование электронного управления позволяет включить дополнительные функции и увеличить число достоинств насос-форсунок,

2. Система впрыска UPS (Unit Pump System). Принципиально она не отличается от системы UIS, только насос и форсунка не объединены в один агрегат, их соединяет короткая магистраль (рис. 1.14, б). Такая конструкция облегчает монтаж системы на двигатель и, соответственно, упрощает обслуживание и ремонт системы.

Принцип работы топливной системы с индивидуальным ТНВД аналогичен работе системы с насос-форсунками. Это подобная топливная система, обеспечивающая высокое давление впрыска. Как и насос-форсунки индивидуальные ТНВД устанавливаются на каждый цилиндр двигателя, а соединение с форсункой осуществляется короткой трубкой высокого давления, точно подобранной к элементам топливной системы. Привод индивидуальных ТНВД осуществляется от распределительного вала двигателя.

Управление продолжительностью и началом процесса впрыска в топливной системе с индивидуальными ТНВД осуществляется системой электронного управления. Использование в электронной системе управления быстродействующих электромагнитных клапанов с триггерными схемами позволяет устанавливать оптимальную характеристику впрыска.

Назначение и принцип действия индивидуальных ТНВД для грузовых автомобилей и тяжелых транспортных двигателей в основном те же, что и для насос-форсунок. Единственным серьезным отличием является то, что в данном случае собственно форсунку и ТНВД с электромагнитным клапаном связывает короткая магистраль высокого давления (3, рис. 1.14, 1.64) [2].

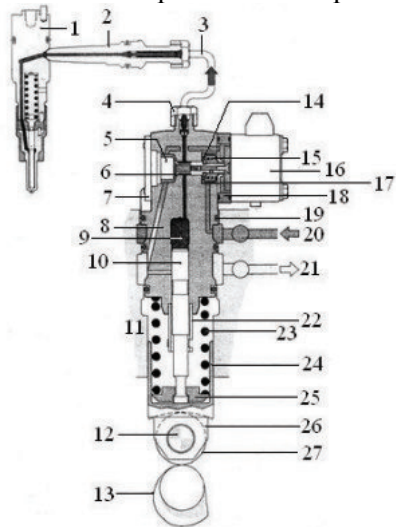


Рис. 1.64. Конструкция индивидуального ТНВД с электромагнитным клапаном для грузового автомобиля

1 – ступенчатый корпус форсунки; 2 – штуцер магистрали высокого давления; 3 – магистраль высокого давления; 4 – накидная гайка ТНВД; 5 – ограничитель хода иглы электромагнитного клапана; 6 – игла электромагнитного клапана; 7 – пластина; 8 – корпус ТНВД; 9 – камера высокого давления (в плунжерной паре); 10 – плунжер; 11 – блок цилиндров дизеля; 12 – ось роликового толкателя; 13 – кулачок; 14 – тарелка пружины; 15 – пружина клапана; 16 – корпус клапана с катушкой и магнитным сердечником; 17 – пластина якоря; 18 – прокладка; 19 – уплотнение; 20 – канал подвода топлива (низкое давление); 21 – канал обратного слива топлива; 22 – ловушка для возврата просачивающегося вокруг плунжера топлива; 23 – пружина толкателя; 24 – стакан толкателя; 25 – тарелка пружины; 26 – роликовый толкатель; 27 – ролик толкателя.

Модульная конструкция индивидуального ТНВД с боковой установкой на двигателе имеет следующие преимущества:

- не требуется изменения конструкции головки блока цилиндров;
- непосредственный привод от распределительного вала, поскольку коромысла отсутствуют;
- облегченный доступ при обслуживании, поскольку ТНВД легко демонтируются.

Индивидуальные ТНВД с электромагнитным клапаном (обозначаемые индексом PF..MV) применяются на тяжелых дизелях для тепловозов и судов. Максимально допустимая частота вращения коленчатого вала этих двигателей составляет 1000 мин^{-1} при цилиндровой мощности 150-450 кВт. Серия PE имеет механические регуляторы, рейку и регулирующую втулку. В последних моделях индивидуальных ТНВД эти громоздкие детали заме-

няет электрический провод, соединяющий блок управления с электромагнитными клапанами ТНВД. Преимуществами такой системы являются:

- минимальные размеры;
- большие возможности компоновки при хорошей совместимости с традиционными головками блока цилиндров;
- очень жесткий и компактный привод;
- малый расход материалов и комплектующих;
- быстрая установка и возможность точного регулирования;
- простота замены в случае ремонта и обслуживания;
- точное дозирование топлива с возможностью индивидуальной регулировки момента начала и величины подачи по цилиндрам;
- возможность отключения отдельных ТНВД для обеспечения у оставшихся цилиндров оптимальных параметров работы при частичных нагрузках на двигатель.

1.8.4. Аккумуляторные топливные системы Common Rail

В аккумуляторной топливной системе Common Rail процессы создания высокого давления и впрыска разделены. Давление впрыска создается независимо от частоты вращения коленчатого вала двигателя и количества впрыскиваемого топлива, оно сохраняется в топливном аккумуляторе, и система, таким образом, всегда готова к совершению процесса впрыска. Начало подачи (угол опережения впрыска) и количество впрыскиваемого топлива (цикловая подача) рассчитываются в электронном блоке управления и через форсунку реализуются в каждом цилиндре посредством подачи пускового сигнала на электромагнитный клапан. Такое сочетание форсунки и постоянно готового к действию аккумулятора также позволяет устанавливать оптимальную характеристику впрыска.

Топливные насосы высокого давления. Для создания высокого давления используются плунжерные насосы. Топливные насосы фирмы Bosch первого поколения существуют в трех основных разновидностях, при этом принцип создания давления и уровень развиваемого давления примерно одинаков для всех трех разновидностей.

Первый вариант – ТНВД звездообразного типа с тремя плунжерами, приводимыми в действие с помощью вала с эксцентриком через промежуточный толкающий элемент (СР1К3). Каждая плунжерная пара закрыта сверху клапанной группой с клапанами шарикового и тарельчатого типа. Линии высокого давления от каждой группы объединены в корпусе насоса и имеют общий выходной штуцер. Отличительной особенностью второго варианта является наличие электромагнита, позволяющего отключать одну из плунжерных пар путем постоянного открытия впускного клапана. Третий вариант (СР1S3) имеет в корпусе регулятор давления топлива, в отличие от первого и второго вариантов, в которых регулятор давления расположен в топливном аккумуляторе. Давление, развиваемое такими насосами, составляет примерно 120 МПа. [8]

Схематически топливный насос высокого давления показан на рис. 1.65.

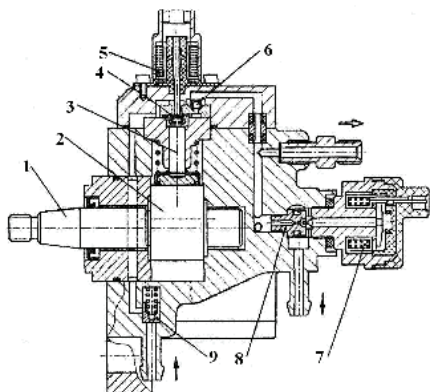


Рис. 1.65. Топливный насос высокого давления Bosch CP1S3:

1 – приводной вал; 2 – эксцентрик; 3 – плунжер; 4 – клапан низкого давления; 5 – электромагнит отключения плунжерной пары; 6 – клапан высокого давления; 7 – регулятор давления; 8 – седло клапана регулятора давления; 9 – противодренажный клапан

клапанами.

В отличие от ТНВД первого и второго поколений в третьем поколении применяется дросселирование линии низкого давления топлива, и подача насоса регулируется в зависимости от наполнения надплунжерной полости. Давление составляет 160-180 МПа. В ТНВД четвертого поколения CP4 вновь используется объединенная клапанная группа, и отсутствуют каналы высокого давления внутри корпуса насоса. Эти насосы создают давление 180-200 МПа.

Разделение в аккумуляторной системе впрыска Common Rail (рис. 1.66) процессов создания высокого давления и управления впрыском обеспечивает широчайшие возможности по изменению давления и момента впрыска топлива. Организованный таким образом рабочий процесс позволяет создать важнейшие предпосылки для повышения удельной мощности, снижения расхода топлива, снижения уровня шума и токсичности отработавших газов. Давление впрыска создается и регулируется в автономном ТНВД 1 независимо от частоты вращения двигателя и величины цикловой подачи топлива. Оно сохраняется в аккумуляторе давления 2. Каждый цилиндр имеет электромагнитную форсунку впрыска с клапаном высокого давления. Регулирование впрыска осуществляется электронным блоком управления. Конструктивно электронная система управления двигателем (ЭСУД) Common Rail включает следующие компоненты (см. рис. 1.66, 1.67) [4]:

Насосы второго поколения могут быть конструктивно выполнены аналогично насосам первого поколения, но при этом развивать давление в 150-160 МПа. Насосы третьего поколения CP3/S3, как правило, состоят из нескольких модулей: корпус низкого давления, секция высокого давления, подкачивающий шестеренный насос. Некоторые насосы третьего поколения не имеют встроенного подкачивающего насоса шестеренчатого типа и используют подкачку от механического насоса подкачки на двигателе или насоса с электроприводом, расположенного в баке. Часть насосов имеет встроенный датчик температуры топлива. Отличием насосов третьего поколения является применение разделенных клапанных групп с грибковыми и шариковыми

1. Контур низкого давления с соответствующими агрегатами подачи топлива.

2. Контур высокого давления, включающий ТНВД, аккумулятор высокого давления, магистрали высокого давления и электрогидравлические форсунки.

3. ЭСУД с необходимыми датчиками и исполнительными механизмами.

4. Системы впуска воздуха и выпуска отработавших газов.

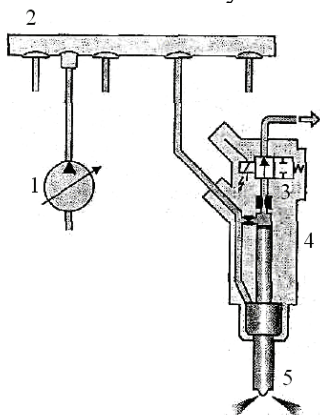


Рис. 1.66. Система впрыска Common Rail:

1 – автономный ТНВД; 2 – аккумулятор высокого давления; 3 – электромагнитный клапан высокого давления; 4 – форсунка; 5 – распылитель форсунки

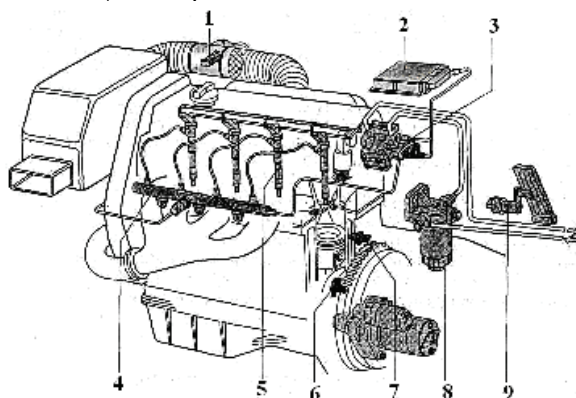


Рис. 1.67. Структурная схема системы впрыска Common Rail:

1 – датчик массового расхода воздуха; 2 – блок управления впрыском; 3 – ТНВД; 4 – аккумулятор высокого давления; 5 – форсунки; 6 – датчик положения коленвала; 7 – датчик температуры; 8 – топливный фильтр; 9 – датчик позиции педали акселератора

Система впрыска Common Rail работает следующим образом:

- топливо подается из бака шиберным (или шестеренчатым у Mercedes) насосом под давлением 2,5-3,0 бар в ТНВД. В этой магистрали некоторые производители устанавливают электромагнитный клапан аварийного останова двигателя и устройство предварительного подогрева топлива;

- радиальный многоплунжерный ТНВД с постоянным приводом от двигателя создает необходимое давление в аккумуляторе высокого давления. Производительность (и давление на выходе) ТНВД регулируется электромагнитным клапаном и/или отключением одной из плунжерных секций насоса;

- электрогидравлические форсунки, связанные с аккумулятором короткими магистралями, по команде ЭСУД впрыскивают топливо непосредственно в камеры сгорания двигателя в нужный момент и в необходимом количестве (при постоянном давлении в аккумуляторе количество топлива пропорционально времени включения электромагнитного клапана форсунки впрыска);

- ЭСУД, кроме того, обеспечивает выполнение функций управления рециркуляцией отработавших газов, давлением наддува, скоростью движения автомобиля и защитой от несанкционированного запуска двигателя;

- ЭСУД, интегрированная в общую систему управления автомобиля, обеспечивает обмен данными с системой управления трансмиссией, кондиционером и другими системами автомобиля.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляют к работоспособности топливных систем?
2. Приведите типы топливных насосов и дайте им краткую характеристику.
3. Какие основные функциональные параметры системы впрыска с рядным ТНВД с электронным управлением?
4. Какие существуют виды распределительных ТНВД?
5. Опишите рабочий процесс системы впрыска с распределительным, аксиальным и радиальным ТНВД.
6. Опишите рабочий процесс системы впрыска с индивидуальным ТНВД.
7. В чем отличие систем впрыска с рядным и распределительным ТНВД от системы впрыска Common Rail?
8. Приведите основные функциональные параметры топливных насосов высокого давления.

1.9. Компоненты аккумуляторной системы впрыска топлива дизельных двигателей

1.9.1. Система топливоподдачи и компоненты аккумуляторной системы впрыска топлива

Гидравлические системы дизельных двигателей с микропроцессорным управлением топливоподдачи и впрыска представлены на рис. 1.68.

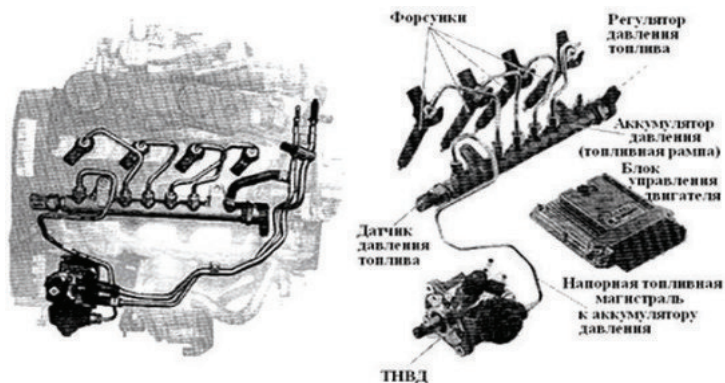
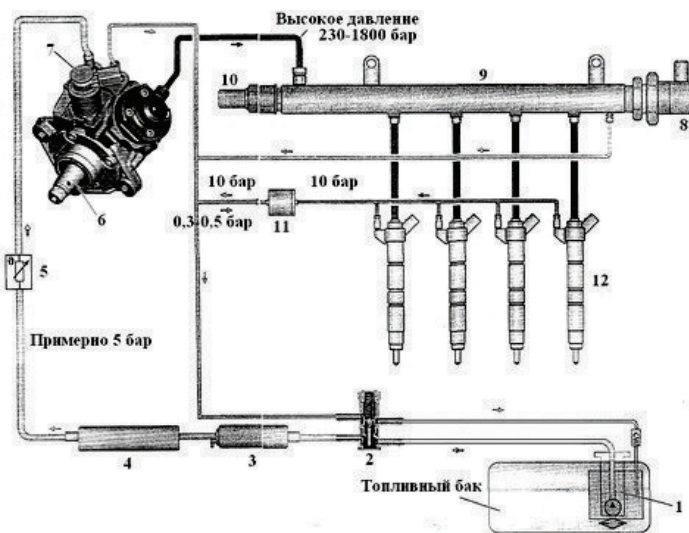


Рис. 1.68. Схема аккумуляторной топливной системы впрыска Common Rail двигателя автомобиля Audi A6: общий вид двигателя и аккумуляторной системы



6

Рис. 1.68. Схема аккумуляторной топливной системы впрыска Common Rail двигателя автомобиля Audi A6:
схема компонентов системы подачи и слива топлива

На рис. 1.68, б приняты следующие обозначения: 1 – подкачивающий топливный насос. Непрерывно подает топливо в напорную магистраль. 2 – клапан предварительного подогрева топлива. Предотвращает забивание топливного фильтра кристаллизующимися парафинами при низких температурах. 3 – дополнительный топливный насос. Подает топливо из напорной магистрали к топливному насосу. 4 – топливный фильтр. 5 – датчик температуры топлива. Измеряет текущую температуру топлива. 6 – топливный насос высокого давления (ТНВД). Создает необходимое для впрыскивания топлива высокое давление. 7 – клапан дозирования топлива. Регулирует количество топлива, подаваемого в аккумулятор высокого давления. 8 – регулятор давления топлива. Управляет давлением топлива в контуре высокого давления. 9 – аккумулятор высокого давления (топливный гидравлический аккумулятор). Служит накопителем необходимого для впрыскивания топлива высокого давления для всех цилиндров двигателя. 10 – датчик давления топлива. Измеряет текущее давление топлива в контуре высокого давления. 11 – редукционный клапан. Поддерживает постоянное остаточное давление в обратных магистралях форсунок на уровне примерно 10 бар. Такое давление необходимо для нормальной работы форсунок. 12 – форсунки.

Система высокого давления состоит из следующих элементов:

- насос высокого давления с клапаном регулирования давления;
- топливный аккумулятор с датчиком давления топлива;
- топливные форсунки;
- трубопроводы высокого давления.

Система впрыска Common Rail представляет из себя систему впрыска топлива для дизельных двигателей с аккумулятором высокого давления. В

такой системе узлы, создающие высокое давление, и узлы собственно впрыскивания разделены. Необходимое для впрыскивания высокое давление топлива создается отдельным насосом высокого давления (ТНВД). Это давление накапливается в аккумуляторе высокого давления (топливном гидроаккумуляторе) и постоянно подается к каждой из форсунок через короткие магистрали высокого давления. Управляется система впрыска Common Rail системой управления двигателя Bosch EDC 17.

Регулятор, установленный в насосе высокого давления, поддерживает в аккумуляторе давление в заданных пределах.

Регулятор давления топлива работает под контролем ЭБУ. Когда регулирующий клапан открывается, излишек топлива уходит из насоса назад в топливный бак и давление в аккумуляторе падает. Для точного регулирования давления в аккумуляторе установлен датчик давления топлива.

Управляемые электроникой форсунки приводятся в действие индивидуально по сигналам ЭБУ. Каждая форсунка впрыскивает топливо непосредственно в соответствующую камеру сгорания. Постоянное наличие высокого давления в аккумуляторе позволяет очень точно и гибко менять цикловую подачу топлива по сравнению со штатными насосами высокого давления. Система допускает многоступенчатый впрыск топлива.

Технические особенности системы впрыска:

- в любом режиме работы двигателя может быть создано практически любое, оптимальное для данного режима, давление топлива;
- высокое давление впрыскивания обеспечивает тонкое распыление топлива и хорошее смесеобразование;
- гибкое управление ходом впрыска и возможность нескольких предварительных и последующих впрыскиваний.

Благодаря широкому диапазону давлений и тактов впрыскивания система Common Rail предоставляет широкие возможности для оптимизации процесса впрыска в любом из режимов работы двигателя. Тем самым она создает хорошие предпосылки для выполнения постоянно растущих требований к системам питания в части снижения расхода топлива, токсичности ОГ и шумности двигателя.

1.9.2. Компоненты аккумуляторной систем

Аккумуляторная система Common Rail является системой впрыска, главным преимуществом которой является широкий диапазон изменения давления топлива и момента начала впрыскивания. Это реализуется путем разделения процессов создания давления и обеспечения впрыскивания.

Состав аккумуляторной системы топливоподачи:

- микропроцессорный блок;
- блок усилителей мощности;
- пульт управления;
- видеоконтрольное устройство;
- вторичные источники питания;
- комплект датчиков системы управления;

- топливоподкачивающий насос;
- топливный насос высокого давления;
- электрогидравлические форсунки;
- аккумулятор топлива;
- топливный бак;
- топливные фильтры;
- трубопроводы высокого и низкого давления;
- датчик углового положения распределительного вала (элемент Холла);
- датчик углового положения коленчатого вала (индуктивный);
- датчик массового расхода воздуха;
- датчик температуры поступающего воздуха;
- датчик температуры охлаждающей жидкости;
- датчик положения педали подачи топлива;
- датчик атмосферного давления;
- датчик давления топлива в аккумуляторе;
- датчик температуры отработанных газов;
- датчик давления масла;
- датчик контроля противодействия;
- электромагнитные клапаны:
 - электромагнитный клапан отсечки;
 - электромагнитный клапан регулятора давления;
 - электромагнитный клапан электрогидравлических форсунок.

Программное обеспечение микропроцессорной системы управления состоит из программы монитора и следующих прикладных программных модулей:

- модуль формирования внешней скоростной характеристики;
- модуль, обеспечивающий работу аккумуляторной системы топливоподачи при отказе ряда датчиков;
- модуль оптимизаций угла впрыска и цикловой подачи;
- модуль диагностирования двигателя и аккумуляторной системы;
- модуль управления рециркуляцией отработанных газов;
- модуль управления регулируемым турбонаддувом.

Основные функции аккумуляторной системы топливоподачи. Аккумуляторная система топливоподачи с микропроцессорным управлением должна выполнять следующие функции:

- регулировать величину цикловой подачи в соответствии с внешне скоростной характеристикой с учетом обеспечения высокой экономичности ДВС и низкой токсичности отработавших газов;
- регулировать величину угла опережения начала впрыска в зависимости от частоты вращения коленчатого вала ДВС с учетом обеспечения высокой экономичности ДВС и низкой токсичности отработавших газов;
- осуществлять остановку ДВС при аварийных ситуациях;
- осуществлять регулировку наддува с учетом обеспечения высокой экономичности ДВС и низкой токсичности отработавших газов;

- осуществлять регулировку системы рециркуляции с учетом обеспечения низкой токсичности отработавших газов;
- осуществлять работу аккумуляторной системы топливоподдачи при отказе ряда датчиков;
- осуществлять диагностику элементов аккумуляторной системы топливоподдачи и контроль функционирования исполнительных элементов без запуска ДВС с выводом информации на видеоконтрольное устройство.

Принцип функционирования аккумуляторной топливной системы состоит в следующем. Топливо забирается из топливного бака топливоподкачивающим насосом, который может быть установлен как в баке, так и на двигателе. В баке устанавливаются центробежные турбинные электрические насосы, а на двигателе с отдельным приводом или внутри корпуса ТНВД – насосы шестеренного типа с внешним или внутренним зацеплением шестерен (рис. 1.69).

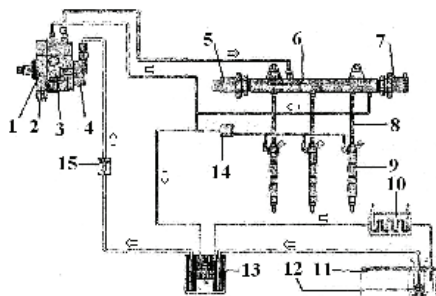


Рис. 1.69. Схема гидравлическая принципиальная аккумуляторной системы топливоподдачи

В контур высокого давления образуют следующие компоненты: 1 – ТНВД; 2 – клапан постоянного давления; 3 – клапан дозирования топлива; 5 – датчик давления топлива в аккумуляторе; 6 – топливный аккумулятор высокого давления; 7 – электромагнитный регулятор давления топлива; 8 – трубопроводы; 9 – форсунки.

В контур низкого давления входят: 4 – шестеренный топливоподкачивающий насос; 10 – радиатор для охлаждения топлива; 11 – топливный бак; 12 – электрический топливоподкачивающий насос; 13 – топливный фильтр; 14 – клапан постоянного давления в магистрали слива; 15 – датчик температуры топлива.

Топливо проходит через систему фильтрации грубой и тонкой очистки. Чаще всего система подготовки топлива представляет собой только фильтр тонкой очистки, оснащенный датчиком воды и системой подогрева топлива. Подогрев осуществляется или нагревательной спиралью, или за счет нагретого топлива в линии обратного слива.

Подсистема высокого давления включает ТНВД, форсунки, трубки высокого давления, гидравлический аккумулятор высокого давления. Форсунки связаны с аккумулятором короткими магистралями высокого давления. Давление внутри аккумулятора измеряется датчиком давления топлива 5 и ограничивается клапаном регулирования давления 14 до некоторой максимально допустимой величины в зависимости от параметров системы впрыскивания. Через ограничитель расхода топлива, который дросселирует поток топлива, последнее под давлением поступает к форсункам.

Система топливоподдачи. В дизелях вследствие впрыскивания топлива в конце сжатия время на распыливание, испарение и перемешивание топлива с воздухом очень ограничено: приблизительно в 10 раз меньше, чем в

карбюраторных двигателях. В результате впрыснутое топливо неравномерно распределяется по камере сгорания: струя топлива во время движения превращается в факел мелких капель с вовлечением воздуха, как следствие в зоне действия факела наблюдается обогащенная топливом смесь, то есть избыток топлива, а на периферии камеры сгорания обедненная смесь – недостаток топлива.

Из-за неравномерного распределения топлива по камере сгорания в дизельных двигателях при полной нагрузке не удастся увеличить коэффициент избытка воздуха более как в 1,2-1,4 раза. При подаче большего количества топлива оно полностью не сгорает, появляется дымный выпуск, мощность дизеля снижается, а удельный расход топлива на эксплуатационных режимах возрастает.

В системе топливоподачи, как и в любой технической системе, связи между компонентами реализуются тремя способами, а именно путем передачи:

- энергии (энергетические связи);
- вещества (вещественные связи);
- информации (информационные связи).

Микропроцессорная система управления как техническое средство обработки информации позволяет существенно расширить информационные связи, а это дает возможность учитывать большее количество факторов, влияющих на процессы в двигателе, реализовывать оптимальные законы и гибкое управление топливоподачей.

Гидравлическая система и элементы топливной аппаратуры дизельного двигателя представлены на рис. 1.70.

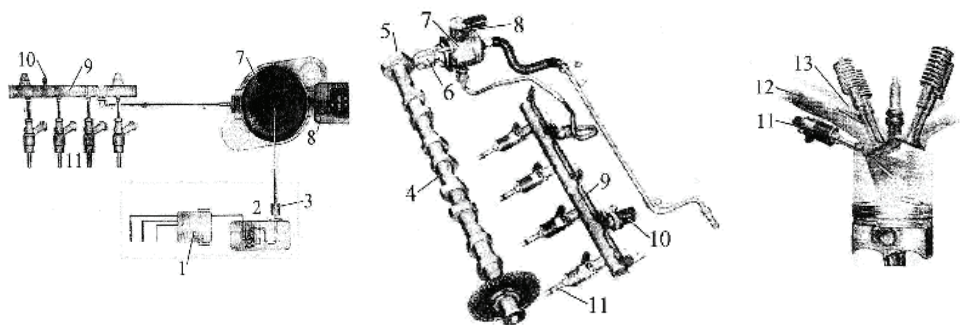


Рис. 1.70. Гидравлическая система и элементы топливной аппаратуры:

1 – ЭБУ электронасоса; 2 – электронасос; 3 – топливный фильтр; 4 – распределительный вал; 5 – кулачок; 6 – толкатель; 7 – ТНВД; 8 – клапан-дозатор; 9 – гидравлический аккумулятор; 10 – датчик давления топлива; 11 – форсунка; 12 – система вихревых заслонок; 13 – разделительная перегородка

Аккумуляторная система впрыска топлива (рис. 1.71) [9] позволяет получить одновременное управление началом, продолжительностью, давлением и формированием закона впрыскивания, что дает наибольший эффект в повышении экономичности и снижении токсичности дизелей.

Благодаря этой системе наиболее полно выполняются ограничения по шуму работы двигателя, токсичности отработавших газов, требования по мощности и расходу топлива. Серьезную конкуренцию аккумуляторным системам, возможно, составят системы с насос-форсунками, которые могут оказаться дешевле для двигателя с небольшим числом цилиндров. Все другие системы впрыска топлива на дальнюю перспективу можно рассматривать лишь как промежуточные решения.

В настоящее время аккумуляторные системы впрыска топлива, применяемые на автомобилях Audi, BMW, Daimler-Chrysler, FIAT, Peugeot, Rover и ряде других автомобилей, в основном идентичны (рис. 1.72).

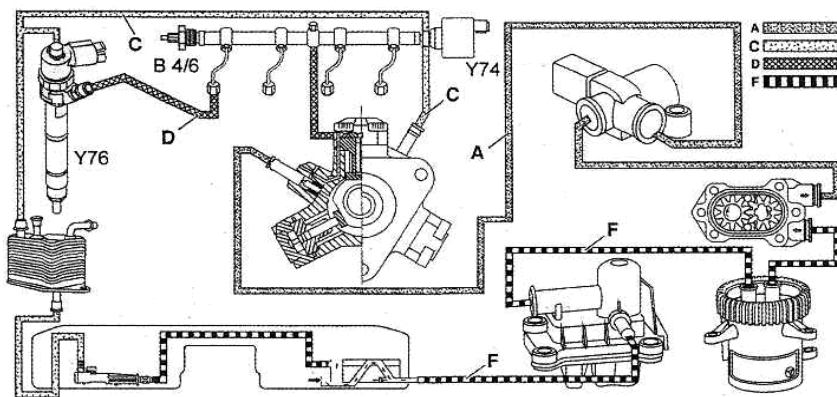


Рис. 1.71. Система подачи топлива двигателя с аккумуляторной системой впрыска топлива:

A – давление подкачки топлива; C – линия обратного слива топлива; D – линия высокого давления; F – впускной топливопровод

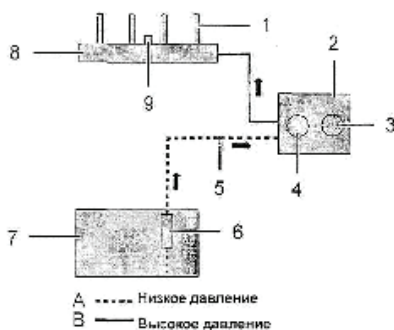


Рис. 1.72. Система подачи топлива автомобилей Citroën, Peugeot (PSA), BMW 1.6 THD-Motor

Во впускном топливопроводе F (рис. 1.71) находятся предварительный подогреватель топлива и топливный фильтр. Топливо подается к ТНВД под давлением от 2,5 до 3,0 бар. При превышении допустимого давления клапан, расположенный в шестеренном насосе, свя-

На рис. 1.72 приняты следующие обозначения: 1 – форсунка высокого давления; 2 – насос высокого давления; 3 – регулировочный клапан; 4 – клапан сброса давления; 5 – сервисный клапан; 6 – топливный модуль с ЕКР и датчиком уровня топлива; 7 – топливный бак; 8 – топливный аккумулятор; 9 – датчик высокого давления топлива; А – контур низкого давления; В – контур высокого давления.

В двигателе Mercedes топливо нагнетается в систему из топливного бака шестеренным топливоподкачивающим насосом (рис. 1.71).

зывает подводящий и отводящий контуры. Другие производители дизелей используют шибберные роликовые электронасосы, подобные тем, что применяются в системах впрыска топлива бензиновых двигателей. В дизельных двигателях BMW на магистрали низкого давления устанавливается датчик давления. В двигателях Mercedes на линии подвода топлива к ТНВД расположен электромагнитный клапан останова двигателя, который срабатывает в случае необходимости аварийной остановки двигателя.

Топливо из ТНВД по топливопроводу высокого давления поступает в аккумулятор высокого давления. С одной стороны аккумулятора в корпус завернут датчик давления (В4/6, рис. 1.71), с другой – электромагнитный клапан регулирования давления (Y74, рис. 1.71). Датчик регистрирует давление в аккумуляторе, которое блоком управления сравнивается по полю характеристик с заданным. При отклонении давления от требуемого блок управления изменяет скважность подачи электрического питания к электромагниту клапана регулирования давления.

Регулятор давления. Давление внутри аккумулятора измеряется датчиком давления топлива и под управлением электронного блока ограничивается электромагнитным клапаном регулирования давления (ЭК РДТ) до некоторой максимально допустимой величины в зависимости от параметров системы впрыска (рис. 1.32, 1.35, 1.68).

В аккумуляторной системе топливоподачи топливо из ТНВД направляется через магистраль высокого давления к впускному штуцеру аккумулятора, из которого оно распределяется по отдельным форсункам.

ЭК РДТ (рис. 1.43) крепится через фланец к корпусу ТНВД или аккумулятора высокого давления.

От аккумулятора короткие топливопроводы высокого давления подводятся к форсункам (Y76, рис. 1.71), которые имеют собственную систему управления процессом впрыскивания топлива. Игла распылителя форсунки в нерабочем состоянии прижимается к седлу пружинной распылителя – это предотвращает попадание воздуха в форсунку при пуске двигателя.

Благодаря использованию электрогидравлического управления процессы впрыскивания топлива могут происходить за короткие промежутки времени. Становится возможным процесс предварительного впрыскивания топлива, с помощью которого достигаются более мягкая работа двигателя и меньшая эмиссия отработавших газов. Цикловая подача определяется продолжительностью открытия управляющего клапана и давлением в аккумуляторе. Так как большая часть топлива под высоким, давлением поступает на линию обратного слива, его температура может повышаться до 140 °С.

Датчики и исполнительные механизмы по техническому уровню должны соответствовать элементам современной аккумуляторной системы впрыска топлива. Типичными датчиками, применяемыми в таких двигателях, являются датчик давления в аккумуляторе высокого давления и датчик Холла на распределительном валу. Последний служит для распознавания номера цилиндра, так как форсунки должны регулироваться индивидуально. Наряду с обычными исполнительными механизмами, такими как пневматический редуктор для управления рециркуляцией отработавших газов,

механизмы управления турбокомпрессором и отключением впускного канала, применяются характерные для аккумуляторной системы впрыска топлива исполнительные механизмы для форсунки, электромагнитных клапанов регулирования давления, отключения секции насоса и останова двигателя.

На рис. 1.73 показаны датчики и исполнительные механизмы раннего впрыска двигателя Audi V6 TDI [9].

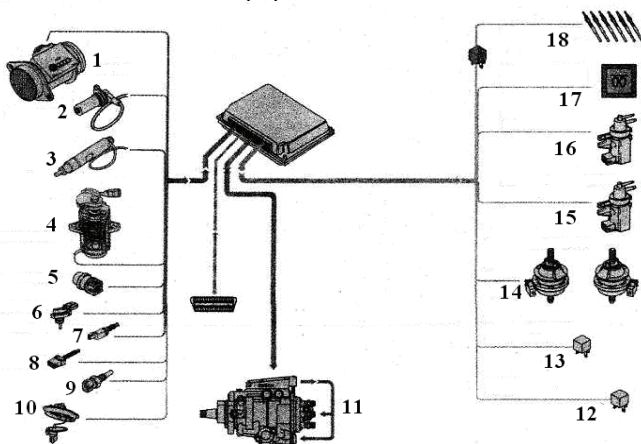


Рис. 1.73. Датчики и исполнительные механизмы двигателя Audi V6 TDI:

1 – расходомер воздуха; 2 – датчик ВМТ; 3 – датчик движения иглы распылителя форсунки; 4 – датчик педали подачи топлива; 5 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 6 – датчик давления наддува; 7 – выключатель привода сцепления; 8 – два выключателя тормозов; 9 – датчик температуры масла; 10 – датчик уровня топлива; 11 – блок управления ТНВД; датчик угла поворота приводного вала ТНВД; электромагнитный клапан высокого давления; электромагнитный клапан регулирования начала подачи топлива; 12 – реле подкачивающего насоса; 13 – реле электрического питания; 14 – электрогидравлические опоры двигателя; 15 – электромагнитный клапан давления наддува; 16 – электромагнитный клапан рециркуляции отработавших газов; 17 – контрольная лампа свечей накаливания; 18 – свечи накаливания

Аккумуляторные топливные системы двигателей имеют одну общую концепцию построения и функционирования, но отличаются реализацией отдельных компонентов, таких как ТНВД, форсунки, гидроаккумулятор, а также имеют различное количество датчиков системы управления. Причем конструктивные отличия проявляются не только у компонентов различных фирм производителей, но и в поколениях топливной аппаратуры, выпускаемой одним производителем. Поэтому системы диагностирования должны быть достаточно гибкими и адаптирующимися к различным реализациям АСТП и их электронным системам управления. Общая структура аккумуляторной топливной системы и принцип ее функционирования состоят в следующем. Топливо забирается из топливного бака подкачивающим насосом, который может быть установленным как в баке, так и на двигателе. В баке устанавливаются обычно центробежные турбинные электрические насосы, а на двигателе с отдельным приводом или внутри корпуса ТНВД –

подкачивающие насосы шестеренного типа с внешним или внутренним зацеплением шестерен (рис. 1.74).

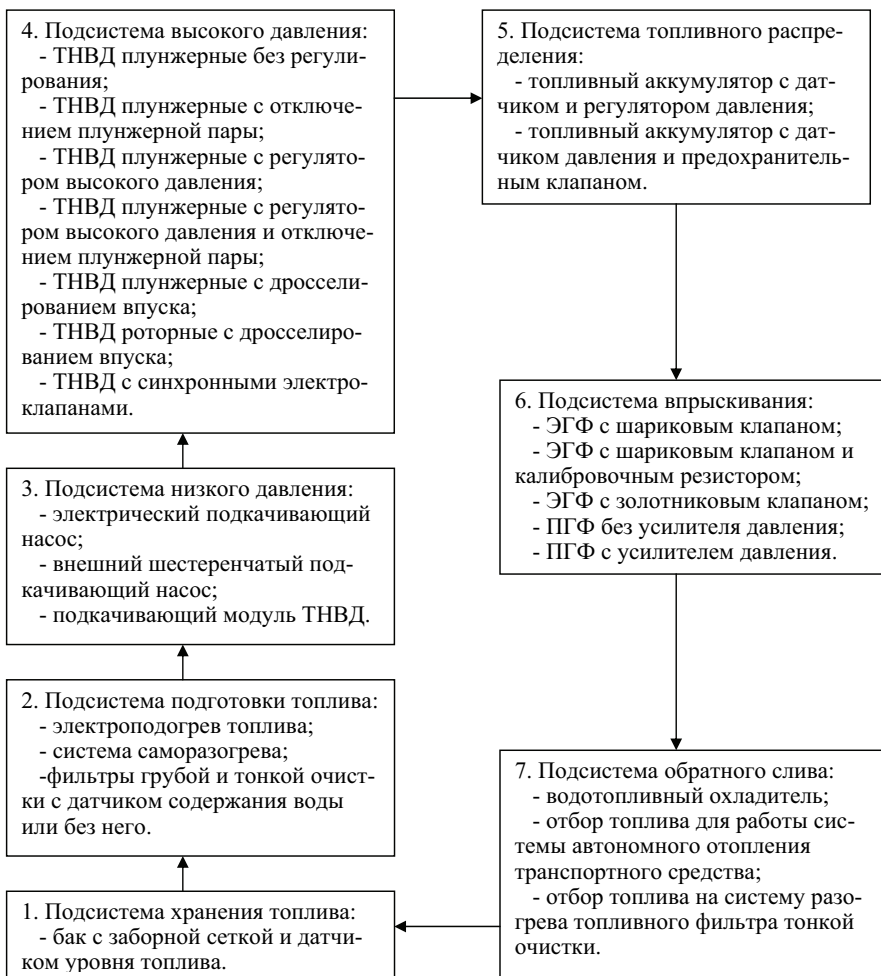


Рис. 1.74. Типы и взаимосвязи подсистем аккумуляторной топливной аппаратуры

Основные параметры системы низкого давления: перепад давления топлива на топливном фильтре, тонкость фильтрации, производительность топливоподкачивающего насоса (в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и противодействия), производительность электрического топливоподкачивающего насоса (в зависимости от напряжения питания), температура топлива, содержание воды в топливе после топливного фильтра.

Подсистема высокого давления состоит из ТНВД, форсунок, трубок высокого давления и аккумулятора высокого давления.

С развитием аккумуляторных систем появляется возможность свободного выбора характеристик топливоподачи при управлении давлением впрыскивания в зависимости от режима эксплуатации, что и обеспечивает оптимальную дальнобойность и тонкость распыления топлива, в том числе при низких частотах вращения коленчатого вала и малых нагрузках.

Подобное конструктивное решение основано на принципиальном преимуществе аккумуляторной системы. Оно состоит в том, что на номинальных режимах диаграмма скорости нарастания подачи топлива имеет трапецевидную форму в отличие от треугольной формы в традиционных топливных системах. При этом практически происходят мгновенное нарастание и спад давления в моменты, соответственно, открытия и закрытия запорных органов форсунок.

Топливная аппаратура типа Common Rail состоит из двух контуров:

1. Контур низкого давления: топливный бак, входной фильтр в баке, фильтр грубой очистки, топливоподкачивающий насос, фильтр тонкой очистки, топливный трубопровод низкого давления.

2. Контур высокого давления: топливный насос высокого давления, топливные трубопроводы высокого давления, форсунки, регулятор давления топлива и электронный блок управления с комплектом датчиков.

В системе Common Rail клапан 8 регулирования давления топлива в аккумуляторе высокого давления (рис. 1.75) обеспечивает величину давления впрыскивания. В некоторых случаях перед ТНВД 1 монтируется дроссель давления топлива в аккумуляторе 3, который также участвует в этом процессе. Электромагнитный клапан 7 высокого давления форсунки 6 под управлением электронного блока управления обеспечивает момент начала и продолжительность впрыскивания соответственно различным режимам работы дизеля. Давление впрыскивания, таким образом, не зависит от момента начала и продолжительности впрыскивания. Это делает возможным, наряду с основным впрыскиванием, от которого зависит крутящий момент дизеля, осуществлять другие процессы впрыскивания. С одной стороны, это предварительное впрыскивание с незначительной величиной подачи, которое снижает главным образом скорость нарастания давления в цилиндре дизеля при сгорании топлива и снижает шум.

С другой стороны, это – дополнительное впрыскивание, позволяющее снизить уровень эмиссии отработавших газов. Действительная величина подачи топлива обусловлена давлением и продолжительностью впрыскивания.

В процессе эксплуатации в результате изнашивания прецизионных пар увеличиваются зазоры в них, возрастает утечка топлива. Кроме того, в результате нагара, образующегося на поверхности распылителя, изменяется проходное сечение распыляющих отверстий. Все это приводит к увеличению внутренних потерь.

В компьютерных системах управления работой дизелей легковых, грузовых автомобилей и автобусов используются датчики и схемы управле-

ния, аналогичные с бензиновыми компьютеризированными двигателями (рис. 1.76).

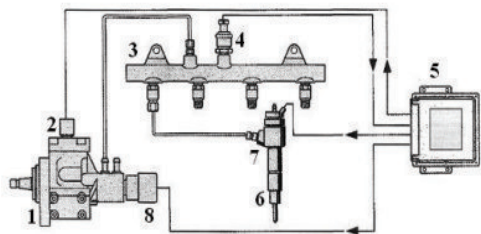


Рис. 1.75. Структурная схема контура высокого давления аккумуляторной системы топливоподдачи:

1 – ТНВД; 2 – электромагнитный клапан отключения секции ТНВД; 3 – топливный аккумулятор высокого давления; 4 – датчик давления в аккумуляторе; 5 – электронный блок управления; 6 – электрогидравлическая форсунка (ЭГФ); 7 – электромагнитный клапан управления давлением форсунки; 8 – электромагнитный клапан регулирования давления топлива в аккумуляторе

Электронный блок с помощью датчика 6 выполняет контроль давления топлива в аккумуляторе 7 и осуществляет электрическое управление цикловой подачей топлива через форсунки 8 и углом опережения впрыска топлива в соответствии с режимами работы двигателя и автомобиля. Из топливного бака 1 через фильтр 2 и топливоподкачивающий насос 3, используемый в основном для удаления воздуха из системы, топливо насосом высокого давления 4, работа которого контролируется ЭБУ, подается в аккумулятор. При этом величина давления топлива устанавливается редукционным клапаном 5 и контролируется ЭБУ.

Давление впрыска топлива на современных автомобилях с компьютеризированным дизелем увеличено до 150 МПа при минимальном его отклонении на каждой из форсунок, что достигается использованием в системе общей для всех форсунок аккумулятора топлива. На некоторых автомобилях в качестве форсунок применяются впрыскиватели (насос-форсунки), приводимые в действие от специальных кулачков на распределительном валу двигателя.

Для определения и восстановления технического состояния электронных систем на компьютеризированных дизелях используются аналогичные с бензиновыми двигателями: коды неисправностей, считываемые по диагностической лампе и с помощью диагностических средств; технологии ТО и ремонта; алгоритмы поиска и устранения неисправностей.

Контур замкнутой отрицательной обратной связи (ООС) (медленный). ЭБУ регулирует среднюю (изменяющуюся в зависимости от режима работы

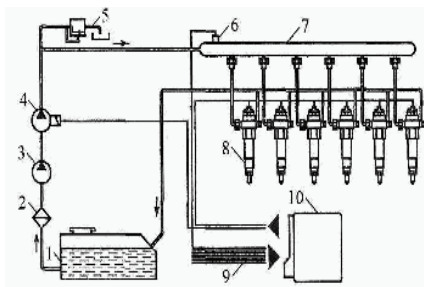


Рис. 1.76. Система управления работой дизеля:

1 – топливный бак; 2 – фильтр; 3 – топливоподкачивающий насос; 4 – насос высокого давления; 5 – редукционный клапан; 6 – датчик давления; 7 – аккумулятор топлива; 8 – форсунка; 9 – электрические цепи от измерительных датчиков; 10 – электронный блок управления

дизеля) величину давления в аккумуляторе путем широтно-импульсной модуляции управляющего тока, подаваемого на катушку электромагнита.

Контур разомкнутой ООС (быстрый, гидромеханический). Выравнивает высокочастотные колебания давления.

Режим разомкнутой ООС. Электромагнитный клапан регулирования давления топлива (ЭК РДТ) отключен и обесточенный электромагнит не развивает никаких усилий. Сила от давления топлива преодолевает силу пружины и топливо под высоким давлением подается на вход клапана. Клапан открывается и остается в таком положении до замыкания ООС. Пружина подобрана таким образом, чтобы устанавливалось давление топлива около 10 МПа. Режим разомкнутой ООС применяется при пуске дизеля, а также для защиты контура высокого давления и его разгрузки.

Режим замкнутой ООС используется для повышения давления. ЭК РДТ включается, сила действия электромагнита дополняет силу давления пружины. Якорь смещается вниз, уменьшая проходное сечение до тех пор, пока объединенное усилие электромагнита и пружины не уравновесится давлением топлива. Затем якорь остается в этом положении, поддерживая постоянное давление. Величина давления может варьироваться в зависимости от изменения величины подачи топлива в аккумулятор.

Компания Audi выпускает систему Common Rail четвертого поколения, которая позволяет увеличить давление впрыска до 2200 бар при одновременном снижении давления в аккумуляторе до 1300 бар. Эту задачу выполняют встроенные в форсунки мультипликаторы давления. При этом вся система предохраняется от действия чрезмерно высоких давления.

Вторая разработка связана с созданием форсунки типа Vario с двумя рядами сопловых отверстий, управляемых отдельно посредством коаксиально расположенных запорных игл. При работе двигателя на режиме холостого хода и с малыми нагрузками поднимается только одна игла, открывая поток топлива только к одному ряду сопловых отверстий. При повышении нагрузки поднимается вторая игла, в результате чего топливо впрыскивается через все сопловые отверстия. Такая форсунка позволяет повысить управляемость процессами впрыска и сгорания топлива.

1.9.3. Форсунки систем впрыска топлива

1.9.3.1. Электрогидравлические форсунки

Наибольшее распространение в аккумуляторной топливной аппаратуре автомобильных дизелей получили электрогидравлические форсунки (ЭГФ – рис. 1.77, 1.78). В меньшей степени распространены пьезогидравлические (пьезомеханические) форсунки. Электрогидравлические форсунки независимо от производителя имеют один и тот же принцип: для осуществления впрыска на электромагнитный клапан подается электрический импульс, после чего он открывает сливное отверстие специальной управляющей камеры. Так как в закрытом состоянии игла форсунки удерживается не пружиной как в классической топливной аппаратуре, а силой от давления

топлива, действующего на шток-мультипликатор, то падение давления в управляющей камере приводит к перемещению мультипликатора и поднятию иглы форсунки. Усилие от давления топлива передается через длинный мультипликатор на иглу. Количество пружин в форсунках такого типа может колебаться от двух до четырех в зависимости от дополнительных элементов, демпфирующих перемещение клапана. Одна пружина всегда воздействует на иглу, прижимая ее к седлу в то время, когда давления топлива недостаточно для обеспечения гидравлического запирания через мультипликатор. Это предотвращает попадание воздуха из цилиндра в полость фор-

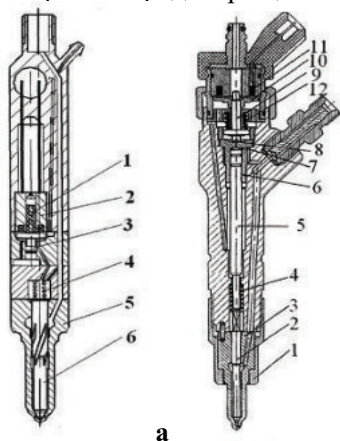


Рис. 1.77. ЭГФ фирмы Delphi (а) и фирмы Bosch (б):

(а): 1 – пружина; 2 – магнитопровод с обмоткой; 3 – клапан; 4 – пружина иглы; 5 – распылитель; 6 – игла; (б): 1 – гайка распылителя; 2 – игла; 3 – распылитель; 4 – пружина иглы; 5 – мультипликатор; 6 – втулка; 7 – жиклер камеры управления; 8 – шариковый клапан; 9 – шток; 10 – якорь электромагнита; 11 – электромагнит; 12 – пружина клапана

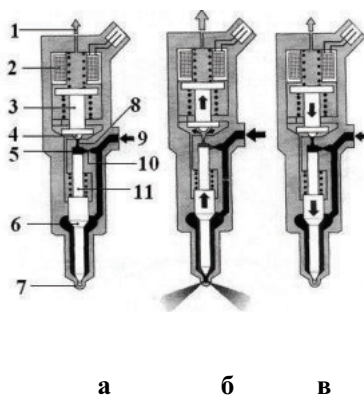


Рис. 1.78. Схема работы электрогидравлической форсунки:

а – форсунка в состоянии покоя; б – форсунка открыта; в – форсунка закрыта; 1 – магистраль обратного слива; 2 – катушка электромагнита; 3 – якорь электромагнита; 4 – шарик клапана; 5 – камера управляющего клапана; 6 – конус иглы распылителя; 7 – отверстие распылителя; 8 – дроссельное отверстие отвода топлива; 9 – магистраль высокого давления; 10 – дроссельное отверстие подачи топлива; 11 – поршень управляющего канала

сунки на режимах пуска двигателя. Слив управляющей порции топлива организован через отверстие в центре электромагнита. В форсунке Delphi нет мультипликатора как такового (рис. 1.77). Давление топлива воздействует непосредственно на плоскость торца иглы. Запорный элемент управляющей камеры выполнен по золотниковому принципу и обладает большим быстродействием. Топливо поступает к запорному конусу распылителя не по отдельному каналу, а по винтовым проточкам на боковой поверхности иглы. Линия обратного слива не проходит через электромагнит, что позволило уменьшить его размеры и разместить внутри корпуса форсунки. Все вышеупомянутые конструктивные отличия форсунки Delphi позволили уменьшить ее габариты.

В состав электрогидравлической форсунки входят следующие функциональные блоки:

- бесштифтовый распылитель;
- гидравлическая сервосистема;
- электромагнитный клапан управляющего давления.

Форсунки связаны с аккумулятором короткими магистралями высокого давления (рис. 1.78).

Топливо подается по магистрали 9 высокого давления через подводящий канал к распылителю форсунки, а также через дроссельное отверстие 10 подачи топлива – в камеру 5 управляющего клапана. Через дроссельное отверстие 8 отвода топлива, которое может открываться электромагнитным клапаном, камера соединяется с магистралью 1 обратного слива топлива.

При закрытом дроссельном отверстии 8 (рис. 1.78, а) гидравлическая сила, действующая сверху на поршень 11 управляющего клапана, превышает силу давления топлива снизу на конус 6 иглы распылителя. Вследствие этого игла прижата к седлу распылителя и плотно закрывает отверстие 7 распылителя. В результате топливо не попадает в камеру сгорания.

При срабатывании электромагнитного клапана якорь электромагнита перемещается вверх, открывая дроссельное отверстие 8 (рис. 1.78, б). Соответственно снижаются как давление в камере управляющего клапана, так и гидравлическая сила, действующая на поршень управляющего клапана. Под действием давления топлива на конус 6 игла распылителя отходит от седла, так что топливо через отверстие 7 распылителя попадает в камеру сгорания цилиндра. Такое не прямое управление иглой применяют по той причине, что непосредственного усилия электромагнитного клапана недостаточно для быстрого подъема иглы распылителя. Управляющая подача – это дополнительное количество топлива, предназначенного для подъема иглы, которое после использования отводится в магистраль обратного слива топлива.

Кроме управляющей подачи существуют утечки топлива через иглу распылителя и направляющую поршня управляющего клапана. Все это топливо отводится в магистраль обратного слива, к которой присоединены все прочие агрегаты системы впрыска, и возвращается в топливный бак.

Цикл работы форсунки можно разделить на четыре рабочих такта:

- форсунка закрыта (с подачей высокого давления);
- форсунка открывается (начало впрыскивания);
- форсунка полностью открыта;
- форсунка закрывается (конец впрыскивания).

Эти рабочие состояния определяются распределением сил в конструктивных элементах форсунки. При неработающем двигателе и отсутствии давления в аккумуляторе пружина прижимает иглу распылителя к седлу, закрывая форсунку.

Скорость открытия распылителя определяется различием интенсивности потока топлива в дроссельных отверстиях.

Количество впрыснутого топлива пропорционально времени включения электромагнитного клапана и определяется управляющим сигналом контроллера (впрыскивание, управляемое по времени).

После перекрытия дроссельного отверстия отвода топлива давление в камере управляющего клапана вновь достигает той же величины, что и в аккумуляторе. Это повышенное давление смещает вниз поршень управляющего клапана вместе с иглой распылителя. Когда игла плотно примыкает к седлу распылителя и запирает его отверстия, впрыскивание прекращается.

1.9.3.2. Системы впрыска с пьезоэлектрическими форсунками

Пьезогидравлические форсунки работают аналогично электрогидравлическим форсункам, с той лишь разницей, что клапан управляющей камеры открывается не с помощью электромагнита, а с помощью пьезоэлемента через рычаг-усилитель, что позволяет значительно повысить быстродействие форсунки.

Фирмой Siemens разработана аккумуляторная система впрыска Common Rail, в состав которой входят пьезоэлектрические форсунки. Эти системы используются для оснащения дизелей Ford рабочим объемом 1,4 л, а также двухлитровых дизелей автомобилей Peugeot и Volvo.

На силовые пьезоэлектрические элементы возлагаются большие надежды, так как они действуют до пяти раз быстрее, чем электромагниты. Фирма Siemens внедряет их в качестве приводов клапанов управления в системах топливоподачи дизелей и, в частности, клапанов форсунок и насос-форсунок.

Особенностью форсунки фирмы Siemens является привод управляющего клапана посредством пьезоэлемента. Пьезоэлемент расширяется или сжимается в зависимости от полярности прикладываемого к нему напряжения (рис. 1.79).

Клапан открывается в результате действия короткого импульса тока в цепи пьезоэлемента. В открытом состоянии он удерживается усилием, создаваемым пьезоэлементом при подаче на него напряжения порядка 70 В, которое удваивается в результате взаимного воздействия попарно установленных пластинок пьезоэлемента. Закрытие клапана производится также при подаче импульса тока, но обратного направления. Поэтому разъединение штекерного соединения форсунки при работающем двигателе может привести к ее открытию на неопределенное время с тяжелыми последствиями для двигателя.

Гидравлический привод форсунки с управляющим пьезоклапаном действует практически так же, как у других форсунок, применяемых в системах впрыска Common Rail. При закрытом управляющем клапане на дифференциальную площадку иглы распылителя действует такое же давление топлива, как в аккумуляторе. Оно стремится поднять иглу распылителя с ее седла, но ему противодействуют усилия, создаваемые пружиной форсунки и давлением топлива, действующим на поршень мультипликатора. При закрытом

управляющем клапане это давление равно давлению в аккумуляторе, поэтому оно надежно удерживает иглу распылителя на седле. Но при открытом

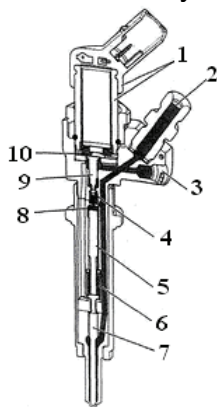


Рис. 1.79. Устройство форсунки с пьезоклапаном

1 – пьезоэлемент; 2 – подвод топлива под высоким давлением; 3 – сливной канал; 4 – управляющий клапан; 5 – поршень мультипликатора; 6 – пружина форсунки; 7 – игла распылителя; 8 – управляющая полость; 9 – толкатель управляющего клапана; 10 – рычаг привода управляющего клапана

- точная дозировка количества впрыскиваемого топлива.

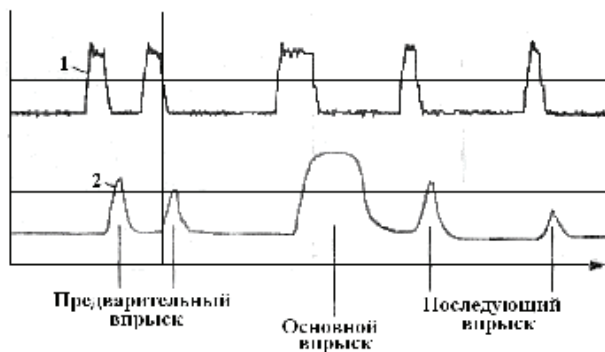


Рис. 1.80. Ход впрыскивания:

1 – управляющее напряжение; 2 – впрыск (мгновенный расход топлива)

ним клапаном. Единственным преимуществом пьезоэлектрических форсунок в данном случае является приближение предварительного впрыска к основному. При осуществлении предварительного впрыска повышается плавность роста нагрузки, а послевпрыск позволяет повысить экологические качества двигателя.

тому управляющему клапану оно резко снижается в результате сообщения полости над поршнем мультипликатора со сливной магистралью. При этом форсунка открывается, так как усилие ее пружины может противостоять только давлению не более 100 бар. Но этого достаточно, чтобы удерживать форсунку в закрытом состоянии после остановки двигателя и предотвращать проникновение газов в форсунку из камеры сгорания при пуске двигателя.

Скорость работы пьезокристаллического привода превышает скорость работы электромагнитного клапана в 4 раза.

Кроме того, применение пьезотехнологии позволяет снизить подвижную массу, связанную с иглой распылителя, на 75% по сравнению с электромагнитными форсунками.

Это обеспечивает системе следующие преимущества:

- очень малое время переключения;
- возможность реализаций нескольких впрыскиваний в одном рабочем такте, (рис. 1.80);

Несмотря на высокое быстродействие пьезоэлементов система впрыска фирмы Siemens работает по упрощенной программе с одним предварительным и одним основным впрысками топлива, причем при 3000 мин^{-1} предварительный впрыск отсутствует. Но эти функции выполняются и форсунками с электромагнит-

1.9.3.3. Система впрыска с насос-форсунками

Насос-форсунка впрыскивает в камеру сгорания топливо в момент, определяемый блоком управления, в нужном объеме и под требуемым давлением, на всех режимах работы дизеля. Благодаря компактности и универсальности конструкции агрегата применение магистрали высокого давления не требуется, что улучшает протекание процесса впрыскивания.

Система впрыска с насос-форсунками UIS (Unit Injector System) относится к так называемым индивидуальным системам впрыска и конструктивно представляет собой отдельный ТНВД, объединенный с форсункой впрыска, на каждый цилиндр двигателя с приводом непосредственно от распределительного вала. Конструкция UIS системы выглядит следующим образом (рис. 1.81) [4]:

- насос форсунка установлена в головке блока двигателя над каждым цилиндром;
- распылитель форсунки 4 находится в камере сгорания 8;
- распределительный вал двигателя 2 имеет по кулачку привода на каждую насос-форсунку;
- момент впрыска и цикловая подача топлива регулируются с помощью электромагнитного клапана 3 насос-форсунки.

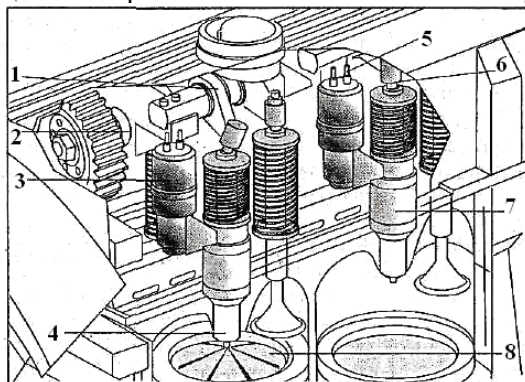


Рис. 1.81. Конструкция системы впрыска с насос-форсунками UIS:

1 – коромысло привода UIS; 2 – распределительный вал двигателя; 3 – электромагнитный клапан UIS; 4 – распылитель UIS; 5 – разъем подключения UIS; 6 – плунжер UIS; 7 – корпус UIS; 8 – камера сгорания двигателя

Подъем каждого кулачка передается через коромысло 1 на плунжер насоса, совершающий при этом возвратно-поступательные движения (рис. 1.82) [2]. Помимо регулирования при помощи электромагнитного клапана, момент начала впрыскивания и величина цикловой подачи зависят от реальной скорости движения плунжера, которая определяется формой кулачка. Нагрузки, возникающие при работе механизма подачи топлива, приводят к возникновению крутильных колебаний распределительного вала, что негативно отражается на характеристиках впрыскивания и межциклового стабильности. Для снижения этих колебаний настоятельно необходимо исполнение усиленного механизма подачи топлива, то есть привода распределительного вала, самого вала (который обычно усиливают на кручение), коромысел и их опор.

Такая конструкция обеспечивает высокий гидравлический КПД, давление впрыска до 2000 бар и, соответственно, низкий удельный расход топ-

лива, хорошие экологические характеристики и высокий крутящий момент. Единственным существенным недостатком системы впрыска UIS является высокая пульсирующая нагрузка на привод распределительного вала, так, например, аналогичная нагрузка в системе UPS (Unit Pump System) на порядок ниже.

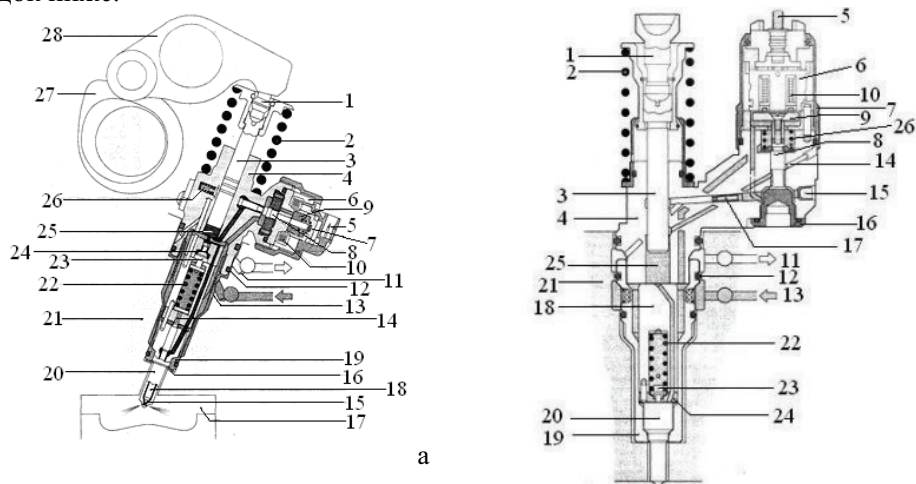


Рис. 1.82. Конструкция насос-форсунок для легкового (а) и грузового (б) автомобилей:

а: 1 – сферический наконечник; 2 – возвратная пружина; 3 – плунжер насос-форсунки; 4 – корпус насос-форсунки; 5 – штекер подачи напряжения; 6 – сердечник электромагнита; 7 – выравнивающая пружина; 8 – игла клапана; 9 – якорь электромагнита; 10 – катушка электромагнита; 11 – канал обратного слива топлива (контур низкого давления); 12 – уплотнение; 13 – отверстия подвода топлива (примерно 350 прожженных лазером отверстий, служащих фильтром); 14 – гидравлический упор (демпфирующий элемент); 15 – седло иглы распылителя; 16 – уплотнительная шайба; 17 – камера сгорания двигателя; 18 – игла распылителя; 19 – гайка распылителя; 20 – распылитель в сборе; 21 – головка блока цилиндров; 22 – пружина распылителя; 23 – плунжер аккумулятора (уравнивающий поршень); 24 – аккумулирующий объем; 25 – камера высокого давления (в плунжерной паре); 26 – пружина электромагнитного клапана; 27 – кулачковый вал привода насос-форсунок; 28 – коромысло с роликовым приводом; б: 1 – сферический наконечник; 2 – возвратная пружина; 3 – плунжер насос-форсунки; 4 – корпус насос-форсунки; 5 – штекер подачи напряжения; 6 – сердечник электромагнита; 7 – накидная гайка электромагнита; 8 – игла клапана; 9 – чкорь электромагнита; 10 – катушка электромагнита; 11 – канал обратного слива топлива (контур низкого давления); 12 – уплотнение; 13 – канал подвода топлива; 14 – полость низкого давления; 15 – заглушка канала низкого давления; 16 – упор иглы клапана; 17 – дроссель; 18 – стакан пружины распылителя; 19 – гайка распылителя; 20 – распылитель в сборе; 21 – головка блока цилиндров; 22 – пружина распылителя; 23 – грибок иглы распылителя; 24 – проставка; 25 – камера высокого давления (в плунжерной паре); 26 – пружина электромагнитного клапана

Система впрыска с насос-форсунками работает следующим образом [4]:

- топливо подается из бака электрическим насосом под давлением 1-1,5 бар на вход механического шиберного насоса, приводимого распределителем

тельным валом. Насос создает в магистрали низкого давления насос-форсунок необходимое рабочее давление (от 3 бар на холостом ходу до 7,5 бар на максимальных оборотах двигателя);

- плунжер насос-форсунки, приводимый коромыслом распределительного вала, создает высокое давление в распылителе в момент включения электромагнитного клапана. Моментом впрыска и количеством цикловой подачи топлива управляет ЭСУД;

- высокое давление развивается насос-форсунками непосредственно в зоне впрыска топлива в камеру сгорания. Из-за очень короткого топливного канала инерция в создании необходимого давления отсутствует, что и обеспечивает возможность достижения пиковых значений давления топлива до 2000 бар;

- очень малое время впрыска, характерное для системы UIS, приводит к повышенной шумности работы двигателя и увеличению выброса оксидов азота в отработавших газах. Для борьбы с этими явлениями используется предварительное впрыскивание топлива;

- ЭСУД, интегрированная в общую систему управления автомобиля, обеспечивает выполнение функций управления рециркуляцией отработавших газов, давлением наддува, защитой от несанкционированного запуска двигателя, обмен данными с системой управления трансмиссией, кондиционером и другими системами автомобиля.

Рассмотрим диагностику компонентов ЭСУД «Bosch EDC 15P» на примере автомобиля Volkswagen Passat 1,9D TDI PD 2001-2004 г.г. выпуска [4].

Двигатель этой конструкции оснащен системой UIS P1, относящейся к так называемым индивидуальным системам с управлением по времени с помощью встроенного электромагнитного клапана. Максимальная цикловая подача в UIS P1 составляет около 60 мм³ при максимальном давлении впрыска около 2050 бар, что обеспечивает максимальную цилиндрическую мощность около 25 кВт. ЭСУД «Bosch EDG 15P», управляя закрытием электромагнитного клапана UIS, определяет момент впрыска и величину цикловой подачи топлива.

Используя данные необходимых датчиков, ЭСУД выбирает оптимальные значения величины цикловой подачи и момента впрыска топлива, управляет системой рециркуляции отработавших газов, временем включения пусковых свечей накаливания.

Кроме того, ЭСУД «Bosch EDC 15P» имеет интегрированную систему самодиагностики, поддерживающую протоколы OBD-II и производителя.

В управляющей программе ЭСУД «Bosch EDC 15P» предусмотрены режимы защиты двигателя при отказах компонентов системы управления. Так, при выходе из строя различных датчиков (температуры, позиции педали акселератора, измерителя расхода воздуха) или при низком давлении наддува отключается режим полной подачи топлива или фиксируется установленный режим холостого хода. При появлении таких неисправностей, как отказ одной или нескольких форсунок, выход из строя датчиков работа двигателя блокируется ЭСУД.

Система с насос-форсунками (рис. 1.83) устанавливается на трех- и четырехцилиндровых двигателях Volkswagen и ряде других автомобилей. Компоненты системы впрыскивания топлива дизельных двигателей с насос-форсунками PDE показаны на рис. 1.84.

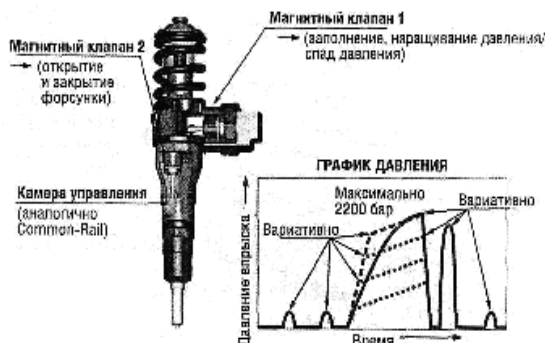


Рис. 1.83. Насос-форсунка с двумя магнитными клапанами

Появившееся несколько лет тому назад третье поколение системы Common-Rail с пьезоэлектрическими форсунками и максимальным давлением впрыска 1600 бар последовательно модернизируется. С 2006 года серийно выпускается вариант с давлением 1800 бар, с 2007 года – 2000-2200 бар.

В 2008 году появилось четвертое поколение Common-Rail. В этой системе применяются дизельные форсунки HADI (Hydraulically Amplified Diesel Injector) с гидравлическим усилителем. Он работает с передаточным поршнем, который увеличивает давление в системе до 2500 бар. Проще говоря, данную систему можно сравнить с насос-форсункой. Благодаря специальной геометрической форме топливо впрыскивается в камеру сгорания не резко, а с увеличивающимся давлением. Благодаря улучшению процесса впрыска предотвращается неполное сгорание, уменьшаются выбросы вредных веществ и шумы от сгорания. С форсунками HADI, естественно, также возможен многократный впрыск. В качестве управляющего элемента применяется заново разработанный быстродействующий магнит-

При эксплуатации автомобиля система с насос-форсунками по сравнению с аккумуляторной системой впрыска топлива работает с большими давлениями впрыскивания (рис. 1.83), благодаря чему имеет некоторое преимущество по расходу топлива. В третьем и четвертом поколениях насос-форсунок достигнуто более глубокое изменение давления топлива.

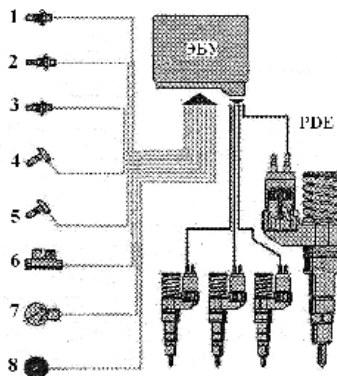


Рис. 1.84. Основные компоненты системы впрыска топлива дизельных двигателей с насос-форсунками PDE:

- 1 – температура топлива; 2 – температура охлаждающей жидкости; 3 – температура воздуха; 4 – частота вращения коленчатого вала; 5 – частота вращения распределительного вала; 6 – давление в топливной системе; 7 – положение педали; 8 – скорость автомобиля

ный клапан. Если давление в системе снизить до 1300 бар, то можно повысить общий КПД системы.

Система насос-форсунка для применения в легковых автомобилях имеет большое будущее. Фирма Bosch разработала третье и уже четвертое поколение системы, которое позволяет достигать давления впрыска 3000 бар.

В новой конструкции Bosch применяет два магнитных клапана: один управляет изменением давления, другой – открытием и закрытием иглы форсунки, аналогично управляющему клапану форсунки Common-Rail, Таким образом, процесс впрыска может быть выполнен значительно более гибким. С пятью вариативными впрысками на цикл данная система по гибкости приближается к третьему и четвертому поколению Common-Rail.

Четвертое поколение систем впрыска Common-Rail: давление в системе 1350 бар, при усилении давления примерно до 1:2 давление впрыска достигает 2500 бар.

Специалисты Bosch разработали новый блок управления EDC 17. Так, с помощью корректировки волны давления можно компенсировать комплексные переменные воздействия, например, между колебаниями давления в сферическом трубопроводе (Rail) и количеством впрыскиваемого топлива. Электроника на основании сигналов частоты вращения анализирует параметры впрыска в каждом цилиндре и в случае необходимости регулирует их.

Время предварительного дозирования может в десятки раз превосходить длительность впрыскивания в цилиндр, позволяя повысить точность электронного дозирования при использовании электрических управляющих клапанов низкого быстродействия. Вместе с тем растут и длительность включенного состояния электромеханических преобразователей, и запаздывание управления подачей (почти до двух оборотов четырехтактного двигателя). Поэтому электрогидравлические насос-форсунки предварительного дозирования не нашли широкого применения.

В целом электрогидравлические насос-форсунки сложны конструктивно. Для их работы необходимо увеличение производительности насоса среднего давления по сравнению с подачей в цилиндр соответственно коэффициенту мультипликации. Сброс в бак отработанного в приводе большого объема нагретого при сжатии топлива требует установки на автомобиль холодильника топлива. Управление формой характеристики впрыскивания ограничено. Давление впрыскивания зависит от продолжительности подачи.

Однако возможность независимого управления давлением топлива на входе в насос-форсунку, а следовательно, и давлением впрыскивания существенно расширяет функции гидроприводных ЭТС с электрогидравлическими насос-форсунками. А по возможностям повышения давления впрыскивания они пока не имеют себе равных. Гидроприводные ЭТС уступают только ЭТС с аккумуляторами высокого давления по управляемости харак-

теристик впрыскивания. В то же время по конструктивным характеристикам они несколько превосходят аккумуляторные ЭТС.

Фирма Bosch продолжает работы по совершенствованию насос-форсунок. Их также предполагается оснащать двухгольными распылителями. Первые же опыты с этими насос-форсунками показали возможность снижения выбросов частиц и оксидов азота на 25-40%. В то время как фирма Siemens разрабатывает пьезоэлектрические клапаны управления насос-форсунками, фирма Bosch по-прежнему применяет более дешевые электромагнитные клапаны. Специалисты фирмы утверждают, что пьезоэлектрические клапаны имеют явное преимущество только при их размещении внутри форсунки, а в данном случае это исключено ввиду особенностей ее конструкции.

Контрольные вопросы

1. Перечислить технические особенности системы впрыска Common Rail.
2. Привести состав аккумуляторной системы топливоподачи дизельного двигателя.
3. Привести состав программного обеспечения микропроцессорной системы управления дизельным двигателем.
4. Какие функции выполняет аккумуляторная система топливоподачи с микропроцессорным управлением?
5. В чем может отличаться реализация отдельных компонентов аккумуляторной топливной системы двигателя?
6. Привести основные параметры низкого давления топливной системы.
7. Привести основные параметры высокого давления топливной системы.
8. Какие показатели электронных систем двигателей используются для определения технического состояния двигателя?
9. Как работают электрогидравлические форсунки?
10. Какие блоки входят в состав электрогидравлической форсунки?
11. Назвать четыре цикла работы форсунки.
12. Как работает пьезогидравлическая форсунка?
13. Привести преимущества и недостатки пьезогидравлических и электрогидравлических форсунок.
14. Как работает система впрыска с электрогидравлической насос-форсункой?
15. Какие преимущества и недостатки систем впрыска с насос-форсунками?
16. Какие виды формы сигналов впрыскивания устанавливаются микроконтроллером в соответствии с режимами работы двигателя?
17. Какие топливные насосы высокого давления используются в дизельных двигателях?
18. Привести типичные неисправности ТНВД аккумуляторных систем топливоподачи.
19. Какие отличительные особенности работы пьезоэлектрических форсунок по сравнению с электромагнитными?

2. ОБЪЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Основные принципы автоматического управления двигателем

Управление двигателем нельзя рассматривать в отрыве от управления автомобилем. Скоростные и нагрузочные режимы работы двигателя зависят от скоростных режимов движения автомобиля в различных условиях эксплуатации, которые включают в себя разгоны и замедления, движение с относительно постоянной скоростью, остановки.

Водитель изменяет скоростной и нагрузочный режим двигателя, воздействуя на дроссельную заслонку. Выходные характеристики двигателя при этом зависят от состава топливоздушнной смеси и угла опережения зажигания, управление которыми обычно осуществляется автоматически. ЭСАУ – электронная система автоматического управления; КП – коробка передач; V_a – скорость движения автомобиля. Схема двигателя как объекта автоматического управления приведена на рис. 2.1 [10].

Входные параметры (угол открытия дроссельной заслонки $\varphi_{др}$, угол опережения зажигания θ , цикловой расход топлива G_T и др.) – это те параметры, которые влияют на протекание рабочего цикла двигателя.

Их значения определяются внешними воздействиями на двигатель со стороны водителя или системы автоматического управления, поэтому они называются также управляемыми.

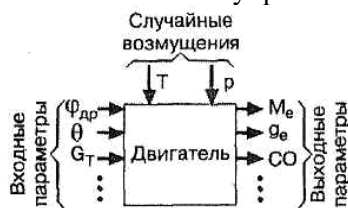


Рис. 2.1. Схема двигателя как объекта автоматического управления

воздействуют случайные возмущения, которые мешают управлению. К случайным возмущениям можно отнести изменение параметров состояния внешней среды (температура T , атмосферное давление p , влажность), свойств топлива и масла и т. д.

Для двигателя внутреннего сгорания характерна периодическая повторяемость рабочих циклов. Как объект управления двигатель считается нелинейным, так как реакция на сумму любых внешних воздействий не равна сумме реакций на каждое из воздействий в отдельности. Учитывая, что двигатель в условиях городской езды работает на нестационарных режимах, возникает проблема оптимального управления им. Возможность оптимального управления двигателем на нестационарных режимах появилась с развитием электронных систем управления.

Выходные параметры, называемые управляемыми, характеризуют состояние двигателя в рабочем режиме. К ним относятся: частота вращения коленчатого вала, крутящий момент M_e , показатель топливной экономичности g_e и токсичности отработавших газов (например, содержания CO), а также многие другие.

Кроме входных управляющих параметров, на двигатель во время его работы

Для построения оптимальных адаптивных управляющих систем требуется наличие математических моделей объекта управления. Однако из-за сложности конструкции, наличия допусков на размеры деталей двигателя одной и той же модели имеют различные характеристики. Кроме того, по конструктивным параметрам (степень сжатия, геометрия впускного и выпускного трактов и т. д.) отличаются и отдельные цилиндры многоцилиндрового двигателя. В этой связи общие, достаточно точные и полные математические модели двигателей внутреннего сгорания в традиционном аналитическом виде в настоящее время отсутствуют (это характерно для большинства сложных технических систем).

Автомобильный двигатель представляет собой многомерный объект управления, так как число входных параметров у него больше одного и каждый входной параметр воздействует на два и более выходных. В таком случае система управления также должна быть многомерной (рис. 2.2).

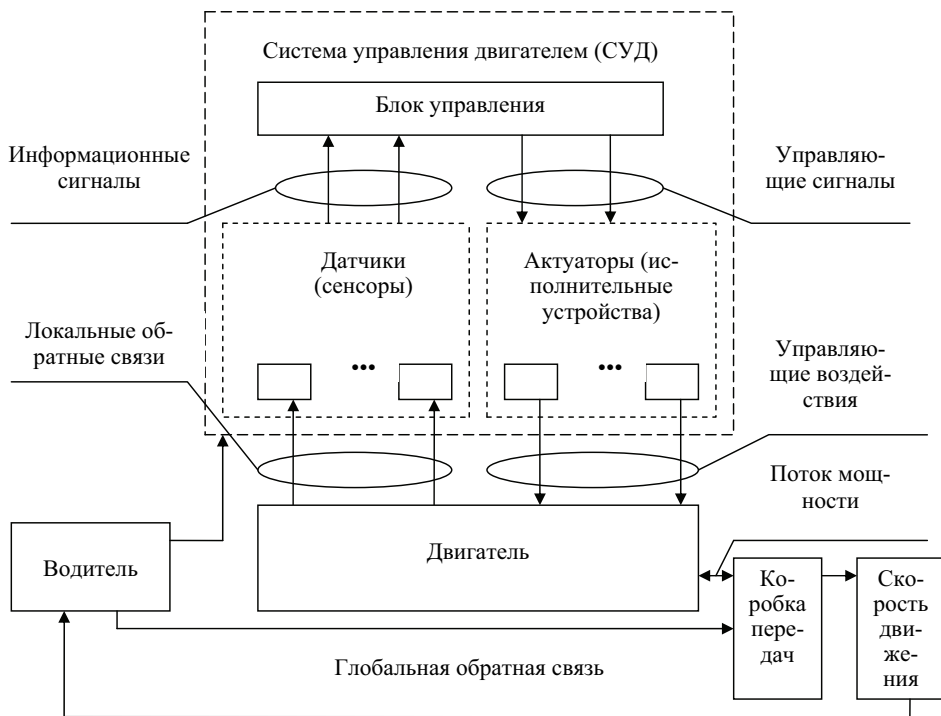


Рис. 2.2. Управление автомобильным двигателем

В японских автомобилях с двигателями с рабочим объемом более 2 л, а также в мощных автомобилях применяется комплексная электронная система управления двигателем с впрыском топлива. Кроме того, многие автомобили с двигателем меньшего объема имеют электронную систему управления карбюратором. В США широко распространена комплексная система управления, в которой за основу принят метод центрального впрыска топ-

лива, используемый, в частности, в моделях С3 фирмы General Motors и ЕЕС-IV фирмы Ford.

К основным электронным системам управления автомобилем относятся:

- система управления двигателем (СУД);
- система управления зажиганием;
- система управления подачей топлива;
- система управления ТНВД;
- система управления газораспределением, подачей воздуха;
- система управления и контроля отработавших газов;
- система управления движением автомобиля, куда входят системы АБС, навигации, автоматизации вождения и парковки, управления АКП, безопасности движения и т. п.;
- система управления подушками безопасности;
- система управления освещением и сигнализацией;
- система управления сервисным оборудованием автомобиля, а именно системой сигнализации, кондиционирования; радио и телевизионными системами навигации, телефонной связи;
- бортовые системы ЭЦВМ (CARPC, CAN).

В последние годы значительное увеличение вычислительных возможностей микропроцессоров, представленных на компьютерном рынке, сделало возможным осуществление электронного управления двигателем. Системы электронного управления оснащаются определенным количеством управляющих систем с обратной связью.

Система электронного управления дизелей позволяет также обмен данными с другими электронными системами автомобиля, как, например, с противобуксовочной системой (TCS) и с электронной системой управления трансмиссией. Это означает, что управление двигателем может быть интегрировано в общую систему управления автомобилем.

2.2. Обработка сигналов в электронном блоке управления

Входные сигналы. Наряду с исполнительными устройствами, датчики представляют интерфейс между автомобилем и ЭБУ, который является блоком обработки данных. Сигналы от датчиков поступают в электронный блок управления (или в несколько блоков управления) через защитные цепи и там, где это необходимо, преобразуются и усиливаются (рис. 2.3):

- аналоговые входные сигналы (например, информация о количестве подаваемого в цилиндры двигателя воздуха, температура охлаждающей жидкости двигателя и воздуха на впуске, напряжение аккумуляторной батареи и т. д.) преобразуются в цифровые через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) микропроцессора электронного блока управления;
- цифровые входные сигналы (например, сигналы включения/выключения или сигналы цифровых датчиков таких, как импульсы частоты вращения от датчика Холла) могут быть обработаны непосредственно микропроцессором;

- для подавления помех в специальном контуре электронного блока управления предварительно формируются импульсные входные сигналы от индуктивных датчиков, несущих информацию о частоте вращения коленчатого вала двигателя и контрольных отметках, которые конвертируются в форму прямоугольных импульсов.

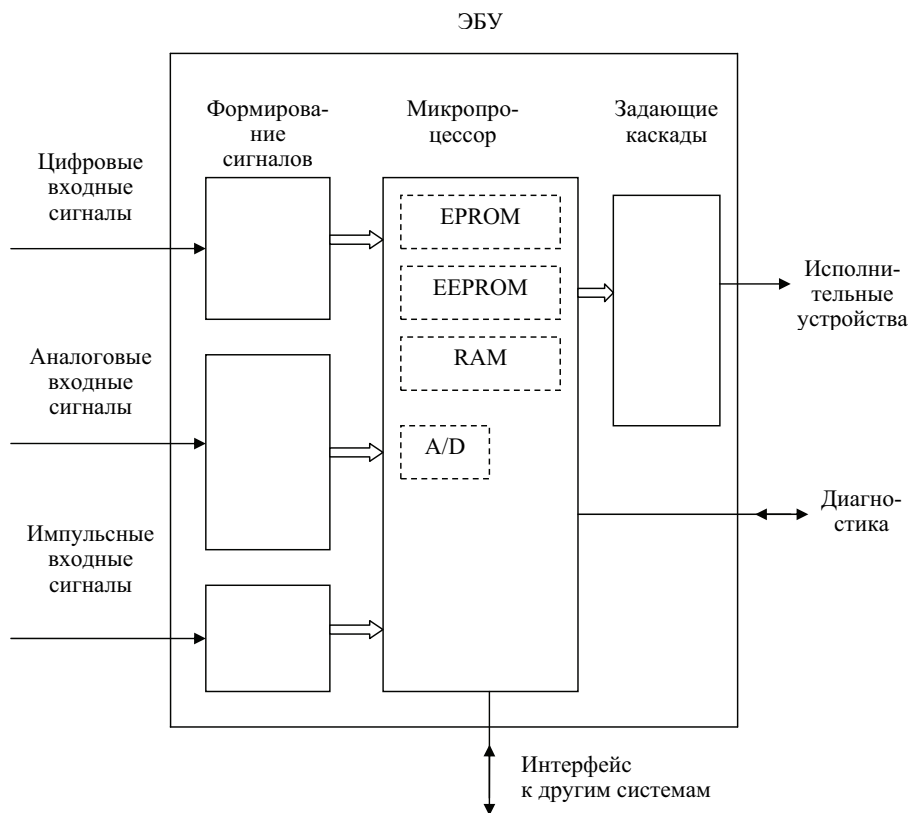


Рис. 2.3. Обработка сигналов в электронном блоке управления:

A/D – АЦП; RAM – оперативная память; EEPROM – постоянная память; EPROM – программируемая память (постоянное запоминающее устройство)

В зависимости от уровня интегрирования имеет место полное или частичное формирование сигнала в датчике. Нагрузка на датчик определяется эксплуатационными условиями в месте установки датчика.

Формирование сигналов. Для ограничения напряжения входных сигналов до максимально допустимого значения в ЭБУ используется защитный электрический контур. Входной сигнал, почти полностью очищенный от наложенных помех путем фильтрования, затем усиливается, чтобы соответствовать входному напряжению электронного блока управления.

Цифровая обработка входных сигналов обычно осуществляется в микропроцессорах электронных блоков управления (рис. 2.3). Для этого

требуется специальная программа, а полученные данные сохраняются в программируемой памяти (постоянное запоминающее устройство – ROM, или EPROM/EEPROM).

Кроме того, в программируемой памяти (Flash EPROM) хранятся запрограммированные характеристики двигателя и программируемые матрицы. Данные иммобилайзера, калибровочные и данные обработки сигналов, вместе с данными о неисправностях, которые могут появиться во время работы, хранятся в постоянной памяти (EEPROM). Из-за большого количества моделей двигателей и вариантов оборудования электронные блоки управления оснащаются так называемыми вариантными кодами. Используя такой код, фирма-производитель или ремонтная мастерская могут сделать выбор нужной программируемой матрицы, хранящейся в программируемой памяти (Flash-EPROM), чтобы обеспечить данный вариант автомобиля необходимыми функциями. Выбранные матрицы также сохраняются в постоянной памяти микропроцессора (EEPROM). Другие типы электронных блоков управления проектируются таким образом, чтобы полный набор данных мог быть запрограммирован в памяти Flash EPROM, в конце линии сборки автомобиля. Это уменьшает количество различных типов электронных блоков управления, требуемых для фирм-производителей автомобилей.

Оперативная память (RAM) требуется для хранения переменных данных таких, как расчетные или значения сигналов. Для правильного функционирования оперативная память требует постоянного электрического питания. При отключении электрического питания ЭБУ посредством выключения зажигания или отсоединении аккумуляторной батареи все данные оперативной памяти теряются. В таких случаях адаптивные величины, то есть те, которые касаются двигателя и его рабочего состояния, должны быть восстановлены при включении электронного блока управления в работу. Чтобы предотвратить стирание необходимых данных, адаптивные величины сохраняются в постоянной памяти (EEPROM), а не в оперативной (RAM).

Выходные сигналы микропроцессора запускают выходные каскады, которые имеют достаточную мощность для непосредственного соединения с исполнительными устройствами (приводами). Эти выходные каскады защищены от короткого замыкания на массу, как и от повреждения из-за электрической перегрузки.

Кроме того, определенное количество выходных сигналов передаются другим системам через управляющие интерфейсы.

2.3. Передача данных другим системам

Увеличивающееся применение электронных систем управления автомобилями с обратной и без обратной связи требует, чтобы индивидуальные электронные блоки управления работали в сети друг с другом. Такие системы управления включают в себя:

- управление коробкой передач;
- электронное управление двигателем или регулирование подачи топлива ТНВД;

- антиблокировочную систему тормозов (ABS);
- противобуксовочную электронную систему (TCS);
- электронную систему курсовой устойчивости (ESP);
- систему управления тормозным моментом (MSR);
- электронный иммобилайзер (EWS);
- бортовой компьютер и т. д.

Обмен информацией между системами уменьшает общее количество необходимых датчиков и улучшает управление отдельными системами. Интерфейсы систем передачи информации, проектируемые для применения в автомобилях, могут быть подразделены на две категории:

- обычные интерфейсы и
- последовательные интерфейсы, то есть сеть контроллеров (CAN).

Обычная передача данных в автомобиле характеризуется тем, что каждый сигнал имеет свой собственный канал связи (рис. 2.4). Двоичные сигналы могут быть переданы только как одно из двух возможных состояний – «1» или «0» (двоичный код), например, для компрессора кондиционера «On» и «Off». «ON/Off» отношения могут быть использованы для передачи постоянно изменяющихся параметров таких, как, например, рабочее состояние датчика положения педали акселератора.

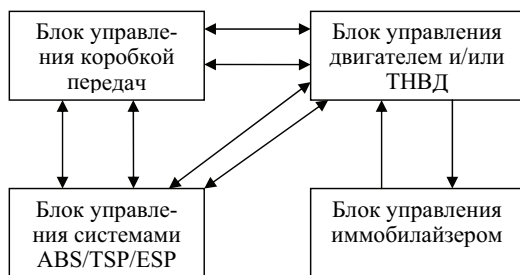


Рис. 2.4. Схема обычной передачи данных

Увеличение обмена данными между электрическими компонентами автомобиля уже достигли таких объемов, что дальнейшие попытки управления через обычные интерфейсы уже не могут дать ощутимый результат. Сегодня значительные средства вовлечены в поддержание сложных проводных систем на контролируемом уровне.

и требования к обмену данными между электронными блоками управления постоянно повышаются.

Последовательная передача данных (CAN). Проблемы, связанные с передачей данных через обычные интерфейсы, могут быть решены путем использования шин передачи данных. Одним таким примером является сетевой контроллер CAN, система шин передачи данных, разработанная для применения в автомобильном транспорте. Сигналы могут быть переданы через систему CAN при условии, что электронные блоки управления имеют последовательный CAN-интерфейс.

Имеются три главные области для применения системы CAN в автомобиле:

- сеть электронных блоков управления;
- бортовые электронные системы;
- мобильная связь.

Приведенное далее описание касается только сети электронных блоков управления.

Сеть электронных блоков управления. Системы электронного управления такие, как управление двигателем, антиблокировочная система тормозов (ABS), противобуксовочная система (TCS), система управления коробкой передач, система курсовой устойчивости (ESP) и другие, взаимодействуют друг с другом в сети. Электронные блоки управления имеют равный приоритет и соединены между собой линейной системой передачи данных (рис. 2.5). Одним из преимуществ такой структуры является то, что в случае отказа одной системы (абонентская система) все остальные продолжают работать, имея полный доступ в сети.

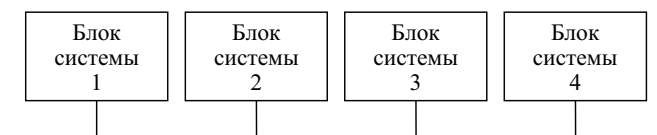


Рис. 2.5. Схема топологии линейной шины

Возможность тотальной неисправности становится значительно меньшей, чем при других системах с логическими схемами таких, как системы с обратной связью или иерархических системах, в которых неисправность одного блока или центрального электронного блока управления приводит к полному отказу всей системы. Типичный объем передачи данных системой CAN составляет величины в пределах от 125 кбит/с до 1 Мбит/с (например, объем передачи данных между электронными блоками управления двигателя и роторного ТНВД распределительного типа (с радиально расположенными плунжерами) составляет 500 кбит/с). Объем передачи данных должен быть достаточно большим, чтобы гарантировать требуемое быстродействие систем.

Ассоциативная адресация данных. В отличие от адресации индивидуальных блоков, схема адресации при использовании системы CAN присваивает каждому «сообщению» метку (знак). Каждое сообщение, таким образом, имеет собственный 11-бит или 29-бит идентификатор, который идентифицирует содержание сообщения (например, частоту вращения двигателя). Блоки системы обрабатывают только те сообщения, чьи идентификаторы хранятся в «приемочном листе» (фильтрация сообщений), все остальные сообщения просто игнорируются. Схема адресации и приемочной проверки показана на рис. 2.6.

Адресация информации означает, что сигнал может быть послан в ряд блоков или подсистем. От датчика только требуется, чтобы он послал свой сигнал прямо или через электронный блок управления в сеть шины передачи данных, где он соответствующим образом распределяется. Кроме того, поскольку в этой системе достаточно просто добавить блоки, то в ней может быть задействовано множество вариантов оборудования.

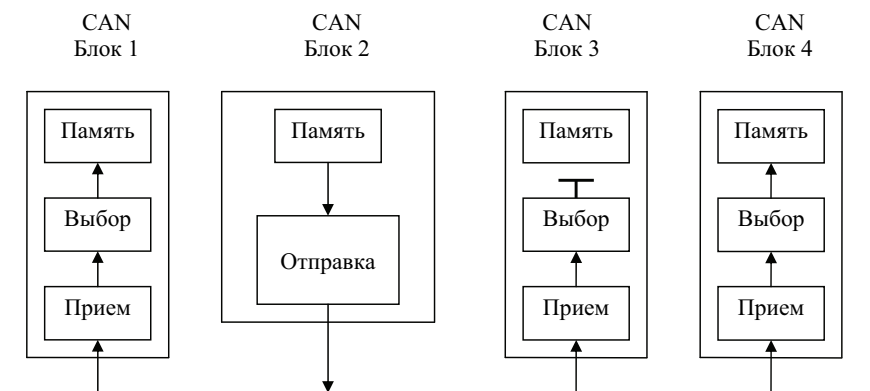


Рис. 2.6. Схема адресации и приемочной проверки

2.4. Общие сведения о применяемых средствах в электронных системах двигателей

Современный двигатель обладает значительным количеством электронных и микропроцессорных систем различного назначения и уровня сложности, что определило разнообразие в элементной базе устройств.

Понятие электронной системы является более общим, нежели понятие микропроцессорной системы. В самом общем смысле под электронной системой понимается система, построенная на радиоэлектронных элементах. Для четкого понимания различия между электронной и микропроцессорной системами введем их понятие, причем для первой в более узком смысле.

Электронная система – это система (узел) двигателя, алгоритм функционирования которого определяется принципиальной электрической схемой блока управления или всего узла. При этом технически электронный блок управления (ЭБУ) или весь узел может быть выполнен на дискретных и (или) интегральных радиоэлементах, а изменение алгоритма работы системы или узла невозможно без изменения электрической схемы.

Микропроцессорная система – это система двигателя, алгоритм функционирования которой определяется программой процессора электронного блока управления. Таким образом, в данной системе всегда есть блок управления на основе микропроцессора и для изменения алгоритма работы системы требуется изменить программу микропроцессора.

Автомобильный двигатель представляет собой систему, состоящую из отдельных подсистем: системы топливоподачи, зажигания, охлаждения, смазки и т. д. Все системы связаны друг с другом и при функционировании они образуют единое целое.

Применение электронных систем привело к возникновению новой области техники – автомобильной электроники. В иностранной и отечественной литературе в качестве синонима автомобильной электроники используются также термины «мехатроника», «микроэлектромеханика» (объе-

нение слов «механика» и «электроника») или «автоника» (объединение слов «автомобильная электроника»).

Датчик – это устройство, воспринимающее внешнее воздействие и реагирующее на них изменением электрических сигналов.

Датчики являются ответственным звеном в электронной системе управления или измерения и влияют на эффективность ее работы. Они обеспечивают абсолютные измерения того; чем надо управлять или что следует измерять, контролировать или диагностировать. Надежность датчиков всегда являлась проблемой в создании и эксплуатации технических систем.

Входные сигналы датчиков (внешние воздействия) могут иметь практически любую физическую или химическую природу. Поток света, температура, давление, колебания, перемещение, положение, скорость, концентрация ионов – все это примеры внешних воздействий. Конструкция датчиков меняется в зависимости от их назначения.

Датчики систем измерений параметров относятся к измерительно-информационным системам и используются для получения информации, для управления и диагностирования двигателей автомобилей. Они обеспечивают абсолютные измерения того, чем надо управлять или что следует измерять, будь это поток воздуха в двигателе, температура или количество топлива в баке.

Измерительный преобразователь – это средство измерения, предназначенное для выработки совместимого с измерительной схемой сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения.

Нормирующий преобразователь – это средство обработки результатов измерений, предназначенное для преобразования электрического сигнала от измерительного преобразователя в нормированный сигнал. В системах диагностики нашли применение различные типы измерительных преобразователей. К ним относятся индуктивные датчики, токовыхревые, тензодатчики, пьезодатчики, емкостные датчики, термодатчики и другие. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, которые описываются следующими характеристиками: амплитудой, частотой, фазой или цифровым кодом.

Все виды датчиков имеют свои преимущества и свои недостатки. Поэтому при создании диагностических средств наиболее важным является правильный выбор используемых измерительных преобразователей, который может быть сделан только на основе их глубокого изучения.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – это преобразователи, конвертирующие аналоговые данные, обычно напряжение, – в эквивалентный цифровой сигнал, совместимый с цифровым устройством обработки данных. Основными характеристиками АЦП являются: абсолютная и относительная погрешности, линейность, разрешающая способность, скорость преобразования, стабильность, способность не пропускать коды и стоимость.

Преобразователи кодов и сигналов. К ним относятся модуляторы-демодуляторы для передачи и приема сигналов при работе по каналу связи,

узлы тактовой синхронизации, блоки повышения достоверности, преобразователи последовательного кода в параллельный, устройства памяти.

Погрешность средств измерений – важнейшая метрологическая характеристика, определяемая как разность между показанием средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой величины. Для меры показанием является ее номинальное значение.

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) – функционально объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Электронная память микропроцессоров содержит операнды и программу, которую выполняет микропроцессор. Используются два типа электронной памяти: постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и оперативные запоминающие устройства (ОЗУ).

Микропроцессорное устройство – функционально и конструктивно законченное изделие, являющееся схемно-конструктивным соединением нескольких микросхем (в том числе одного или нескольких микропроцессоров), которое предназначено для выполнения одной или нескольких функций: получение, обработка, передача, преобразование информации и управление.

Микропроцессорная система – совокупность большого количества функциональных устройств, одним из которых является микропроцессор.

Любая микропроцессорная система состоит из системы памяти нескольких уровней: постоянного запоминающего устройства, оперативного запоминающего устройства, внешнего запоминающего устройства, а также из устройства ввода данных, устройства вывода данных, блоков соединений с датчиками и исполнительными механизмами.

Микропроцессор – сложное программно управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполненный в виде одной или нескольких интегральных микросхем повышенной степени интеграции. Микропроцессоры являются цифровыми устройствами, работающими с двоичными кодами. В виде двоичных кодов можно представить практически любые электрические сигналы.

Разрядность современных однокристалльных микропроцессоров достигает 64 бит. Микропроцессор выполняет роль центрального устройства управления и устройства арифметико-логических преобразований данных.

Интерфейс – совокупность цепей, объединяющих различные устройства и алгоритмы, определяющая порядок передачи информации между этими устройствами. Цепи интерфейса делятся на три группы: информационные, адресные и управляющие. Различают программные и физические интерфейсы.

Специальная ЭВМ – ЭВМ, предназначенная для реализации некоторым образом конкретного алгоритма: преобразование Фурье, математические расчеты, вычисление корреляционных функций, сигналов, контроля технического состояния и т. д.

Обработка и преобразование сигналов, поступающих от первичных датчиков в цифровые требуемой формы и величины, необходима для введения этих сигналов в микро-ЭВМ.

Микропроцессоры и микро-ЭВМ в измерительной информационной системе используют для связи приборов в единый комплекс и выполнения следующих функций: контроллерных, вычислительных, тестовых, сервисных и распределенной обработки данных. Кроме того, необходимо отметить функции метасистемы, обеспечивающей выполнение всех перечисленных выше функций и их согласование между собой.

Контроллерные функции информационных систем можно подразделить на ряд подфункций:

- управление измерительной цепью, то есть переключение каналов и диапазонов, подключение образцовых мер;
- управление измерительными усилителями, которые обычно выполняются чисто программными методами, иногда с участием таймера – с помощью микропроцессора и портов ввода-вывода;
- управление аналого-цифровым преобразователем;
- управление средствами общения с оператором – управление клавиатурой, индикаторами, звуковой сигнализацией и дисплеем;
- управление регистраторами, то есть печатающими устройствами, самописцами, графопостроителями, накопителями на магнитных носителях;
- управление внешней памятью в режиме двухстороннего обмена с дисками и дополнительными внешними модулями памяти.

Вычислительные функции. К ним относятся первичная, вторичная и окончательная обработка данных. Сюда относятся калибровка, нормализация, масштабирование, фильтрация, сжатие данных, распознавание, устранение ошибок, статистическая обработка, корреляционный, спектральный, амплитудно-временной анализ и др.

Тестовые функции. К этим функциям относятся обнаружение и локализация неисправности, в большинстве случаев до типового элемента. Известны три класса тестирования:

- с применением внешних микропроцессорных средств;
- полностью автономное тестирование;
- комбинированное.

Для первого класса применяются специальные тестеры микро-ЭВМ. Программы тестирования входят в программное обеспечение тестера или самой системы. Для второго класса – функции тестирования чаще всего выполняет основной процессор измерительно-информационной системы (ИИС), однако возможно наличие специального микропроцессорного узла, предназначенного только для автоматической диагностики. Тестирование производится в двух основных режимах: определения работоспособности, диагностики неисправности. При этом хранение программы тестирования может быть осуществлено либо во внешнем устройстве памяти, если оно имеется в ИИС, либо в тестовом ПЗУ.

Сервисные функции расширяют возможности измерительных приборов и систем со всесторонними микропроцессорами или микро-ЭВМ, уве-

личивающими объем информации, число режимов измерений и обработки, число параметров и их комбинаций, число дополнительных директив, объем визуальной и звуковой информации, число альтернативных вариантов измерений и обработки.

При этом можно выделить ряд этапов измерения и анализа с применением диалога: ввод задания, сбор и предварительную обработку первичной информации, вторичную обработку и интерпретацию результатов, вывод результатов исследования для интерпретации документации, архивации и управления.

Активаторы – это исполнительные устройства, которые фактически влияют непосредственно на управляемые параметры объекта управления. В конечном итоге эти влияния создают реальные параметры, которые характеризуют состояние объекта.

Системный модуль (блок управления) является собой конструктивно, функционально и энергетически законченный блок, который осуществляет функции сбора, обработки информации и создания электрических управляемых сигналов, достаточных по мощности для срабатывания исполнительных устройств. Основу системного модуля составляет один или несколько микроконтроллеров с устройствами ввода-вывода.

Драйверы активаторов – устройства управления соленоидами, реле, лампами накаливания, электродвигателями постоянного тока и шаговыми электродвигателями.

Электронный блок управления (ЭБУ) – составная часть микроконтроллера. ЭБУ обрабатывает входные сигналы от различных датчиков и переключателей, которые отражают информацию, представляя данные: частоту вращения коленчатого вала, момент впрыскивания смеси в каждый цилиндр и т. д.

Микроконтроллер – управляемое устройство, выполненное на одном или нескольких кристаллах, функциями которого является анализ и управление. Это специализированное устройство логического управления выполнения конкретной задачи, соответствующей программе, размещенной в запоминающем устройстве (памяти). Контроллер предназначен для управления объектами, он должен иметь устройства ввода (различные датчики) и вывода – команды на исполнительные механизмы (реле, пускатели, электродвигатели).

Основные задачи, которые стоят при проектировании микроконтроллера, - это выбор согласованных решений по структуре и параметрам отдельных составных элементов, их взаимных связей, разработка математического обеспечения, подбор датчиков и исполнительных устройств.

Современный микроконтроллер является сложной цифровой системой, размещенной на кристалле, в состав которой входит 8-, 16- или 32-разрядный процессор, внутренняя память программы (десятки килобайт), широкий набор интерфейсных и периферийных устройств, в частности портов ввода-вывода, таймеров, алфавитно-цифровых преобразователей и др. Их используют как составляющие устройств систем управления: информа-

ционно-измерительных, контрольно-диагностических, технологическими процессами, аппаратуры регистрации и контрольно-измерительной.

В настоящее время компания Intel производит несколько семейств микропроцессоров: MCS-51/151, MCS-351, MCS-96/195/296, количество моделей – более 100.

Распределенная обработка данных. Вычислительные функции распределяются между программируемыми контроллерами. Возможность распределения обработки данных обеспечивает высокую надежность управления измерительной информационной системой.

Таким образом, использование микропроцессоров и микро-ЭВМ в информационно-измерительной системе повышает точность, быстродействие, надежность, помехоустойчивость; расширяет динамический диапазон измерений; улучшает конструктивные показатели, качество метрологического обеспечения; расширяет многофункциональность системы; повышает удобство представления, хранения, регистрации, что способствует созданию интеллектуальных приборов и систем, улучшению ремонтпригодности аппаратуры за счет повышения степени взаимозаменяемости, самоконтроля, диагностики, автоподстройки.

Выбор микропроцессора или ЭВМ определяется техническим заданием на информационно-измерительную систему и зависит от необходимого числа входов-выходов, их типа (аналоговый, дискретный) и объема необходимой памяти.

Программное обеспечение содержит необходимые алгоритмы. В зависимости от необходимых параметров, в нем может устанавливаться почти неограниченное число элементов для хранения и обработки в виде параметров характеристик и многомерных программных карт.

Силовые выходы и выходные усилители позволяют увеличить мощность выходных сигналов микропроцессора (от 0 до 5 В, несколько миллиампер) до уровней, необходимых исполнительным механизмам (до уровня напряжения аккумулятора, силы тока в несколько ампер).

Электронные сети транспортных средств строятся на основе логической концепции Cartronic. Она допускает разделение системы электрооборудования автомобиля на удобно измеряемые подсистемы. Агрегаты или узлы с тесно связанными функциями (блоки с высокой скоростью взаимного обмена данными) соединяются в подсети. Такая концепция ведет к появлению подсетей с переменными требованиями к пропускной способности, хотя передача данных остается совместимой.

В пределах логического уровня все известные системы связи, разработанные для автомобилей, основаны на единой схеме последовательного включения блоков ЭБУ. В структурной схеме в качестве канала передачи данных от блока к блоку используются однопроводные или различные двухпроводные интерфейсы.

Микроконтроллеры микропроцессорного управления двигателем. Структурная схема обобщенного микроконтроллера показана на рис. 2.7 [10].

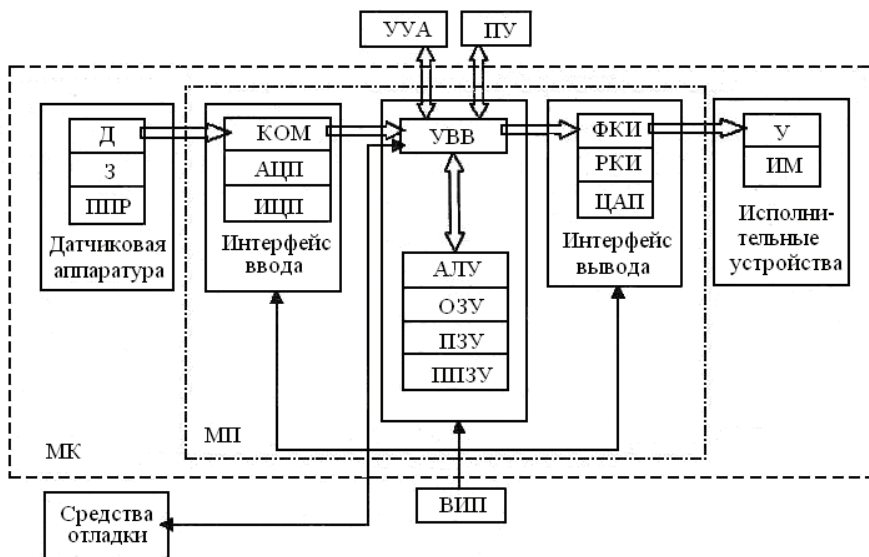


Рис. 2.7. Схема обобщенного микроконтроллера:

УУА – устройство управления автомобиля; ПУ – пульт управления; ВПП – вторичные источники питания. **Состав МК:** МП – микропроцессор. **Датчиковая аппаратура:** Д – датчики; З – задатчики; ППР – первичные измерительные преобразователи. **Исполнительные устройства:** У – усилители; ИМ – исполнительные механизмы. **Состав**

МП: УВВ – устройство ввода-вывода; АЛУ – арифметико-логическое устройство; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; ШПЗУ – перепрограммируемое запоминающее устройство. **Интерфейс ввода:** КОМ – коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИЦП – импульсно-цифровой преобразователь. **Интерфейс вывода:** ФКИ – формирователь командных импульсов; РКИ – распределитель командных импульсов; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

Основу микроконтроллера составляет микропроцессор с устройствами ввода и вывода (УВВ), который получает информацию от датчиковой аппаратуры через интерфейс ввода и управляет двигателем через интерфейс вывода. Кроме того, микропроцессор осуществляет диагностирование двигателя и самой МПСУ.

Диагностический интерфейс. Такой интерфейс применяется для подключения приборов (например, K78 520.570) для тестирования системы в сервисных центрах или автомастерских.

Интерфейс бортового контроллера связи (CAN). В зависимости от комплектации автомобиля система M-Motronic может оснащаться бортовым контроллером связи (CAN). Через интерфейс CAN 28 может осуществлять обмен данными с другими электронными системами управления (например, с блоком управления трансмиссией, антиблокировочной системой торможения и т. п.).

Микропроцессор имеет три типа памяти:

1. ОЗУ, необходимое для хранения текущей информации и обеспечения работы системы управления. Находящаяся в нем информация теряется при отключении питания (аккумуляторной батареи).

2. ПЗУ, в котором находятся программы, обеспечивающие управление и конкретные значения калибровок (калибровки – конкретные численные значения параметров программ) данной системы. Эти данные не могут быть изменены без замены ПЗУ или его перепрограммирования на специальных установках.

3. ППЗУ используется для временного хранения дополнительной информации, необходимой для работы системы. Информация в нем является энергонезависимой и может сохраняться при отключении питания микроконтроллера.

Микроконтроллер имеет связи как с УУА, так и с ПУ, на которых работает водитель (или наладчик системы в процессе отладки МПСУ, для чего предусмотрено подключение средств отладки).

Главный задатчик – датчик, установленный непосредственно на педали и фиксирующий ее положение. Другие задатчики конструктивно могут быть включены в пульт управления.

Датчики располагаются в разных системах двигателя. В системы встраиваются и исполнительные механизмы, а усилители иногда располагаются вблизи этих механизмов.

Остальные элементы микроконтроллера и вторичные источники питания ВИП обычно заключены в так называемый электронный блок управления – ЭБУ или ECU (Electronic Control Unit). Практически ЭБУ – это основной конструктивный блок микроконтроллера, вне которого находятся только датчики и исполнительные устройства. Поэтому термин «электронный блок управления» обычно используется как синоним электронного управляющего устройства, но более правильно считать ЭБУ составной частью микроконтроллера.

Контрольные вопросы

1. Какие основные принципы автоматического управления двигателем?
2. Чем отличаются понятия «электронная система» и «микропроцессорная система»?
3. В чем отличие датчика от преобразователя?
4. Какие средства электронных систем выполняют обработку и преобразование сигналов?
5. Чем определяется выбор микропроцессора и ЭВМ?
6. Что включается в программное обеспечение микропроцессорных систем?

2.5. Классификация систем впрыскивания топлива

Состав рабочей смеси в карбюраторном двигателе меняется в зависимости от температуры и плотности воздуха на входе. Это делает практически невозможным точное поддержание состава смеси.

Применение систем впрыскивания топлива взамен традиционных карбюраторов обеспечивает повышение топливной экономичности и снижение токсичности отработавших газов. Они позволяют в большей степени по сравнению с карбюраторами с электронным управлением обеспечивать процесс смесеобразования. Однако следует отметить, что системы впрыскива-

ния топлива сложнее систем топливоподачи с использованием карбюраторов из-за большего числа подвижных прецизионных механических элементов и электронных устройств и требуют более квалифицированного обслуживания в эксплуатации.

Классификация. По мере развития систем впрыскивания топлива на автомобили устанавливались механические, электромеханические и электронные системы (рис. 2.8). В основе их совершенствования было: повышение удельной мощности, снижение расхода топлива, уменьшение уровня шума и эмиссии ОГ.

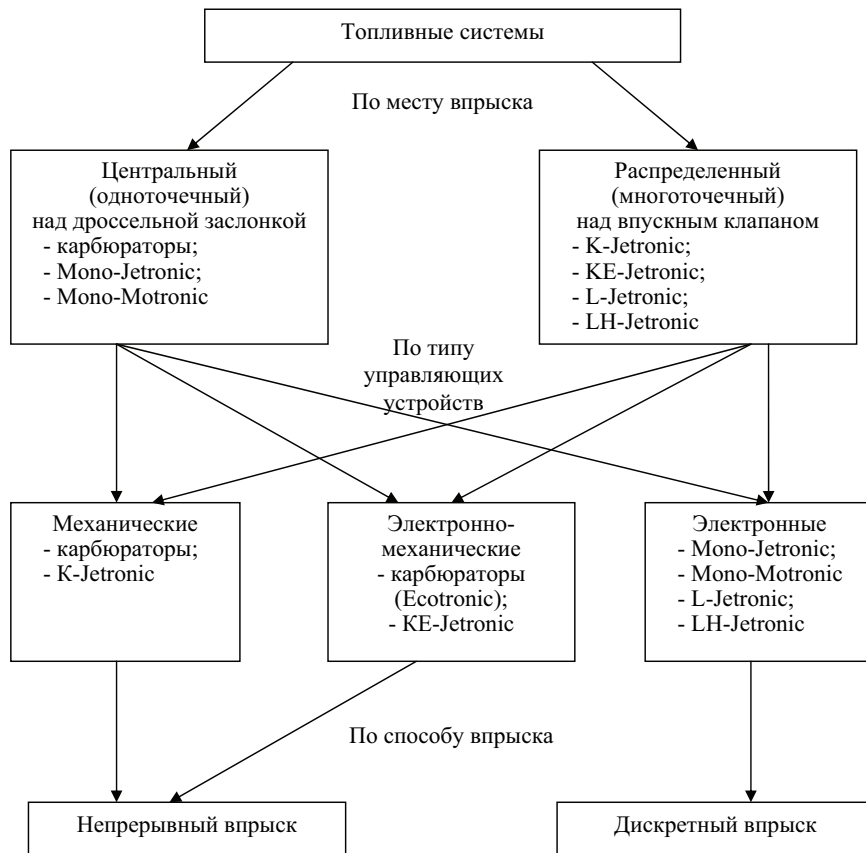


Рис. 2.8. Классификация топливных систем

К настоящему времени структурные схемы систем впрыскивания топлива в основном стабилизировались. Классификация способов впрыскивания топлива показана на рис. 2.9 [10].

Системы впрыска топлива различают по месту и способу подачи топлива, принципу работы и типу регулирования, а также конструктивному выполнению исполнительных компонентов системы дозирования топлива.

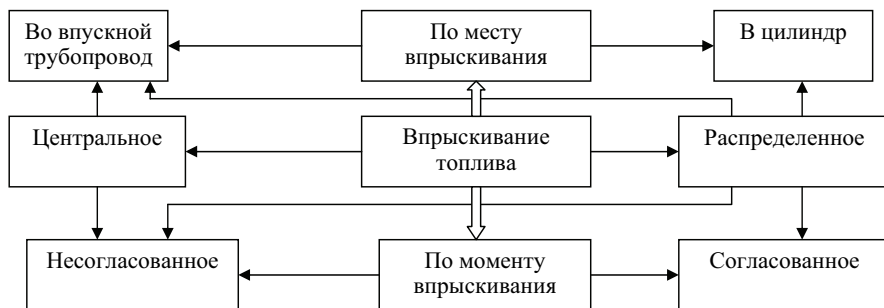


Рис. 2.9. Классификация способов впрыскивания топлива

По месту подачи топлива различают системы впрыска во впускной тракт или непосредственно в цилиндры двигателя.

По числу ЭМФ и схеме их размещения выделяют системы центрального (одноточечного, моновпрыскивания) и распределенного (многоточечного, группового) впрыскивания топлива. Система центрального впрыскивания топлива обеспечивает подачу топлива одной форсункой в ВТ, а распределенного – подачу топлива отдельными форсунками в ВТ или непосредственно в каждый цилиндр двигателя.

По принципу подачи различают системы впрыска с непрерывной, циклической и фазированной схемами подачи топлива.

По типу конструктивного выполнения узлов дозирования выделяют системы с различными плунжерными насосами, электромагнитными форсунками и регуляторами давления топлива.

По времени подачи топлива различают системы с одновременным, попарно-параллельным (групповым) и фазированным впрыском.

Одновременный впрыск сопровождается подачей топлива отдельными форсунками вместе во все цилиндры независимо от совершаемого такта двигателя, т. е. все форсунки открываются одновременно.

При попарно-параллельном (групповом) впрыскивании половина ЭМФ впрыскивают топливо одновременно. Так, на четырехцилиндровом двигателе при первом обороте коленчатого вала (КВ) впрыскивают топливо две ЭМФ, а при втором обороте КВ – следующие две ЭМФ, т. е. каждая форсунка подает общую порцию топлива для одного цилиндра за два впрыскивания. Впрыск топлива форсунками различных групп соответствует определенной величине угла поворота КВ двигателя. Независимо от положения впускных клапанов впрыск топлива производится дважды на каждый оборот КВ двигателя. Если впускной клапан закрыт, то топливо остается в ВТ до следующего открытия впускного клапана данного цилиндра.

Двойной впрыск топлива в такой системе осуществляют все ЭМФ одновременно при каждом обороте КВ двигателя. Однако они впрыскивают лишь половину требуемого количества топлива.

При последовательном впрыске подача топлива осуществляется по очереди в порядке работы цилиндров двигателя.

Фазированный впрыск обеспечивает подачу топлива каждой форсункой в конкретный момент времени для каждого цилиндра двигателя.

Известные системы центрального и значительная часть систем распределенного впрыска представляют собой схемы дискретного действия. В импульсных системах подача топлива производится порциями (дискретно) в определенные моменты положения КВ двигателя. В системах непрерывного впрыска форсунка работает постоянно, но изменяется лишь ее производительность. Непрерывная подача топлива имеет ряд серьезных недостатков и для современных двигателей ее считают устаревшей. В системах с прямым (непосредственным) впрыском топлива каждая форсунка размещена в стенке или головке цилиндра и подает топливо непосредственно в цилиндр на такте сжатия.

Величина давления топлива в системах распределенного впрыска составляет 0,3 МПа, а при непосредственном – 5,0 МПа. Систему центрального впрыска топлива в ряде случаев дополнительно оснащают пусковой форсункой, работающей при холодном двигателе и отключающейся автоматически по мере его прогрева. В современных конструкциях пусковую форсунку не применяют.

Система распределенного впрыска отличается многообразием технических решений. В основе своей работы такие системы используют механический и гидравлический принципы подачи топлива. Подобные системы представляют собой схемы непрерывного действия. Они разработаны и выпускаются фирмой Bosch. Наиболее широкое распространение получили системы «K-Jetronic», «KE-Jetronic», «KE-Motronic» различных версий. Наиболее перспективной может быть система впрыска топлива в полость цилиндра.

Схема распределенного впрыска обеспечивает подачу топлива в ВТ, на впускной клапан или на перемычку между впускными клапанами. Регулирование количества подаваемого топлива осуществляется путем изменения продолжительности открытия дозирующего клапана электромагнитной форсунки.

Впрыскивание бензина во впускной коллектор относится к внешнему смесеобразованию и должно обеспечивать гомогенную (равномерную) топливовоздушную смесь. Один из способов реализации внешнего смесеобразования является распределенное (многоточечное) дискретное впрыскивание бензина, предполагающее размещение форсунок на впускном коллекторе, количество которых равняется числу цилиндров. Бензин впрыскивается импульсами (дискретно) в область впускных клапанов, где он испаряется, пар перемешивается с воздухом, образуя готовую гомогенную топливовоздушную смесь. Благодаря использованию новых технологий управления

впрыскиванием удалось существенно сократить расход топлива и выбросы вредных веществ с отработавшими газами на режимах малых нагрузок.

Фазированный впрыск осуществляют во впускной патрубок, непосредственно в цилиндр или в дополнительную камеру (вихревую форкамеру). Регулирование подачи топлива при циклическом впрыске осуществляется аналогично путем изменения продолжительности открытия клапана ЭМФ.

Одновременный распределенный впрыск топлива обеспечивает его подачу во все цилиндры двигателя. В системах одновременного впрыска форсунки соединены параллельно в одну или несколько групп и управляются общим импульсом ЭБУ. Одновременный впрыск осуществляют синхронно или асинхронно.

При синхронном впрыске топлива начало его подачи определяется сигналами задающего генератора, т. е. синхронизированными с частотой вращения коленчатого вала (КВ). Синхронный впрыск является основным способом подачи топлива в современных системах как центрального, так и одновременного распределенного впрыска. При синхронном впрыске подача топлива форсунками обычно происходит один или два раза за оборот КВ. В некоторых режимах (пуск, режим холостого хода, полная нагрузка, режим ускорения) может быть переход на асинхронный впрыск, при котором моменты начала впрыска не связаны с частотой вращения КВ двигателя, а следуют через равные интервалы времени.

Последовательный впрыск топлива осуществляется отдельно в каждый цилиндр после открытия соответствующего впускного клапана в порядке работы цилиндров. В системах последовательного впрыска каждая форсунка связана с ЭБУ индивидуальной электрической цепью. Последовательная работа форсунок осуществляется по сигналам задающего генератора и фазового дискриминатора.

Распределенный впрыск топлива осуществляется в каждый цилиндр отдельной форсункой, установленной в соответствующий патрубок ВТ. Распыленная струя топлива, выходящая из форсунки, направлена в сторону впускного клапана. Распределенная подача топлива может быть одновременной или последовательной, а также синхронной или асинхронной.

Центральный впрыск топлива осуществляется одной форсункой, расположенной во впускном тракте между воздухоочистителем и дроссельной заслонкой. Распыленное форсункой топливо смешивается с воздухом в ВТ и далее поступает в порядке их работы. Впрыск топлива обычно осуществляется один или два раза за один оборот КВ двигателя, а состав смеси регулируется длительностью впрыскивания.

При внутреннем смесеобразовании время поступления смеси в цилиндры определяется работой газораспределительной системы. При внешнем – время поступления в цилиндры, время дозирования и смесеобразования различно.

Состав топливозоудушной смеси выбирается для каждого режима с учетом необходимости обеспечения требований к мощностным, экономическим и экологическим показателям.

По типу регулирования различают системы впрыска с разомкнутыми цепями управления двигателем и замкнутыми с обратной связью (λ -зонд).

Разомкнутая схема системы управления представляет собой линейную цепь ряда взаимодействующих элементов, соединенных и действующих последовательно один за другим.

Цепь управления содержит функциональные, системные и передающие элементы (рис. 2.10) [10]. В общем виде разомкнутая цепь содержит систему управления 3 и исполнительное устройство 7 с входным 1 и выходным 8 параметром. Электронный блок 10 и устройство управления 4 связаны между собой электрической цепью 9 с образованием системы управления 3.

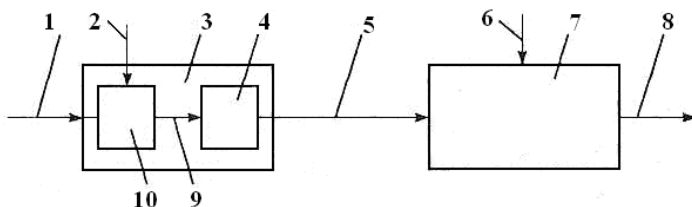


Рис. 2.10. Структурная схема системы управления двигателем с разомкнутой цепью:

1 – входной параметр; 2 – внешний фактор; 3 – система управления; 4 – устройство управления; 5 – выходной параметр; 6 – внешний параметр исполнительного устройства; 7 – исполнительное устройство; 8 – выходной параметр исполнительного устройства; 9 – электрическая цепь; 10 – блок управления

Внешний фактор 2 представляет собой возмущающее воздействие внешней среды на систему управления. Управление исполнительным устройством 7 осуществляется по состоянию выходного параметра 5 системы управления 3 и внешнего входного фактора 6.

Выходной параметр 8 исполнительного устройства 7 представляет собой переменную электрическую величину, обеспечивающую его контролирование в соответствии с функциональными параметрами системы управления.

В разомкнутой цепи система управления 3 регистрирует возмущения, измеряемые блоком управления 10. На другие внешние воздействия система не реагирует. Система управления 3 содержит необходимые функциональные элементы, обеспечивающие решение заданных условий, выполняемых разомкнутой цепью управления. На вход системы управления 3 поступает входной параметр 1, проходящий последовательно через ряд промежуточных звеньев и преобразуемый в выходной параметр 5 системы управления 3.

Разомкнутая линейная цепь системы управления функциональных элементов не обеспечивает получение оптимальных характеристик. Она более требовательна к точности изготовления функциональных элементов и поддержания режимов ее работы.

Функции управления разомкнутой системой подачи топлива и опережения зажигания в традиционных системах управления двигателем возло-

жены на водителя. Применение программы с жестким алгоритмом управления в разомкнутых системах впрыска топлива двигателя не обеспечивает получение необходимого уровня топливной экономичности и минимального выброса вредных веществ (ВВ). Система не учитывает многообразие комплекса взаимосвязанных факторов. В этом случае происходит значительное рассогласование действующей и оптимальной программ управления.

Подобные технические решения в виде разомкнутых систем использовали практически на всех автомобилях недавнего времени. Большинство современных систем впрыска топлива снабжены замкнутой цепью управления двигателем.

Автоматическое регулирование системы впрыска топлива обеспечивают путем превращения разомкнутой схемы управления в замкнутую, т. е. в систему управления с жесткой обратной связью. Современные автоматические системы управления двигателем выполнены адаптивными (самоприспосабливающимися, от лат. «adapto» - приспособлять). Подобная схема обеспечивает необходимый уровень надежной работы системы впрыска топлива в условиях быстрого изменения характеристик объекта управления.

Структурная схема системы управления с обратной замкнутой связью (рис. 2.11 [10]) содержит управляющее устройство 14, параметрический датчик 13 и ЭБУ 4, связанный через электрическую цепь 3 с датчиком 2 положения дроссельной заслонки и через выходной сигнал 6 ЭБУ, передающий командный параметр на привод 7 системы управления. Полученный выходной сигнал 8 привода системы управления поступает на регулируемую систему 9 (двигатель). Система управления через выходной сигнал 12 связана с датчиком (λ -зондом), размещенным в канале электрической цепи 15 обратной связи.

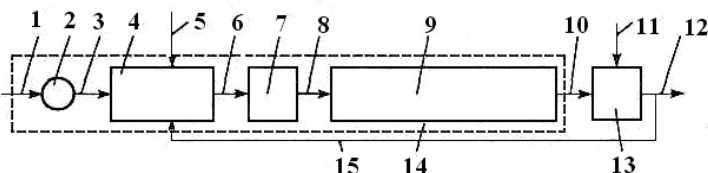


Рис. 2.11. Структурная схема системы управления двигателем с обратной связью:

1 – входной параметр; 2 – датчик положения дроссельной заслонки; 3 – электрическая цепь сигнала управления; 4 – ЭБУ; 5 – внешний фактор; 6 – выходной сигнал; 7 – электрический привод системы управления; 8 – выходной сигнал привода; 9 – регулируемая система (двигатель); 10 – выходной параметр системы управления; 11 – возмущающий фактор; 12 – выходной сигнал системы управления; 13 – параметрический датчик; 14 – управляющее устройство; 15 – электрическая цепь обратной связи

Входной управляющий параметр 1 через ряд промежуточных элементов формирует необходимую величину выходного сигнала 12 замкнутой системы управления. Выходной сигнал 6 электрической цепи блока управления 4 формируется под воздействием входного 1 и внешнего факторов 5.

Возмущающий параметр 11 параметрического датчика 13 оказывает на замкнутую систему переменное возмущающее воздействие.

Параметрический датчик 13 по электрической цепи 15 передает сигналы выходного параметра 12, величина которого пропорциональна значениям выходного параметра 10 управляющего устройства 14. Регулируемая система (двигатель) 9 снабжена системой управления процессами подачи топлива двигателя и исполнительным механизмом управления.

Величина выходного сигнала 12 изменяется адекватно изменению входного параметра 1. Дроссельная заслонка обеспечивает изменение сигнала 12 обратной связи адекватно изменению сигнала входного управляющего параметра 1 и выдает сигнал на вход промежуточных устройств замкнутой системы управления.

Электрический привод 7 регулируемой системы 9 получает обобщенный сигнал от различных датчиков через промежуточные элементы. Входным параметром рассматриваемой системы управления является величина открытия дроссельной заслонки, момент зажигания и состав горючей смеси. Законы управления этими параметрами различны. Водитель изменяет величину угла открытия дроссельной заслонки. Изменение величины расхода воздуха сопровождается изменением количества топлива и величины угла опережения зажигания.

Выходной параметр 12 представляет собой переменную электрическую величину, которая непрерывно измеряется и сравнивается с входным параметром. Управление в замкнутом контуре обеспечивает действие возмущающего фактора 11 параметрического датчика 13 в замкнутой цепи управления. Водитель со своего рабочего места через воздушную заслонку воздействует на электрическую цепь 3 системы управления, входным параметром которой является электрический сигнал датчика устройства подачи воздуха.

Система управления двигателем по обратной электрической связи 15 сообщена с датчиком положения дроссельной заслонки (ДПДЗ) 2. Приведенная система по электрическим цепям получает сигналы действий водителя через датчик расхода воздуха, связанный с педалью управления. В процессе движения водитель по желанию изменяет величину угла открытия дроссельной заслонки, обеспечивающей необходимый расход воздуха. В качестве первичной информации служат сигналы датчиков верхней мертвой точки (ВМТ), положения распределительного вала, углового положения КВ двигателя, массового расхода воздуха (или давления в ВТ) и детонации. Замкнутая система обеспечивает необходимую точность поддержания требуемых параметров по сравнению с разомкнутой системой.

Структурная схема замкнутой системы топливоподачи двигателя с обратной связью приведена на рис. 2.12 [10]. Система снабжена нейтрализатором ОГ с датчиком кислорода 4 (λ -зонд), размещенным в цепи обратной связи, и исполнительным органом 8 подачи топлива. Двигатель 2 через электрическую цепь 1 получает сигнал состава горючей смеси от исполнительного органа 8 и через электрическую цепь 3 сообщается с датчиком ки-

слорода 4. Электронный блок управления 6 с помощью электрического сигнала через цепь обратной связи 7 связан с исполнительным органом 8.

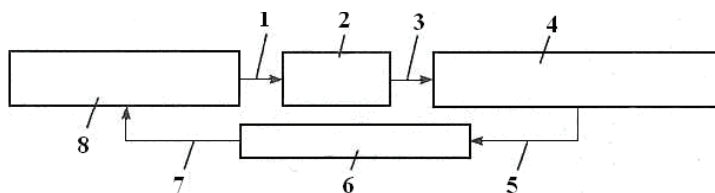


Рис. 2.12. Упрощенная структурная схема системы топливоподачи с обратной связью:

1 – электрическая цепь передачи сигнала исполнительного органа (α); 2 – двигатель; 3 – электрическая цепь передачи сигнала управления (α_{oz}); 4 – датчик кислорода; 5 – электрический сигнал датчика кислорода; 6 – ЭБУ; 7 – электрический сигнал обратной связи; 8 – исполнительный орган подачи топлива

Исполнительный орган 8 обеспечивает изменение состава горючей смеси (α) входного сигнала. Величина концентрации отдельных компонентов вредных веществ ОГ двигателя 2 позволяет оценить коэффициент избытка воздуха прореагировавшей горючей смеси. Датчик 4 кислорода вырабатывает электрический сигнал 5, зависящий от состава ОГ двигателя 2. ЭБУ 6 по сигналам датчика кислорода поддерживает необходимое соотношение воздух/топливо, обеспечивающее наиболее эффективную работу нейтрализатора. При этом электронный блок 6 вырабатывает электрический сигнал 7, приводящий в действие исполнительный орган 8, который обеспечивает регулирование величины подачи топлива (α), поступающего в двигатель 2. Мгновенное значение коэффициента избытка воздуха поддерживается на уровне $\alpha=1$.

В системе регулирования α_{oz} определяют путем измерения концентрации кислорода в ОГ с помощью λ -зонда, на выходе которого появляется напряжение, пропорциональное величине коэффициента избытка воздуха. Полученную величину α_{oz} система сравнивает с заданным значением α . При наличии отклонения расчетной величины α от заданной исполнительный сигнал регулятора по сигналам ЭБУ изменяет продолжительность впрыскивания. Регулирование осуществляется с помощью перемножающего звена ЭБУ, учитывающего различные корректировочные факторы. ЭБУ 6 по сигналу λ -зонда усиливает и корректирует длительность импульса впрыска ЭМФ, обеспечивая получение необходимой величины управляемого параметра.

Продолжительность впрыскивания определяется расчетным путем на основании сигналов датчиков системы управления и в зависимости от алгоритмов топливоподачи, заложенных в блок управления. Расчет продолжительности впрыскивания можно разделить на два основных этапа: первый этап – жесткое задание τ_i с основного алгоритма топливоподачи заложенного в электронный блок управления. Второй этап – гибкая коррекция в зависимости от реального состава топливоздушнoй смеси по сигналам λ -зонда. В зависимости от режима работы двигателя может реализовываться

тот или иной вариант задания продолжительности впрыскивания. Работа двигателя – без обратной связи по λ -зонду осуществляется при запуске, начальном этапе прогрева, при резком ускорении, при торможении. В этом случае контроль состава смеси не проводится и τ_i устанавливается по жесткой зависимости от сигналов основных датчиков системы.

На всех остальных режимах действует обратная связь по λ -зонду и учитывается реальный состав топливовоздушной смеси. Принцип работы обратной связи. Как известно двухуровневый λ -зонд не может определять точное состояние смеси и коэффициент избытка воздуха α . При работе двигателя на обедненной смеси, когда в отработавших газах остается большое количество кислорода, не вступившего в реакцию (1,09-2%), в информационном канале λ -зонда напряжение будет от 100 мВ до 500 мВ.

Контрольные вопросы

1. Привести классификацию систем впрыскивания топлива.
2. Привести отличительные особенности впрыска топлива по месту и способу подачи топлива.
3. Какие особенности фазированного впрыска топлива?
4. Какие самые распространенные виды применения систем распределенного впрыска?
5. Каким способом производится регулирование количества подаваемого форсункой топлива?
6. Как осуществляется центральный впрыск топлива?
7. Привести структурные схемы автоматического управления подачей топлива с разомкнутой и с обратной замкнутой связью.

2.6. Системы впрыска бензиновых двигателей

В отличие от карбюраторной система электронного впрыска постоянно следит с помощью многочисленных датчиков за всеми параметрами, которые определяют состав смеси, и может очень быстро реагировать на изменения режима движения автомобиля. Таким образом, появляется возможность очень точного поддержания состава смеси при любых режимах работы двигателя.

Программа ЭБУ позволяет рассчитать базовое значение длительности впрыска. Это время, в течение которого ЭБУ держит форсунку открытой, обычно оно измеряется миллисекундами. Информация с различных датчиков, к числу которых относятся датчики расхода воздуха, положения дроссельной заслонки, температуры воздуха и охлаждающей жидкости, поступает в ЭБУ, который модифицирует длительность впрыска в зависимости от действительных значений указанных параметров, чтобы поддерживать оптимальный состав смеси для различных условий движения. ЭБУ управляет также и холостым ходом двигателя с учетом его температуры и загрузки на холостых оборотах.

Системы впрыска бензиновых двигателей отличаются от систем впрыска дизелей по месту образования топливовоздушной смеси. Существуют системы впрыска с внешним и внутренним смесеобразованием [10, 11].

Системы впрыска с внешним смесеобразованием. В системах с внешним смесеобразованием рабочая смесь образуется за пределами камеры сгорания, во впускном коллекторе. Внутри этой группы систем впрыска имеются подгруппы:

- системы многоточечного (распределенного) впрыска топлива (Multi Point Injection);
- системы одноточечного впрыска топлива (Single Point Injection);
- последовательный впрыск.

2.6.1. Система многоточечного впрыска топлива

В такой системе каждый цилиндр имеет свою форсунку, топливо впрыскивается непосредственно на впускной клапан каждого цилиндра. Эволюция этой системы впрыска прошла следующие этапы (и продолжает совершенствоваться):

1. Механическая система впрыска топлива **K-Jetronic**. В ней масса впрыскиваемого топлива определяется дозирующим, распределительным устройством, от которого топливо поступает в форсунку, открывающуюся при определенном давлении. Затем происходит постоянный впрыск топлива;

2. Механическая система **L-Jetronic** с механической воздушной заслонкой (рис. 2.13).

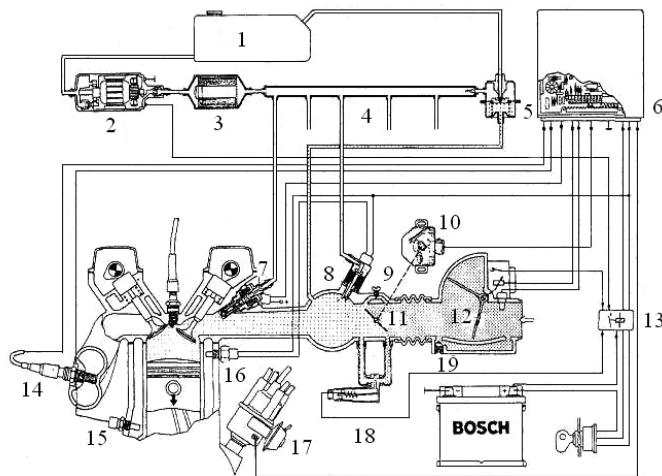


Рис. 2.13. Общая схема L-Jetronic:

- 1 – топливный бак; 2 – бензонасос; 3 – топливный фильтр; 4 – распределительная трубка; 5 – регулятор давления; 6 – блок управления; 7 – форсунка; 8 – пусковая форсунка; 9 – регулировочный винт холодного хода; 10 – выключатель дроссельной заслонки; 11 – дроссельная заслонка; 12 – расходомер воздуха; 13 – блок реле; 14 – лямбда-зонд; 15 – NTC II; 16 – реле времени; 17 – распределитель зажигания; 18 – дополнительная воздушная заслонка; 19 – регулировочный винт CO

Разновидностями системы L-Jetronic являются:

- **L1-Jetronic**. Расходомер воздуха с заслонкой, 6- или 7-контактным разъемом и контактом управления бензонасосом. Форсунки с внутренним сопротивлением 2,4 Ом, с дополнительным сопротивлением или регулируемым по току оконечным каскадом;

- **L2-Jetronic**. Digijet – специальная разработка VW;

- **LE1-Jetronic**. Расходомер воздуха с заслонкой и 5-контактным разъемом. Форсунки с внутренним сопротивлением 16 Ом. Отключение подачи топлива;

- **LE2-Jetronic**. Аналог LE1, но с расширенными функциями блока управления;

- **LU-Jetronic**. Аналог LE, но с лямбда-регулированием;

- **LH2-Jetronic**. Расходомер воздуха с нитью накала;

- **LH3-Jetronic**. Пленочный расходомер воздуха, диагностика с помощью KTS;

- **LH4-Jetronic**. Расходомер воздуха с нитью накала, последовательный впрыск;

- **L3-Jetronic**. Расходомер воздуха с заслонкой и блоком управления.

3. Электронно-механическая система впрыска топлива **KE-Jetronic**, это та же система K-Jetronic, дополненная электроникой, которая управляет работой бензонасоса и дозатора-распределителя. Электроника обеспечивает более точное управление впрыском в разных режимах работы двигателя.

4. Электронные системы впрыска топлива **L-Jetronic**, **LH-Jetronic** (и более поздние разработки – интегрированные системы управления двигателем **Motronic**, **M-Motronic**, **ME-Motronic**). В этих системах обеспечивается прерывистый впрыск топлива через форсунки с электромагнитным управлением.

Motronic – название системы управления двигателем, которая объединяет функции разомкнутого и замкнутого контуров управления бензиновым двигателем в одном электронном блоке управления. В связи с требованиями норм по снижению токсичности ОГ эта система получила широкое распространение. На сегодня в новых разработках двигателей широко используются системы Motronic от фирмы Bosch (рис. 2.14).

В системе Motronic с помощью сенсорных датчиков и датчиков заданных значений осуществляется сбор рабочих данных для разомкнутого и замкнутого контуров управления двигателем.

Сенсорные датчики определяют физические и химические параметры и на их базе делают вывод о текущем режиме работы двигателя. Примеры таких параметров:

- температура двигателя;
- масса всасываемого воздуха;
- давление во впускном трубопроводе;
- угол поворота дроссельной заслонки;
- коэффициент избытка воздуха;
- частота вращения коленчатого вала;
- положение распределительного вала;

- скорость движения автомобиля.

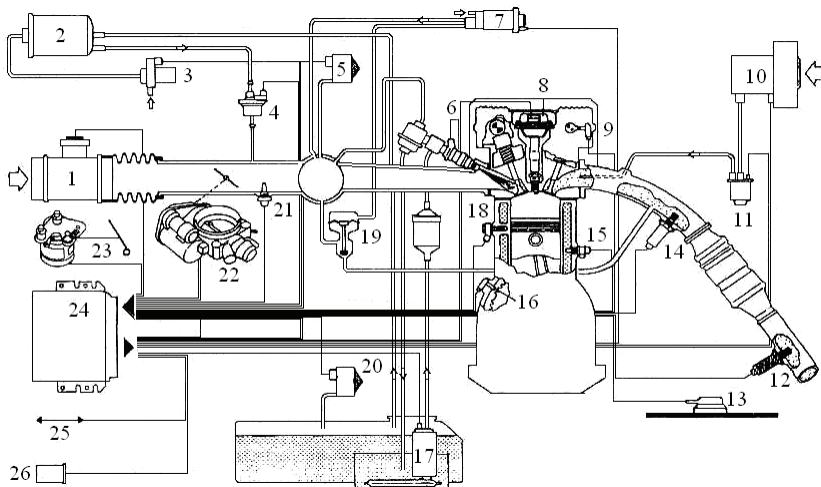


Рис. 2.14. Общая схема Motronic:

1 – расходомер воздуха с пленочным термоэлементом; 2 – угольный фильтр; 3 – запорный клапан; 4 – магнитный клапан вентиляции топливного бака; 5 – датчик давления во впускном коллекторе; 6 – форсунка; 7 – клапан рециркуляции выхлопного газа; 8 – одноискровая катушка зажигания; 9 – датчик распределительного вала; 10 – насос подачи вторичного воздуха; 11 – клапан системы подачи вторичного воздуха; 12 – лямбда-зонд; 13 – датчик ускорений кузова; 14 – лямбда-зонд; 15 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 16 – датчик частоты вращения и синхронизации; 17 – электробензонасос; 18 – датчик детонации; 19 – клапан рециркуляции выхлопного газа; 20 – датчик разности давлений; 21 – датчик температуры воздуха; 22 – серводвигатель дроссельной заслонки; 23 – датчик положения педали газа; 24 – блок управления; 25 – диагностический разъем; 26 – диагностическая лампа

Система Motronic выполняет две функции. Первая – это дозирование точного количества топлива в соответствии с посланной массой воздуха; вторая – создание искрового разряда в самый оптимальный момент зажигания. С интеграцией этих функций в одну систему появилась возможность максимально адаптировать одну относительно другой – зажигание и впрыскивание топлива.

С помощью каналов связи, например, бортового контроллера связи (CAN), система Motronic может обеспечивать связь между блоком управления этой системы и другими электронными системами автомобиля. Поколения вариантов этой системы (M1, M2, M3) отличаются содержанием аппаратных средств (микропроцессорами и модулями).

Количество впрыскиваемого топлива в системах M-Motronic и ME-Motronic определяется длительностью открытия форсунки при заданном давлении топлива (рис. 2.14, 2.15). Существенными отличительным признаком системы ME-Motronic по сравнению с системой M-Motronic является электронное управление системами воздухоподачи (дроссельной за-

слонкой), топливоподачи, зажиганием и другими характеристиками двигателя, которые влияют на его КПД.

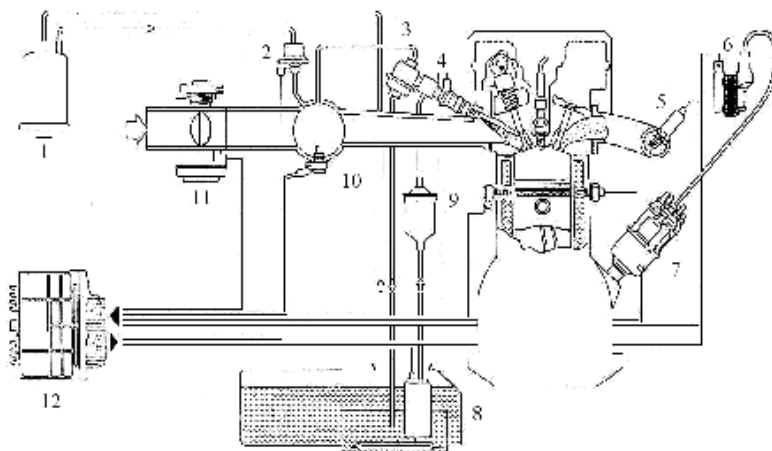


Рис. 2.15. Общая схема Motronic MP

1 – расходомер воздуха с пленочным термоэлементом; 2 – угольный фильтр; 3 – запорный клапан; 4 – магнитный клапан вентиляции топливного бака; 5 – датчик давления во впускном коллекторе; 6 – форсунка; 7 – клапан рециркуляции выхлопного газа; 8 - одноискровая катушка зажигания; 9 – датчик распределительного вала; 10 – насос подачи вторичного воздуха; 11 – клапан системы подачи вторичного воздуха; 12 – лямбда-зонд; 13 – датчик ускорений кузова; 14 – лямбда-зонд; 15 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 16 – датчик частоты вращения и синхронизации; 17 – электробензонасос; 18 – датчик детонации; 19 – клапан рециркуляции выхлопного газа; 20 – датчик разности давлений; 21 – датчик температуры воздуха; 22 – серводвигатель дроссельной заслонки; 23 – датчик положения педали газа; 24 – блок управления; 25 – диагностический разъем; 26 – диагностическая лампа

Система MED-Motronic является дальнейшим совершенствованием системы ME-Motronic за счет введения в топливную систему контура управления непосредственным впрыском топлива высокого давления (с обратной связью) и системы выпуска с катализатором нейтрализации NO_x с интегрированной системой управления трансмиссией.

Система Mono-Jetronic требует меньше затрат на ее производство, что дало возможность оборудовать системой Jetronic небольшие автомобили. Система Mono-Motronic оснащена полностью электронным зажиганием и микропроцессором. Система Mono-Jetronic предложена как Mono-Motronic.

Система MED-Motronic. В системах M-Motronic и ME-Motronic форсунка должна обеспечивать как гомогенное распределение рабочей смеси при впрыскивании топлива во впускной трубопровод, так и ее локально ограниченное послышное распределение в камере сгорания.

В системе управления двигателем MED-Motronic непосредственного впрыска топлива двигатель работает на гомогенной стехиометрической смеси ($\lambda=1$) во всем рабочем диапазоне.

По сравнению с системой ME-Motronic система MED-Motronic требует намного большей расчетной мощности.

На рис. 2.16 показан пример системы MED-Motronic.

Основное различие между системами MED- и ME-Motronic состоит в конструкции топливной системы и системы выпуска с накопительным каталитическим нейтрализатором NO_x . Далее приведены некоторые особенности этих типов систем.

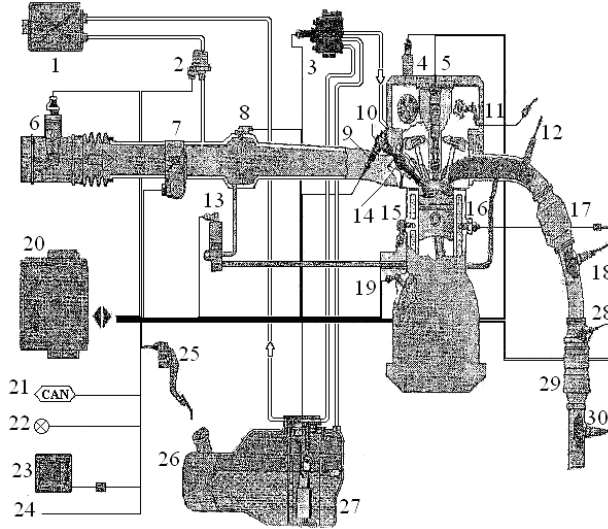


Рис. 2.16. Элементы электронного управления работой двигателя в системе MED-Motronic:

1 – абсорбер с активированным углем; 2 – клапан регенерации; 3 – насос высокого давления с интегрированным электромагнитным клапаном управления количеством подаваемого топлива; 4 – исполнительные элементы и датчики изменяющихся фаз газораспределения за счет поворота распределительного вала; 5 – катушка зажигания со свечой зажигания; 6 – термоанемометрический пленочный расходомер массы воздуха с интегрированным датчиком температуры; 7 – дроссельное приспособление (электронное управление дроссельной заслонкой EGAS с датчиком положения заслонки); 8 – датчик давления во впускном трубопроводе; 9 – датчик давления топлива; 10 – топливный аккумулятор высокого давления; 11 – фазный датчик положения распределительного вала; 12 – лямбда-зонд перед дополнительным каталитическим нейтрализатором; 13 – клапан рециркуляции ОГ; 14 – форсунка высокого давления; 15 – датчик детонации; 16 – датчик температуры двигателя; 17 – дополнительный каталитический нейтрализатор (трехкомпонентный); 18 – лямбда-зонд с дополнительным каталитическим нейтрализатором (по заказу); 19 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 20 – блок управления двигателем; 21 – интерфейс бортового контроллера связи (CAN); 22 – лампа-индикатор неисправностей; 23 – интерфейс системы бортовой диагностики; 24 – интерфейс блока управления иммобилайзером; 25 – модуль педали газа с датчиком хода педали; 26 – топливный бак; 27 – встроенный в топливный бак модуль, содержащий топливный электроприводной насос, топливный фильтр и регулятор давления топлива; 28 – датчик температуры ОГ; 29 – главный каталитический нейтрализатор (трехкомпонентный с накопителем NO_x); 30 – лямбда-зонд за главным каталитическим нейтрализатором

Дроссельная заслонка. Дроссельное приспособление 7 (рис. 2.16) имеет такую же конструкцию, как и в системе ME-Motronic. Но если двига-

тель при послойном распределении рабочей смеси работает на малых оборотах ($<3000 \text{ мин}^{-1}$) при небольшой потребности в крутящем моменте дроссельная заслонка открыта на большой угол. При таком режиме работы крутящий момент регулируется не массой поданного воздуха, а количеством впрыснутого топлива. Поэтому наполнение цилиндра воздухом не отвечает величине результирующего крутящего момента.

Датчики для определения наполнения цилиндров воздухом. Определение наполнения в двигателе с непосредственным впрыском топлива происходит более сложным способом, чем при впрыскивании топлива во впускной трубопровод, потому что для снижения эмиссии NO_x при послойном распределении заряда смеси используется рециркуляция ОГ. Для того, чтобы использовать преимущество малого расхода топлива и сохранять низкий уровень токсичности ОГ, необходимы точный контроль и измерение массового расхода воздуха и возвращенных назад ОГ. Поэтому в двигателях с непосредственным впрыскиванием топлива используются два датчика наполнения цилиндров, с помощью которых может определяться массовый расход воздуха и ОГ. Для этого существует две возможности: с использованием термоанемометрического пленочного расходомера массы воздуха (НФМ) и датчика давления во впускном трубопроводе или датчика давления в выпускном трубопроводе и датчика атмосферного давления.

Термоанемометрический пленочный расходомер массы воздуха и датчик давления во впускном трубопроводе. С помощью расходомера 6 (рис. 2.16) определяется масса свежего воздуха, поступающего во впускной трубопровод. Эта информация может использоваться для определения парциального давления воздуха во впускном трубопроводе. Разница между измеренным давлением во впускном трубопроводе, измеренным с помощью датчика давления 8 и парциальным давлением воздуха позволяет сделать вывод о массе обратного потока ОГ (рециркуляция ОГ). В условиях работы на обедненной рабочей смеси рециркулирующие ОГ содержат часть несгоревшего кислорода, что может быть определено на основании измерения концентрации кислорода в ОГ, (лямбда-зонд).

Датчик давления во впускном трубопроводе и датчик атмосферного давления. С помощью соотношения давления над дроссельной заслонкой и температурой всасывание его воздуха, можно на базе значения угла поворота дроссельной заслонки рассчитать массовый расход свежего воздуха, проходящего через дроссельную заслонку. С помощью того же алгоритма расчетов определяется массовый расход рециркулирующих ОГ через клапан системы рециркуляции ОГ путем использования данных о давлении обратного потока ОГ. Для этого необходима точная информация о положении клапана системы рециркуляции ОГ. В обеих системах для определения температуры всасываемого воздуха используются датчики температуры.

При наличии расходомера НФМ датчик температуры может быть встроенным в расходомер, а при использовании отдельного датчика температуры его необходимо устанавливать перед дроссельной заслонкой.

Топливная система MED-Motronic состоит из контуров низкого и высокого давления. За счет этого система MED-Motronic заметно отличается от ME-Motronic, в которой форсунки подключены к контуру низкого давления. Существенным моментом является то, что количество топлива должно впрыскиваться в течение очень короткого времени. Для этого нужен сложный управляющий сигнал, который генерируется управляющим каскадом, интегрированным в блоке управления 20 (рис. 2.16).

Высокое напряжение, необходимое для получения искрового разряда, генерируется в системе MED-Motronic одноискровыми катушками зажигания, которые устанавливаются на свече зажигания 5 (рис. 2.16).

В системе MED-Motronic может осуществляться подача дополнительных порций воздуха, потому что за счет специфики режима работы двигателя происходит быстрое нагревание выпускного тракта. В отличие от впрыскивания топлива во впускной трубопровод, системы непосредственного впрыска топлива требуют использования каталитического нейтрализатора с накопителем NO_x . Он накапливает оксиды азота, которые не поддаются нейтрализации в трехкомпонентном каталитическом нейтрализаторе. Для этого система MED-Motronic переключается на режим гомогенной смеси с избытком топлива, при котором оксиды азота выпускаются из накопителя и химически нейтрализуются в трехкомпонентном каталитическом нейтрализаторе.

Так как двигатель с непосредственным впрыском топлива при послойном распределении рабочей смеси работает в целом на обедненной смеси, то для определения состава ОГ крайне необходим широкополосный лямбда-зонд, установленный перед каталитическим нейтрализатором.

В дополнение к известным рабочим характеристикам систем M- и ME-Motronic в системе MED-Motronic существует функция регистрации и учета давления в топливном аккумуляторе, осуществляемая отдельным датчиком.

На рис. 2.17 приведена схема бензинового впрыска системы Ford EEC V.

Структурная схема системы распределенного впрыска топлива приведена на рис. 2.18.

Система распределенного впрыска топлива (рис. 2.18 [11]) содержит впускной трубопровод 6 с впускным патрубком 2 и каналом 1, топливный трубопровод 7 со штуцером 4, воздушный патрубок 9 с дроссельной заслонкой. Трубопровод 7 снабжен патрубком подачи топлива 5, регулятором давления 11 со штуцером 10 и штуцером 12 обратного слива топлива.

Основными элементами системы распределенного впрыска являются расходомер воздуха, сообщенный с воздушным фильтром, ЭБУ и топливные ЭМФ 3, размещенные во впускном патрубке 2.

Система подачи воздуха содержит воздушную заслонку, размещенную в главном воздушном канале 8 с образованием додроссельного и задроссельного пространства, датчик температуры воздуха и регулятор холостого хода (РХХ). Впускной трубопровод 6 сообщен через штуцер 10 и резиновый

шланг с расходомером воздуха. ЭБУ связан через электрическую цепь с потенциометром и датчиком температуры воздуха.

Отдельные форсунки 3 осуществляют подачу топлива во впускные патрубки 2 каждого цилиндра. Они располагаются в корпусе головки блока цилиндров и отличаются относительно высоким сопротивлением обмоток (12-16 Ом).

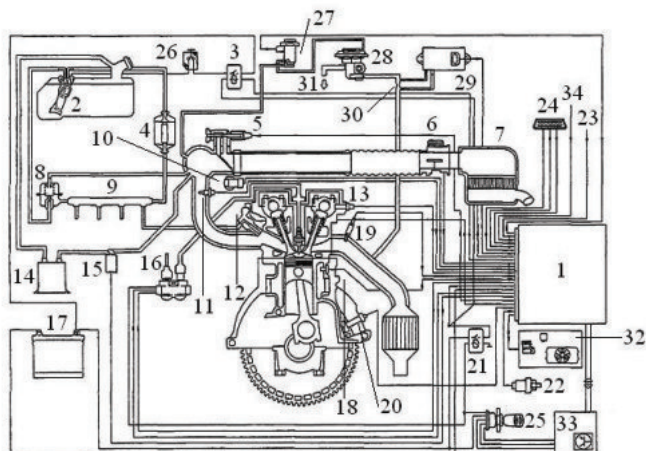


Рис. 2.17. Схема системы бензинового впрыска Ford EEC V:

1 – EEC V блок управления; 2 – погружной топливный насос; 3 – реле топливного насоса; 4 – топливный фильтр; 5 – регулятор холостого хода; 6 – массовый расходомер воздуха; 7 – воздушный фильтр; 8 – регулятор давления топлива; 9 – топливный аккумулятор; 10 – потенциометр дроссельной заслонки; 11 – датчик температуры воздуха; 12 – форсунка; 13 – фазовый датчик; 14 – угольный фильтр; 15 – клапан вентиляции топливного бака; 16 – катушка зажигания; 17 – аккумуляторная батарея; 18 – датчик температуры двигателя; 19 – лямбда-зонд; 20 – датчик числа оборотов/синхронизации; 21 – главное реле; 22 – выключатель гидроусилителя; 23 – компрессор кондиционера; 24 – диагностический разъем, тестер; 25 – выключатель зажигания; 26 – аварийный выключатель; 27 – регулятор рециркуляции выхлопа; 28 – клапан рециркуляции выхлопа; 29 – датчик дифференциального давления; 30 – точка измерения дифференциального давления; 31 – к впускному коллектору; 32 – управление кондиционером/вентилятором; 33 – иммобилайзер; 34 – октан-корректор

Исключение составляют форсунки ДВС с турбонаддувом, имеющие сопротивление обмотки 4-5 Ом. На некоторых автомобилях нового поколения топливо подают непосредственно в камеру сгорания (непосредственный впрыск).

Структурная схема системы распределенного впрыска топлива (рис. 2.19 [11]) содержит впускной трубопровод 6, топливный аккумулятор 5 с регулятором 9 давления топлива и дроссельный патрубок 4 с воздушной заслонкой 3.

Основными элементами системы распределенного впрыска являются расходомер 2 воздуха, сообщенный с воздушным фильтром, ЭБУ и топливные ЭМФ 7, размещенные во впускном канале 20. Насос 14 через трубопровод низкого давления 13 и штуцер 12 сообщен с топливным баком 11, а че-

си. В дальнейшем электрическим способом открываются ЭМФ во впускных каналах каждого цилиндра. ЭБУ контролирует сигналы функциональных датчиков, увеличивает или уменьшает продолжительность открытия ЭМФ, тем самым регулируя количество топлива, подводимого для создания оптимального состава горючей смеси.

При распределенном впрыскивании топливо подается в зону впускных клапанов каждого цилиндра группами форсунок без согласования момента впрыскивания с процессами впуска в каждый цилиндр (несогласованное впрыскивание) или каждой форсункой в определенный момент времени, согласованный с открытием соответствующих впускных клапанов цилиндров (согласованное впрыскивание). Системы распределенного впрыскивания топлива позволяют повысить приемистость автомобиля, надежность пуска, ускорить прогрев и увеличить мощность двигателя.

При распределенном впрыскивании топлива появляется возможность применения газодинамического наддува, расширяются возможности в создании различных конструкций впускного трубопровода. Однако у таких систем по сравнению с центральным впрыскиванием больше погрешность дозирования топлива из-за малых цикловых подач.

Идентичность составов топлива по цилиндрам в большей степени зависит от неравномерности дозирования топлива форсунками, чем от конструкции впускной системы.

В настоящее время в массовом производстве преобладает система под названием LH-Jetronic, которая является системой распределенного впрыска топлива во впускной трубопровод. Применяется как синхронный, так и асинхронный впрыск топлива. Главной особенностью этой системы является термоанемометрический расходомер воздуха, взамен расходомера на основе потенциометра с заслонкой.

Комплексная система управления бензиновым двигателем, пример которой приведен на рис. 2.20, обеспечивает оптимальную работу двигателя путем управления впрыском топлива, углом опережения зажигания, частотой вращения коленчатого вала двигателя на холостом ходу и проведением диагностики.

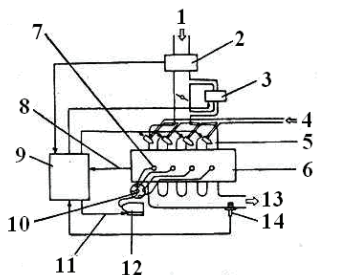


Рис. 2.20. Комплексная электронная система управления бензиновым двигателем

газы; 14 – датчик кислорода.

На рис. 2.20 приняты следующие обозначения: 1 – воздух; 2 – датчик расхода воздуха; 3 – исполнительное устройство управления частотой вращения коленчатого вала на холостом ходу; 4 – топливо; 5 – форсунка впрыска топлива; 6 – двигатель; 7 – свечи зажигания; 8 – частота вращения коленчатого вала двигателя; 9 – ЭБУ; 10 – распределитель зажигания; 11 – выходной сигнал; 12 – катушка зажигания; 13 – отработавшие

На рис 2.20 показана система распределенного впрыска, в которой форсунки установлены непосредственно перед каждым цилиндром. Управление карбюратором сводится к прецизионному регулированию состава топлива.

В результате повышается мощность, снижается токсичность отработавших газов, улучшаются другие характеристики двигателя.

Структурная схема системы впрыскивания топлива с программным управлением приведена на рис. 2.21. Особенно эффективна в отношении повышения топливной экономичности система распределенного впрыскивания топлива в сочетании с цифровой системой зажигания.

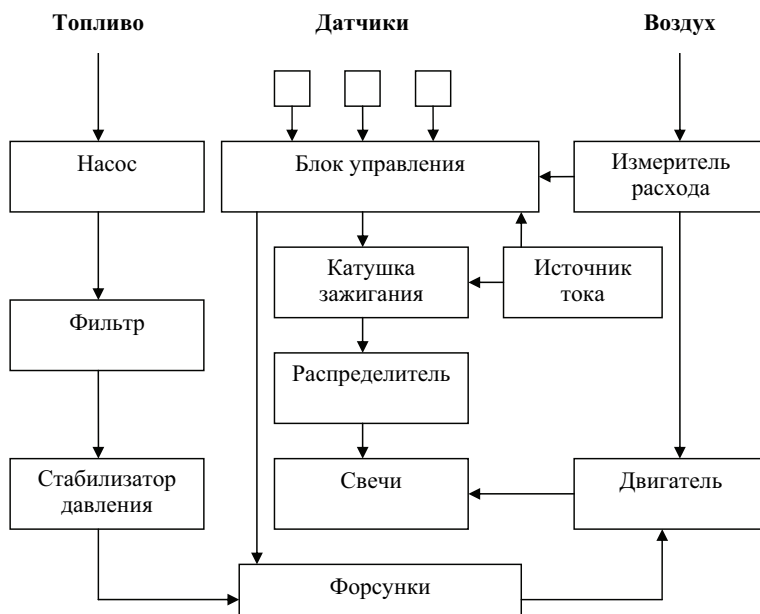


Рис. 2.21. Структурная схема системы впрыскивания топлива с программным управлением

2.6.2. Система одноточечного впрыска топлива

В этой системе (у Bosch имеется две конструкции такого впрыска - **Mono-Jetronic** и **Mono-Motronic**) впрыск осуществляется одной форсункой с электромагнитным управлением на все цилиндры. Основной элемент системы – блок центрального впрыска с электромагнитной форсункой, которая импульсно впрыскивает топливо в пространство над дросселем (рис. 2.22) [4, 11].

Структурная схема системы центрального впрыска (рис. 2.22) содержит впускной трубопровод 3, воздушный патрубок 7 с размещенной в нем форсункой 6 с электрическим разъемом 5 и трубопровод подачи топлива.

При открытии дроссельной заслонки 4 топливо из форсунки 6 поступает в виде факела через впускной трубопровод 3 во впускные патрубки 2, далее во впускные каналы 1, а затем в цилиндры 9 двигателя 8.

Подача топлива при центральном впрыске осуществляется в общий воздушный патрубок 7 одной форсункой 6, установленной над дроссельной заслонкой 4. Форсунка снабжена шестью распылителями, обеспечивающими необходимый уровень смесеобразования. Центральная форсунка характеризуется низким сопротивлением обмотки электромагнита (4-5 Ом).

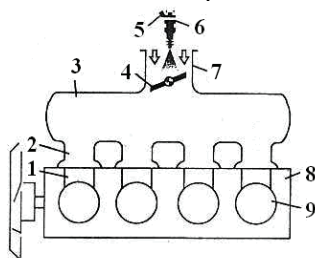


Рис. 2.22. Структурная схема системы центрального впрыска топлива:

1 – впускной канал; 2 – впускной патрубок; 3 – впускной трубопровод; 4 – дроссельная заслонка; 5 – электрический разъем; 6 – топливная форсунка; 7 – воздушный патрубок; 8 – двигатель; 9 – цилиндр

При центральном впрыскивании топливо подается одной форсункой, устанавливаемой на участке до разветвления впускного трубопровода. Существенных изменений в конструкции двигателя нет. Система центрального впрыскивания практически взаимозаменяема с карбюратором и может применяться на уже эксплуатируемых двигателях. При центральном впрыскивании обеспечивается большая точность и стабильность дозирования топлива.

Система Mono-Jetronic предназначена для четырехцилиндровых двигателей с центрально расположенной форсункой.

Система использует дроссельную заслонку для дозирования воздуха на впуске. Впрыск топлива осуществляется распылением над дроссельной заслонкой. Распределение топлива по цилиндрам происходит во впускном коллекторе. Различные датчики контролируют все основные рабочие характеристики двигателя. Они применяются для расчета управляющих сигналов для форсунок и других исполнительных устройств системы. В электронный блок управления поступают следующие сигналы:

- угол поворота дроссельной заслонки;
- частота вращения коленчатого вала;
- температура всасываемого воздуха и охлаждающей жидкости;
- положение дроссельной заслонки;
- содержание кислорода в отработавших газах;
- выбранная передача в автоматической трансмиссии;
- характеристика системы кондиционирования воздуха;
- состояние компрессора в климатической установке (включен/выключен).

Система Mono-Jetronic выполняет следующие функции:

- подача топлива;
- определение параметров работы двигателя;
- обработка параметров работы двигателя;
- управление процессом впрыскивания.

2.6.3. Системы впрыска с внутренним смесеобразованием

Резервы снижения расхода топлива у двигателей с внешним смесеобразованием (с подачей топлива во впускной трубопровод) практически отсутствуют. Поэтому автомобили оснащают двигателями с непосредственным впрыскиванием топлива в цилиндр под управлением микропроцессорных систем.

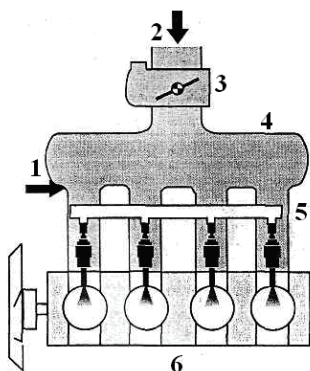


Рис. 2.23. Система непосредственного впрыска топлива:

1 – топливная магистраль; 2 – воздух; 3 – дроссельная заслонка; 4 – впускной коллектор; 5 – форсунка (форсунки); 6 – блок цилиндров

автомобили примерно с 1997 года. Конструктивно эта система похожа на систему распределенного впрыска с электронным управлением (имеется топливный аккумулятор и электромагнитные форсунки). У другого производителя, Toyota, в этой системе используются электромагнитные насос-форсунки и конструктивно она похожа на систему впрыска дизельных двигателей с насос-форсунками.

Функциональные схемы систем впрыскивания топлива во впускной коллектор и в цилиндр представлены на рис. 1.32 [4]. По принципу работы обе системы являются аккумуляторными, имеют похожие по назначению компоненты (1-12). Отличаются уровнем давления и узлами 13-16, которые обеспечивают высокое давление. Система впрыскивания топлива во впускной коллектор (рис. 1.32, а) имеет низкое давление 250-300 кПа, а система высокого давления – 5,0-14 МПа (рис. 1.32, б).

Подача топлива в системах с непосредственным впрыском происходит при более высоком давлении. Топливную систему условно разделяют на две составляющие (рис. 1.32, б):

- контур низкого давления;
- контур высокого давления.

В таких двигателях топливо впрыскивается электромагнитными форсунками непосредственно в камеру сгорания каждого цилиндра (см. рис. 2.23). Такой способ впрыска топлива позволяет двигателю работать на сверхобедненных смесях, обеспечивая высокую экономичность. Ранние реализации этой системы впрыска были чисто механическими, самая известная из них «Kugelfischer» для автомобилей BMW.

Современные системы непосредственного впрыска реализуются производителями в различных конструкциях. Например, у японского производителя Mitsubishi она называется GDI и устанавливается на авто-

Контур низкого давления похож на тот, который используется в системах впрыска во впускной трубопровод. Контур высокого давления содержит:

- насос высокого давления;
- топливный аккумулятор;
- датчик давления;
- клапан регулировки давления;
- ограничитель давления.

В системах с непосредственным впрыском топлива существует послойное распределение смеси. Это значит, что воспламеняющаяся рабочая смесь в момент зажигания располагается вокруг электродов свеч зажигания. Остальное пространство камеры сгорания заполнено негорючим газом без примеси топлива или очень бедной смесью. Такое распределение смеси позволяет достичь низких затрат топлива. К такой системе можно отнести силовые агрегаты с прямым впрыском FSI. Аббревиатура FSI расшифровывается как Fuel Stratified Injection, что в переводе с английского означает «послойное впрыскивание топлива». Топливная аппаратура двигателя с системой впрыска FSI сделана по аналогии с дизельными агрегатами: насос высокого давления нагнетает бензин в топливный аккумулятор, общий для всех цилиндров. Топливо впрыскивается непосредственно в камеру сгорания через форсунки с электромагнитными клапанами. Команда на открытие каждой форсунки подается из центрального блока управления, а фазы ее работы зависят от оборотов и нагрузки двигателя. Преимущества прямого впрыска:

- благодаря форсункам с электромагнитными клапанами возможен впрыск строго дозированного количества топлива в камеру сгорания в определенное время;
- двигатели с прямым впрыском FSI на 15% более экономичные, чем бензиновые двигатели с традиционной системой впрыска;
- лучшее распыление топлива за счет более высокого давления топлива;
- лучшее наполнение камеры сгорания;
- лучшее внутреннее охлаждение двигателя;
- снижение детонации;
- повышение степени сжатия;
- снижение дроссельных потерь при послойном впрыске;
- отсутствие потерь за счет смачивания впускного коллектора;
- эффективная многоуровневая AGR, снижающая теплоотдачу на стенках цилиндров;
- повышение термодинамической эффективности за счет снижения удельного расхода топлива и уровня выбросов ОГ.

В двигателях с искровым зажиганием непосредственное впрыскивание в цилиндры бензина производится при давлениях на порядок меньших, чем в дизелях. Поэтому аккумуляторные электронные топливные системы (ЭТС) непосредственного впрыскивания бензиновых двигателей более просты, в частности и по средствам аварийной защиты (рис. 2.24).

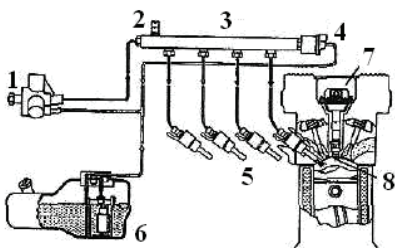


Рис. 2.24. Схема аккумуляторной ЭТС для непосредственного впрыска бензина Motronic MED 7:

1 – ТНВД; 2 – датчик давления; 3 – аккумулятор; 4 – предохранительный клапан; 5 – форсунки; 6 – топливный бак; 7 – катушка зажигания; 8 – свеча

В этой системе давление, создаваемое ТНВД, равно 12 МПа - практически это система среднего давления. Функции показанных на рис. 2.21 элементов аналогичны выполняемым в аккумуляторных ЭТС дизелей. Микроконтроллер и его каналы связи на схеме не показаны.

Двигатели с непосредственным впрыскиванием имеют внутреннее смесеобразование и качественное регулирование смеси, так как топливо впрыскивается непосредственно в камеру сгорания, цикловая подача воздуха изменяется незначительно и регулировать мощность нужно количеством впрыскиваемого топлива, то есть качеством смеси без дросселирования воздушного потока. Поэтому в системе может отсутствовать дроссельная заслонка, а для получения необходимого качества смеси используется эффект расслоения заряда и повышенное давление впрыскивания бензина.

К основным преимуществам такого способа смесеобразования можно отнести:

- лучшую равномерность распределения топлива по цилиндрам двигателя;
- уменьшение потерь энергии во впускной системе вследствие уменьшения гидравлического сопротивления, отсутствие потребности в подогреве смеси при впуске и повышение коэффициента наполнения;
- возможность повысить степень сжатия на 1,5-2,0 единицы, потому что впрыскивание бензина в камеру сгорания создает эффект охлаждения воздуха, который поступил в цилиндр, поскольку при испарении мелко распыленного топлива из воздуха отбирается теплота;
- не образуется топливная пленка во впускном трубопроводе, и, как следствие, прекращается обеднение горючей смеси при разгоне двигателя и ее переобогащение при торможении;
- возможность использования впускных трубопроводов специальной формы, что обеспечивает получение, например, инерционного наддува или направленного движения воздуха в камере сгорания;
- независимость процесса смесеобразования от положения двигателя.

По сравнению с двигателями с впрыскиванием бензина во впускной трубопровод новые двигатели FSI (Fuel Stratified Injection) позволяют сэкономить до 15% топлива. Однако часть сэкономленного топлива приходится расходовать на регенерацию нейтрализатора накопительного типа, чувствительного к наличию серы в топливе. Поэтому экономии топлива приходится добиваться совокупностью мер:

- рециркуляцией отработавших газов (2%);

- сжиганием бедных смесей (3%);
- непосредственным впрыскиванием (8%);
- электронным регулированием системы охлаждения (1,5%);
- управлением фазами газораспределения (2,5%).

Схема непосредственного впрыска бензина в цилиндр двигателя, обеспечивает работу двигателя на чрезвычайно бедной смеси. Форсунки непосредственного впрыска топлива в цилиндры двигателя отличаются высоким рабочим напряжением электромагнита (100 В).

Упрощенная структурная схема электронного блока управления (ЭБУ), изготовленная на базе микропроцессора фирмы Siemens, приведена на рис. 2.25. ЭБУ обеспечивает управление рабочими процессами функциональных элементов и систем автомобиля.

ЭБУ содержит арифметико-логическое устройство I, порт II «Ввод/Вывод» информации, микропроцессор (МП) IV и устройство управления, обеспечивающее согласование и координацию работы составных частей системы, генератор тактовых импульсов и формирователь сигналов. Функциональные компоненты ЭБУ электрически соединены между собой посредством системной шины III.

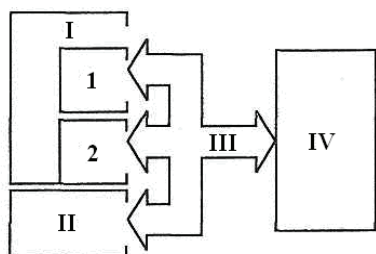


Рис. 2.25. Структурная схема электронного блока управления:

1 – ОЗУ; 2 – ППЗУ; I – арифметико-логическое устройство; II – порт «Ввод/вывод»; III – шина; IV – микропроцессор

руемым запоминающим устройством (ЭПЗУ).

Арифметико-логическое устройство предназначено для обработки информации по программе, записанной в ППЗУ, выполнения расчетов и команд управления исполнительными механизмами, а также запоминания предыдущего режима работы двигателя.

Для хранения информации блок управления содержит три типа внутренней памяти: ОЗУ 1, ППЗУ 2 и ЭПЗУ.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) представляет собой набор электронных компонентов в виде конденсаторов и триггеров, расположенных на печатной плате ОЗУ. По мере необходимости МП может вносить в него информацию или считывать ее, а также хранить и обновлять данные алгоритма самообучения. ОЗУ содержит оперативную информацию, характерную для текущего момента времени (частота вращения коленчатого

Микропроцессор IV представляет собой интегральную схему, смонтированную на миниатюрной кремниевой пластине на одном кристалле большой интегральной схемы (БИС). Объединение элементов МП на одном кристалле повышает надежность и быстродействие его работы. МП через шину данных и адресную шину сообщен с оперативным запоминающим устройством (ОЗУ), постоянным программируемым запоминающим устройством (ППЗУ) и электрически программи-

го вала двигателя, температура, давление в ВТ, коды ошибок, положение дроссельных заслонок).

Память ОЗУ предназначена для временного хранения расчетных параметров программы управления, адаптационных настроек и кодов неисправностей, зафиксированных ЭБУ в процессе работы. В микросхемах ОЗУ содержится информация, изменяемая в процессе работы ЭБУ, и промежуточные данные, необходимые для работы программы. ОЗУ характеризуется высокой скоростью записи и чтения информации. При выключении ЭБУ данные, хранящиеся в ОЗУ, теряются. Объем ОЗУ зависит от количества и типа используемых микросхем.

Законы управления двигателем в ЭБУ сводят в виде таблиц или функциональных зависимостей. ОЗУ – это энергозависимая память, которая требует бесперебойного питания для сохранения в ней информации: при отключении питания или падении напряжения в сети ниже 6 В содержащиеся в ОЗУ диагностические коды неисправностей, расчетные параметры и данные самообучения стираются.

Постоянное программируемое запоминающее устройство (ППЗУ) содержит общую программу управления, обеспечивающую последовательное выполнение рабочих команд, и различную калибровочную информацию. В памяти ППЗУ находятся матрицы, таблицы, значения поправочных коэффициентов, необходимые для расчетов длительности управляющих импульсов ЭМФ, величины угла опережения зажигания и стандартные программы, записанные в микросхему памяти на заводе-изготовителе. Память ППЗУ позволяет только считывать хранящиеся в ней данные и является энергонезависимой. Информация в ней записана физическим методом (прожиганием) микросхемы при изготовлении ЭБУ и не может быть изменена в эксплуатации, сохраняется при выключении блока управления.

ППЗУ выбирают индивидуально в зависимости от комплектации автомобиля. При ее замене важно правильно установить модель и комплектацию автомобиля. При замене неисправного ЭБУ необходимо оставлять прежнее ППЗУ.

Память ЭБУ способна записать 8 бит или 1 байт. Современный ЭБУ снабжен специализированным 16-тиразрядным МП. В перспективе широкое распространение получат ЭБУ нового поколения, выполненные на базе 32-хразрядного микропроцессора.

Программа ЭБУ возможных режимов и условий работы двигателя записана в ячейке микросхемы памяти ППЗУ и позволяет только считывать информацию. ППЗУ устанавливают на отдельной панели платы ЭБУ и при эксплуатации она может быть извлечена из ЭБУ и заменена другой.

ППЗУ находится в отдельном блоке в запоминающем устройстве калибровок, расположенном внутри ЭБУ под его крышкой. ППЗУ заметно уступает ОЗУ по габаритам и емкости. Для перепрограммирования ЭБУ необходима программа-загрузчик, адаптер «K-Line» и персональный компьютер. Процессор прошивают на заводе-изготовителе, он может иметь разные версии программ.

Устройство калибровок содержит информацию о массе автомобиля, двигателе, трансмиссии, главной передаче и некоторые другие данные. ЭБУ без запоминающего устройства может применяться на некоторых автомобилях. Запоминающее устройство калибровок применяют индивидуально для каждого автомобиля. При замене ЭБУ запоминающее устройство калибровок должно оставаться на автомобиле. Память ППЗУ не может быть изменена или удалена после ее установки. Подобная память не нуждается в источнике питания для сохранения записанной в ней информации, которая не стирается при отключении источника питания.

Электрически программируемое запоминающее устройство (ЭПЗУ) представляет собой электрически программируемое запоминающее устройство, энергонезависимая память которого содержит паспортные данные блока управления. Устройство выполнено в виде микросхемы памяти, в которую записана информация о типе аппаратуры компьютера и его настройке. ЭПЗУ используют для временного хранения кодов-паролей противоугонной системы автомобиля (иммобилайзера). Коды-пароли сравниваются с данными, хранимыми в ЭПЗУ.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте систему многоточечного распределенного впрыска топлива бензинового двигателя.
2. Приведите разновидности системы L-Jetronic.
3. Перечислите требования для оптимальной работы системы управления бензиновым двигателем многоточечного впрыска топлива.
4. Охарактеризовать систему одноточечного (центрального) впрыска топлива.
5. Куда впрыскивается топливо в системе одноточечного впрыска?
6. Какие существенные изменения конструкции двигателя требуются при использовании системы одноточечного впрыска топлива?
7. Привести функциональную схему впрыска с внутренним смешением.
8. Какие отличительные особенности впрыскивания бензина во впускной коллектор и непосредственно в цилиндр?
9. Какие преимущества имеет система непосредственного впрыскивания топлива в цилиндры?
10. Какие общие функции выполняет электронный блок управления рабочими процессами функциональных элементов двигателя?

2.6.4. Системы управления зажиганием бензиновых двигателей

2.6.4.1. Системы зажигания

Наиболее важные эксплуатационные качества автомобиля – экономические и экологические показатели, тягово-скоростные свойства, приемистость, эффективность торможения, управляемость, курсовая устойчивость и др. Большинство из этих качеств зависят от конструкции и характеристик двигателя, в том числе и системы топливоподачи и зажигания.

Система зажигания предназначена для того, чтобы повысить напряжение бортовой сети электроснабжения автомобиля до величины, необходимой для образования электрического разряда, и в нужный момент времени

подать это напряжение на соответствующую свечу зажигания. Правильное функционирование системы зажигания в значительной мере обеспечивает бензиновому двигателю его соответствие требованиям по энергетическим (мощность), экономичным (расход топлива на 100 км пробега) и экологическим (содержание вредных веществ в отработавших газах) показателям. Известные на сегодня системы зажигания получают необходимую энергию от промежуточного накопителя энергии, в зависимости от типа которого различают системы с накоплением энергии в катушке индуктивности или в конденсаторе.

В настоящее время широко используется три типа систем зажигания: классическая (контактная), бесконтактная и микропроцессорная.

Классическая (контактная) (рис. 2.26) система с накоплением энергии в индуктивной катушке зажигания и с механическими регуляторами опережения зажигания и механическим распределителем импульсов высокого напряжения. Управление первичным контуром системы зажигания (синхронизация) осуществляется механическими контактами. Процент эксплуатирующихся автомобилей с таким типом системы зажигания с каждым годом уменьшается, но данная система позволяет наглядно рассмотреть методы их диагностирования.

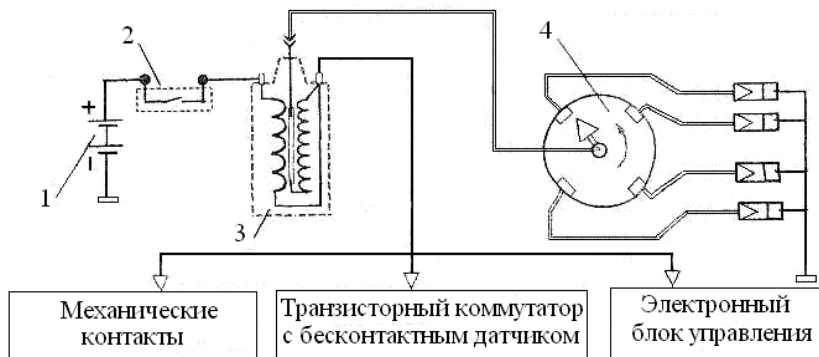


Рис. 2.26. Принципиальная схема «классической» контактной и бесконтактной систем зажигания:

1 – источник питания; 2 – замок зажигания; 3 – катушка зажигания; 4 – распределение высокого напряжения

Бесконтактная система зажигания, с датчиком Холла или индуктивным датчиком по принципу действия похожа на классическую, а отличается принципом управления контуром низкого напряжения. Функцию контактов выполняет транзисторный коммутатор, которым в свою очередь управляют импульсы датчика Холла или индуктивного датчика. Этот тип зажигания широко распространен, (до настоящего времени устанавливается на автомобилях ЗАЗ, ВАЗ, ГАЗ и др.), а также используется на многих моделях автомобилей зарубежного производства.

Транзисторные системы зажигания возникли на базе контактных систем в связи с попытками заменить механический контактный прерыватель

бесконтактным транзисторным ключом, и эти попытки оказались успешными, потому что упомянутая замена содействовала снижению потерь энергии в узле коммутации тока первичной цепи. В транзисторной системе зажигания сохраняется принцип накопления энергии в катушке индуктивности за время замкнутого состояния ключа. Функции коммутатора тока в первичной цепи выполняет мощный транзистор, способный проводить достаточный для накопления необходимой энергии ток, быстро закрываться (разрывать первичную цепь) и выдерживать импульсы напряжения (прямого и обратного), которые возникают на катушке в момент размыкания цепи, амплитудой 350-400 В.

На величину пробивного напряжения свечи влияют следующие факторы:

- давление и температура в камере сгорания в момент электрического пробоя искрового промежутка (зазора) свечи;
- искровой промежуток свечи;
- форма и температура электродов свечи, а также скорость нарастания вторичного напряжения на электродах;
- состав рабочей смеси в камере сгорания;
- скорость движения рабочей смеси в зоне искрового промежутка свечи;
- материал электродов свечи.

Микропроцессорные системы зажигания и комплексные системы управления являются наиболее современными типами зажигания (рис. 2.26).

Система зажигания с микропроцессорным управлением (МПСУ) состоит из системного модуля, набора датчиков, катушек и свечей зажигания. В составе системного модуля или за его пределами есть электронный коммутатор, который подключает на короткое время первичную обмотку катушки зажигания к аккумуляторной батарее. Принцип искрообразования остался таким же, как и в предыдущих системах, но существенно усовершенствован процесс управления катушкой зажигания (рис. 2.27).

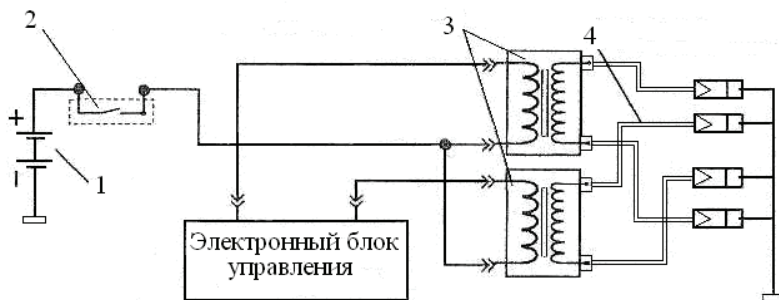


Рис. 2.27. Принципиальная схема микропроцессорной системы зажигания:

1 – источник питания; 2 – замок зажигания; 3 – катушки зажигания; 4 – распределение высокого напряжения

Эту функцию выполняет микропроцессор в составе электронного блока управления. Данная система устанавливается на большинстве современных автомобилей.

Основным преимуществом микропроцессорных систем зажигания является возможность статического распределения высокого напряжения между цилиндрами двигателя. Такой принцип распределения может быть реализован в нескольких вариантах:

- на каждый цилиндр устанавливается одна одноискровая катушка зажигания;
- на каждую пару цилиндров устанавливается одна двухискровая катушка зажигания;
- на четыре цилиндра устанавливается одна четырехискровая катушка зажигания с двумя последовательно соединенными первичными обмотками.

Компоненты системы зажигания VAG Simos представлены на рис. 2.28.

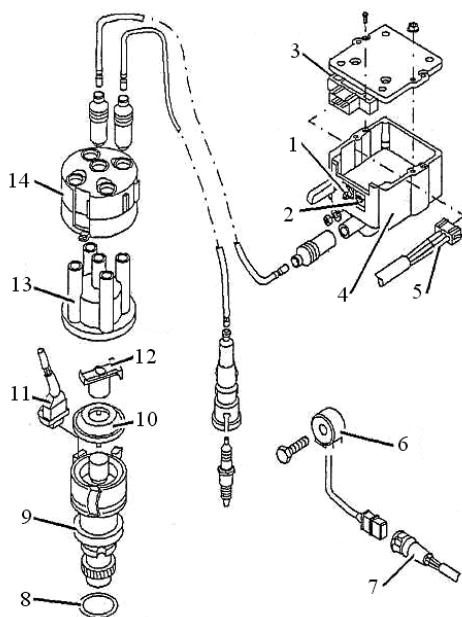


Рис. 2.28. Компоненты системы зажигания VAG Simos:

- 1 – катушка зажигания клемма 1; 2 – катушка зажигания клемма 15; 3 – выходной каскад модуля; 4 – катушка зажигания; 5 – разъем; 6 – датчик детонации; 7 – разъем датчика детонации; 8 – уплотнительное кольцо; 9 – распределитель зажигания; 10 – пылезащитная крышка; 11 – разъем датчика Холла; 12 – бегунок; 13 – крышка распределителя; 14 – экранирующая крышка

Управление моментом искрообразования в МПСУ осуществляется на основании вычисленных блоком управления оптимальных значений угла опережения зажигания, соответствующих скорости вращения коленчатого вала двигателя, разрежению (давлению) во впускном коллекторе или потере воздуха. Наличие датчика детонации в цепи обратной связи позволяет устранить детонационное сгорание путем быстрого уменьшения угла опережения зажигания. В системе отсутствует механический распределитель высокого напряжения. На каждый цилиндр (или на два цилиндра) используется отдельная катушка зажигания. Применение такой системы позволяет добиться снижения расхода топлива и токсичности отработавших газов.

Наибольшее распространение получили первый и второй варианты компоновки. Применение микропроцессорных систем зажигания и систем управления

двигателем позволило существенно улучшить их характеристики. Особенно в реализации угла опережения зажигания. Благодаря отсутствию распределителя и механических регуляторов опережения зажигания, угол опережения зажигания можно достаточно быстро изменять в широком диапазоне отдельно для каждого цилиндра.

2.6.4.2. Микропроцессорные системы управления зажиганием и впрыском в бензиновых двигателях

Сейчас производители практически отказались от отдельных электронных систем впрыска и производят электронные системы управления двигателем, объединяющие управление впрыском топлива и зажиганием в бензиновом двигателе. Такие системы обозначаются Motronic. Производятся на современном этапе три типа систем:

- M-Motronic – микропроцессорная система управления зажиганием и распределенным впрыском топлива;

- ME-Motronic – микропроцессорная система управления зажиганием и распределенным, последовательным впрыском топлива, с λ -регулируемостью и электронным дросселем (система ETC);

- MED-Motronic – микропроцессорная система управления зажиганием и непосредственным впрыском топлива в цилиндры (Direct injection, DI).

Система ME-Motronic. Кроме основных своих функций система ME-Motronic выполняет и целый ряд дополнительных функций с разомкнутой и замкнутой системами управления. В качестве примера можно назвать следующие:

- регулирование частоты вращения коленчатого вала на холостом ходу; регулирование коэффициента избытка воздуха (замкнутая система управления);

- улавливание топливных паров; рециркуляция отработавших газов для снижения содержания оксидов азота;

- контроль за работой вспомогательной воздушной системы для снижения содержания углеводородов в отработавших газах;

- автоматическое регулирование скорости движения (круиз-контроль).

Система ME-Motronic может выполнять еще целый ряд функций: управление работой турбонагнетателя и регулирование параметров впускного трубопровода с целью повышения выходной мощности двигателя; регулирование фаз газораспределения для снижения содержания вредных веществ в отработавших газах и увеличения мощности двигателя; устранение детонации, ограничение частоты вращения коленчатого вала и ограничение скорости движения автомобиля для защиты отдельных узлов и деталей двигателя и самого автомобиля от повреждений.

В системе ME-Motronic применяется координирование крутящего момента, с помощью которого сортируются часто противоречащие друг другу требования в обеспечении определенного значения крутящего момента и затем реализуется наиболее важное из этих требований. Система ME-Motronic через цепь питания бортового контроллера связи (CAN) может

подсоединяться к электронным блокам управления (ECU) других систем автомобиля. Так, подсоединение к блоку ECU автоматической трансмиссии среди прочих функций позволяет снизить крутящий момент в момент изменения передаточного отношения в трансмиссии, благодаря чему уменьшаются нагрузки на трансмиссию и ее износ. Система регулирования тягового усилия на колесах (TCS), входящая в блок ECU, при проскальзывании колес выдает системе ME-Motronic сигналы для уменьшения создаваемого крутящего момента.

Система ME-Motronic содержит компоненты бортового мониторинга (OBD). Они отвечают наиболее строгим экологическим нормам и требованиям интегрированной диагностики.

Система с электронным управлением дроссельной заслонкой (ETC), интегрированная в единый блок управления зажиганием, впрыском и другими вспомогательными функциями, позволяет определять положение педали акселератора посредством датчика ее перемещения (потенциометра), рис. 2.29.

В соответствии с текущим режимом работы двигателя блок ECU, рассчитав необходимую величину открытия дроссельной заслонки, воздействует на привод этой заслонки – положение контролируется датчиком угла поворота дроссельной заслонки (потенциометром). Таким образом, два потенциометра – педали и дроссельной заслонки – образуют элемент управляющей системы ETC, которая при работе двигателя производит непрерывный опрос всех датчиков и анализ расчетных данных, влияющих на угол открытия дроссельной заслонки.

Особенность системы – формирование крутящего момента, задаваемого водителем. Электронный контроль дроссельной заслонки (EGAS) также позволяет качественно реализовать функции круиз-контроля, так как в зависимости от нагрузки (подъем, обгон и т. п.) дроссель регулирует оптимальное наполнение воздушным зарядом. Кроме того, EGAS – это система безопасности, так как ASR и ESP управляют блоком управления двигателем с целью быстрого редуцирования крутящего момента от двигателя. Также MSR система препятствует избыточному тормозному моменту на колесах при торможении двигателем, используя повышение оборотов с помощью EGAS.

Система MED-Motronic. При оснащении бензинового двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыском топлива системой MED-Motronic (рис. 2.30) расход топлива может быть снижен не менее чем на 20% по сравнению с двигателем, имеющим впрыск топлива во впускной трубопровод.

При этом может быть достигнут длительный эффект снижения выбросов диоксида углерода (CO_2) во время движения автомобиля.

При непосредственном впрыске топлива двигателя имеют внутреннее смесеобразование и качественное регулирование смеси, потому что топливо впрыскивается непосредственно в камеру сгорания, цикловая подача воздуха изменяется незначительно и регулировать мощность необходимо количеством топлива, то есть качеством смеси без дросселирования воздушного

потока. Для получения необходимого качества смеси используется эффект расслоения заряда и повышенное давление впрыскиваемого бензина.

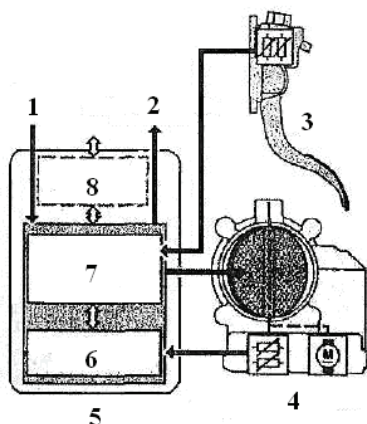


Рис. 2.29. Система с электронным управлением дроссельной заслонкой (ETC, ETCS)

На рис. 2.29 цифрами обозначены: 1 – датчики; 2 – исполнительные механизмы; 3 – педаль газа; 4 – дроссельный узел; 5 – блок ECU, управляющий работой двигателя; 6 – контролирующий модуль; 7 – микропроцессор; 8 – бортовой контроллер связи.

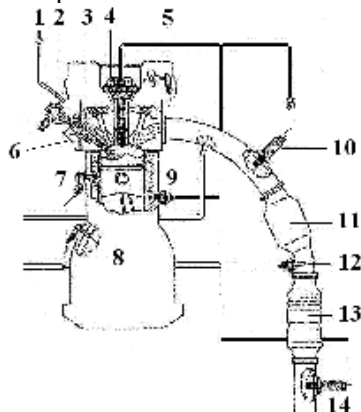


Рис. 2.30. Схема двигателя с непосредственным впрыском топлива и элементами системы MED-Motronic

На рис. 2.30 цифрами обозначены: 1 –подача топлива (под высоким давлением); 2 – топливный аккумулятор (рампа); 3 – топливная форсунка; 4 – катушка зажигания со свечой зажигания; 5 – датчик фаз; 6 – датчик давления; 7 – датчик детонации; 8 – датчик частоты вращения коленчатого вала и положения поршня; 9 – датчик температуры двигателя; 10 – λ-зонд; 11 – трехкомпонентный каталитический нейтрализатор отработавших газов; 12 – датчик температуры отработавших газов; 13 – каталитический нейтрализатор оксидов азота (NO_x) в отработавших газах; 14 – λ-зонд (диагностический).

Послойное смесеобразование применяется только на режимах малых нагрузок (до 30% мощности). На других режимах двигатель работает на гомогенной смеси.

Для обеспечения послойного смесеобразования создают в цилиндре и на его входе согласованное движение воздуха и топлива, чтобы в нужный момент возле электродов свечи образовалась топливовоздушная смесь, пригодная для зажигания. Это достигается совокупностью мер, заложенных в конструкции деталей впускного тракта, камеры сгорания, компонентов топливной аппаратуры, модели функционирования системы управления, а именно:

- изменением геометрии впускного тракта;
- специальной формой камеры сгорания;
- расположением форсунки и характеристикой ее распылителя;

- наличием модели, адекватно описывающей процессы смесеобразования и сгорания;
- наличием датчиков, исполнительных устройств и программно-аппаратных средств, позволяющих реализовать сложные алгоритмы управления.

Двигатели с непосредственным впрыском топлива могут работать в описанных далее режимах.

1. Режим с послойным смесеобразованием. Топливо впрыскивается во время такта сжатия непосредственно перед моментом зажигания.

2. Режим с гомогенным смесеобразованием. Топливо впрыскивается во время такта впуска, что обеспечивает более эффективное его смешивание с поступающим воздухом.

3. Экономичный режим с гомогенным смесеобразованием обеспечивается в фазе перехода из послойного в гомогенный.

4. Режим с гомогенно-послойным смесеобразованием: на такте впуска впрыскивается первая порция около 75% топлива, образуя бедную гомогенную смесь. Второе впрыскивание (остаток топлива около 25%) происходит на такте сжатия и образует возле свечи зажигания богатую легко воспламеняющуюся смесь. Такой режим двойного впрыскивания на низких частотах вращения вала двигателя является переходным этапом между послойным и гомогенным режимом. Он характеризуется меньшими выбросами сажи в атмосферу по сравнению с послойным режимом и меньшим расходом топлива по сравнению с гомогенным режимом.

5. Режим с гомогенным антидетонационным смесеобразованием.

С внедрением двойного впрыскивания при полной нагрузке отпала необходимость «позднего» зажигания, поскольку снижения детонации удалось достичь благодаря послойному распределению впрыснутого топлива. Необходимый крутящий момент сохраняется при этом за счет оптимального угла опережения зажигания.

Система топливоподдачи (рис. 1.32) состоит из двух контуров: контура высокого и контура низкого давления. Очень малая часть топлива подводится в цилиндры через систему улавливания паров бензина. Основная же топливоподача осуществляется через электромагнитные форсунки высокого давления.

Контур низкого давления охватывает часть топливной системы от расположенного в баке электронасоса до насоса высокого давления. Давление топлива в этом контуре обычно равно 300 кПа и только при пуске горячего двигателя может быть повышено до 580 кПа.

В контур низкого давления входят: топливный бак, накопитель, входной фильтр, топливоподкачивающий насос с электроприводом, топливный фильтр, датчик низкого давления топлива, электронный блок управления топливоподкачивающим насосом. В данной системе электронный блок управляет топливоподкачивающим насосом по давлению и продуктивности. Для этого используется сигнал датчика низкого давления топлива.

Контур высокого давления начинается с топливного насоса высокого давления, который подает топливо в топливный аккумулятор. В контур

высокого давления входят: топливный насос высокого давления, трубопроводы высокого давления, топливный гидроаккумулятор, датчик высокого давления топлива, клапан регулятора давления, электромагнитные форсунки высокого давления.

На гидравлическом аккумуляторе установлен датчик высокого давления топлива, сигналы которого используются для поддержки и регулирования давления в диапазоне от 5,0 до 10,0 МПа с помощью клапана регулятора. Впрыскивание топлива в цилиндры осуществляется через форсунки высокого давления. Чтобы получить наилучшее распределение топлива при послыном смесеобразовании, угол конуса топливного факела принят равным 70° , а ось конуса наклонена на 20° .

Электронный блок управления двигателем подает на форсунки управляющие импульсы напряжением порядка 90 В, чтобы обеспечить быстрое открытие форсунки (фаза предварительного намагничивания). При таком напряжении ток в обмотке достигает 10 А. Далее, чтобы удерживать ее клапан в открытом состоянии, достаточно подать 30 В. При этом ток удерживания в ее обмотке равен 3-4 А.

Контрольные вопросы

1. Какое назначение систем зажигания?
2. Привести упрощенную схему классической системы зажигания.
3. Привести упрощенную схему бесконтактной системы зажигания.
4. Привести упрощенную схему микропроцессорной системы зажигания.
5. Охарактеризовать три типа систем управления зажиганием (М, МЕ, MED-Motronic).
6. В каких режимах могут работать двигатели с непосредственным впрыском?

2.6.5. Системы управления впрыском, длительностью и объемом впрыска топлива

2.6.5.1. Схемы управления впрыском

Принцип работы любой системы впрыска заключается в задании массового или объемного расхода воздуха $F_{вз}$, необходимого для работы ДВС на определенном режиме. По расходу воздуха следящая система регулирования формирует необходимый расход F_T . Величина $F_{вз}$ устанавливается путем измерения положения дроссельной заслонки. Если несовершенство конструкции и технологии изготовления узла дроссельной заслонки не позволяет обеспечить требуемую точность задания $F_{вз}$, то приходится применять дополнительный датчик массового или объемного расхода (рис. 2.31) [10].

При центральном впрыске (рис. 2.31, а) топливо под давлением поступает в топливоподающую магистраль, постоянное давление в которой обеспечивает регулятор 8 (РС, В3) [12].

Топливо через дросселирующее устройство 7 (В1) поступает на форсунку 6 и далее во впускной тракт перед впускным трубопроводом. Воздух

в камеру смесеобразования 5 поступает так же, как и при карбюрации, через трубопровод 3. Поэтому механизмы смешивания при карбюрации и центральном впрыске имеют много общего. Расход горючей смеси F_c задается положением дроссельной заслонки В2. По углу положения, который определяется с помощью датчика 4 (GE), устройство управления и обработки информации УУ и ОИ 1 выдает команды на исполнительный механизм 2 (М) для регулирования расхода топлива.

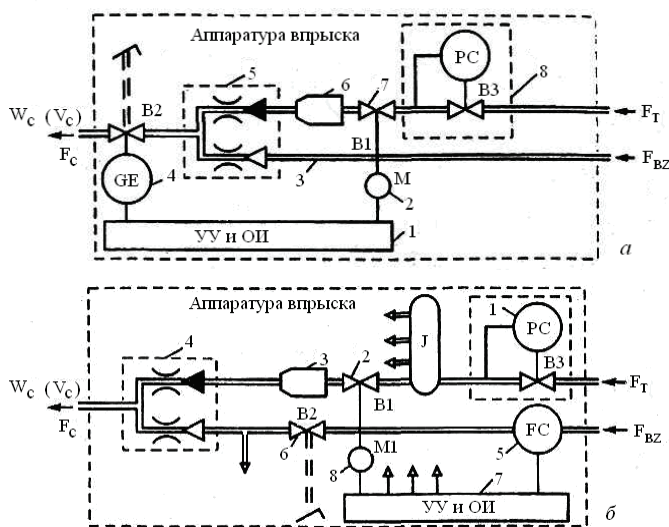


Рис. 2.31. Функциональная схема системы впрыска:
а – центральный впрыск; *б* – индивидуальный впрыск

При индивидуальном впрыске (рис. 2.31, б) форсунки 3 устанавливаются перед каждым цилиндром и топливо попадает в индивидуальную камеру смесеобразования 4 через коммутатор-распределитель J и регулятор давления 1 (PC).

Использование электронных топливных систем (ЭТС) вносит наибольший вклад в эффективность электронного управления двигателем.

В большинстве известных вариантов аккумуляторных систем использованы электрогидравлические форсунки. Управление продолжительностью впрыскивания в этих ЭТС осуществляется алгоритмически изменением длительности электрического управляющего импульса t_v , подаваемого микроконтроллером на электрический клапан форсунки.

Основное назначение ЭТС – управление мощностью двигателя и обеспечение возможности оптимизации его рабочего процесса. Наиболее полное использование адаптивного управления возможно при индивидуальном управлении подачей жидкого или газообразного топлива в каждом рабочем цикле каждого цилиндра двигателя.

ЭТС двигателей различаются прежде всего уровнем давления топлива [10, 11, 12]:

- низкого (0,2-1,0 МПа) для подачи легких жидких топлив или газов во впускные каналы цилиндров;
- среднего (20-40 МПа);
- высокого давления (до 200 МПа) впрыскивания жидких топлив непосредственно в цилиндры – наиболее сложные и разнообразные.

ЭТС в любом варианте представляет собой совокупность электрогидравлических устройств, преобразующих электрические управляющие сиг-

налы, формируемые микроконтроллером, в гидравлические импульсы давления впрыскивания топлива.

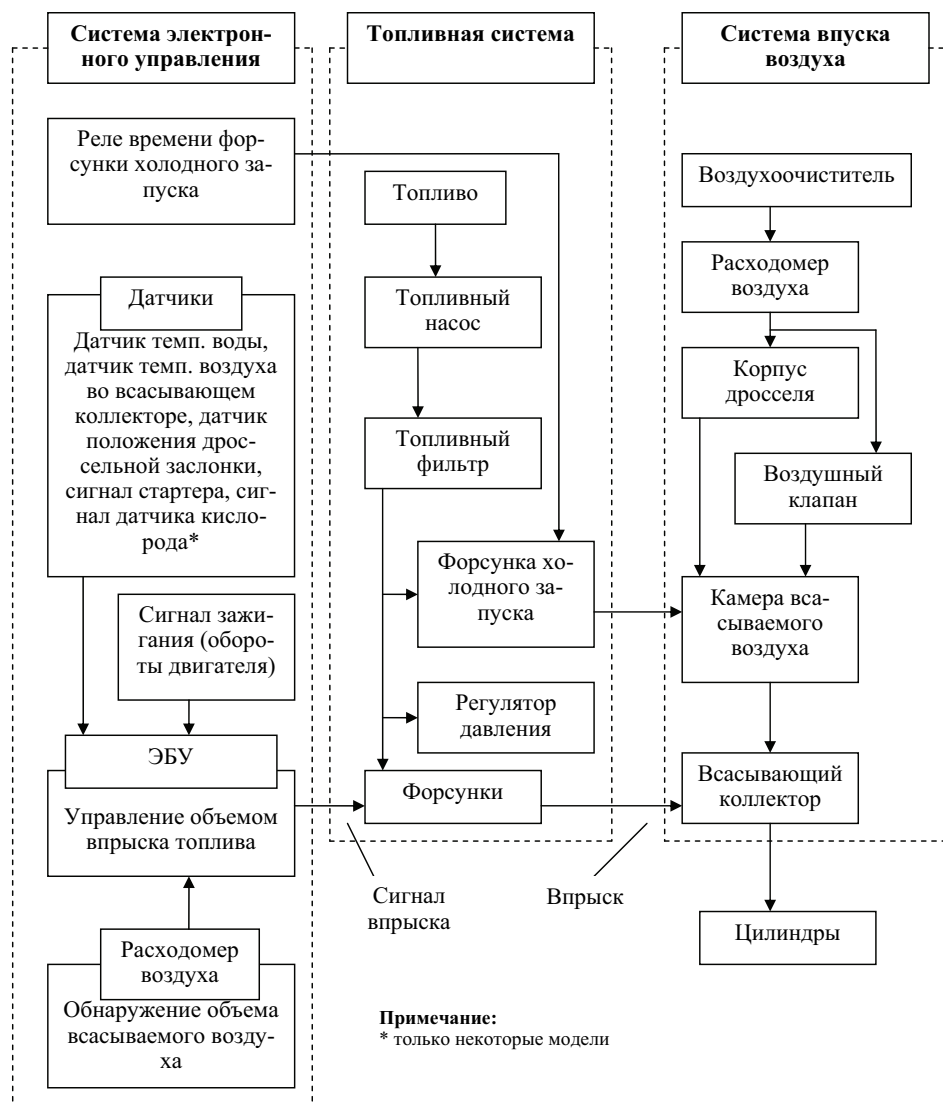


Рис. 2.32. Система электронного впрыска топлива

Управляемыми элементами ЭТС, в которых устанавливаются электро-механические преобразователи или электрические клапаны, могут быть: насосы высокого давления, магистрали высокого, среднего и низкого давления, форсунки и топливоподкачивающие насосы.

В мировой практике разработкой электронных систем впрыска топлива занимаются многие фирмы, однако наиболее известны в Европе: Bosch,

Siemens, поэтому чаще всего используют их обозначения систем. Общепринятым международным обозначением электронных систем впрыска является Jetronic.

Имеется достаточно большое число вариантов ЭТС, отличающихся применяемыми источниками питания форсунок, топливом и способами управления параметрами его впрыскивания.

Устройства электронного впрыскивания топлива (ЭВТ) подразделяется на три системы: систему электронного управления, топливную систему и систему впуска воздуха, как показано на рис. 2.32. ЭВТ можно также расчленить на основные органы управления впрыском топлива и органы управления коррекцией. Все три системы будут подробно описаны далее.

2.6.5.2. Управление впрыском топлива

Основной впрыск. Устройства основного впрыска поддерживают оптимальную пропорцию (называемую теоретическим соотношением) воздуха и топлива, всасываемых в цилиндры. Чтобы этого достичь, при увеличении объема всасываемого воздуха пропорционально увеличивается и объем впрыска топлива. Или, наоборот, если снижается объем всасываемого воздуха, то снижается и объем впрыска топлива.

Теоретическое отношение количества воздуха к количеству топлива – это отношение воздуха к топливу, содержащего как раз столько кислорода, сколько требуется для его полного сгорания. В случае чистого октана это отношение равно 15:1 или на 15 частей воздуха приходится 1 часть топлива. Теоретическое отношение воздуха к топливу – это отношение массы воздуха в топливовоздушной смеси к массе топлива. Однако, двигатель не будет нормально работать только при объеме основного впрыска. Все это потому, что двигатель должен работать при изменяющихся условиях и, значит, нужно корректирующее устройство для регулирования соотношения смеси в соответствии с этими изменяющимися условиями. Например, когда двигатель холодный или сильно нагружен, требуется более богатая смесь. Система ЭВТ регулирует соотношение между воздухом и топливом в соответствии с рабочими условиями двигателя таким же образом, как карбюратор меняет состав смеси с помощью воздушной заслонки или системы экономайзера.

Управление моментом и длительностью впрыска. Для случая одновременного впрыска сигнал от катушки зажигания, указывающий обороты двигателя, заставляет все форсунки производить впрыск одновременно при каждом обороте, коленчатого вала.

ЭВТ обеспечивает впрыск топлива в два цилиндра каждый цикл работы двигателя. То есть происходит один впрыск за один оборот коленчатого вала.

Впрыск синхронизирован с зажиганием. В четырехцилиндровом двигателе происходит один впрыск за каждые два зажигания и один впрыск за каждые три зажигания в шестицилиндровом двигателе (рис. 2.33).

Первичный сигнал зажигания (IG) также используется как сигнал управления впрыском. ЭБУ обнаруживает первичный сигнал зажигания (IG) и преобразует его в импульс. В четырехцилиндровом двигателе имеется один сигнал впрыска на каждые два сигнала зажигания. В шестицилиндровом двигателе имеется один сигнал впрыска на каждые три сигнала зажигания.

Длительность каждого впрыска равна только половине требуемой, поэтому требуются два впрыска для получения правильного количества топлива для сгорания за один цикл.

ЭБУ рассчитывает, сколько топлива требуется для данного количества воздуха и сообщает каждой форсунке время открытия соленоида. При открытии соленоидного клапана форсунки топливо впрыскивается во всасывающий коллектор.

На самом деле имеются и другие системы впрыска, например, двухгрупповой впрыск, независимый впрыск и т. д. [13].

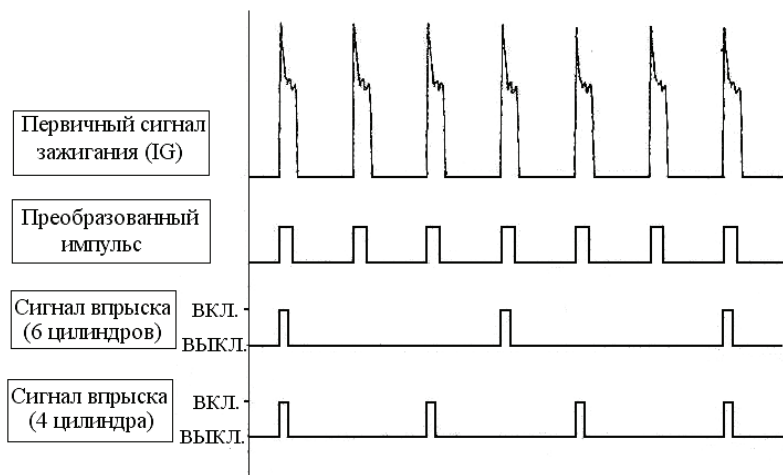


Рис. 2.33. Управление моментом впрыска

Управление объемом впрыска. ЭБУ выдает сигнал частоты вращения посредством первичного сигнала (IG) от клеммы первичной обмотки зажигания. В соответствии с этим сигналом и сигналами (V_c и V_s) от расхода воздуха (сигналы объема всасываемого воздуха) ЭБУ выдает основной сигнал впрыска. Затем с помощью различных схем коррекции впрыска производятся коррекции основного сигнала впрыска в соответствии с сигналами от каждого датчика, определяя таким образом фактический объем впрыска. Этот сигнал впрыска затем усиливается для привода в действие форсунок (рис. 2.34).

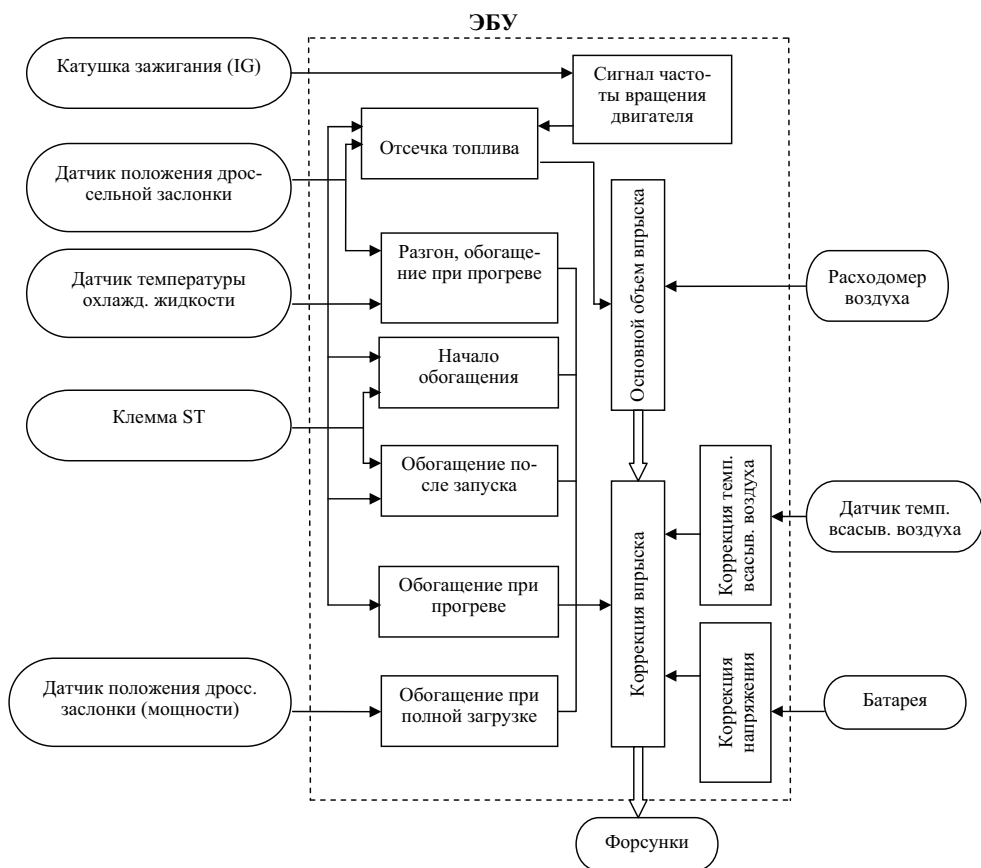


Рис. 2.34. Управление объемом впрыска

Основной объем впрыска определяется объемом всасываемого воздуха и частотой вращения двигателя. Если обороты двигателя постоянны, основной объем впрыска будет возрастать при увеличении объема всасываемого воздуха. С другой стороны, если постоянен объем всасываемого воздуха, основной объем впрыска будет возрастать с уменьшением оборотов двигателя.

$$V = K \frac{V_{вз}}{M},$$

где $V_{вз}$ – основной объем впрыска;

K – коэффициент;

M – крутящий момент двигателя, об/мин⁻¹;

Сигналы напряжения к ЭБУ (рис. 2.35):

- от расходомера – определяется объем всасываемого воздуха;

- от катушки зажигания – определяется частота вращения двигателя.

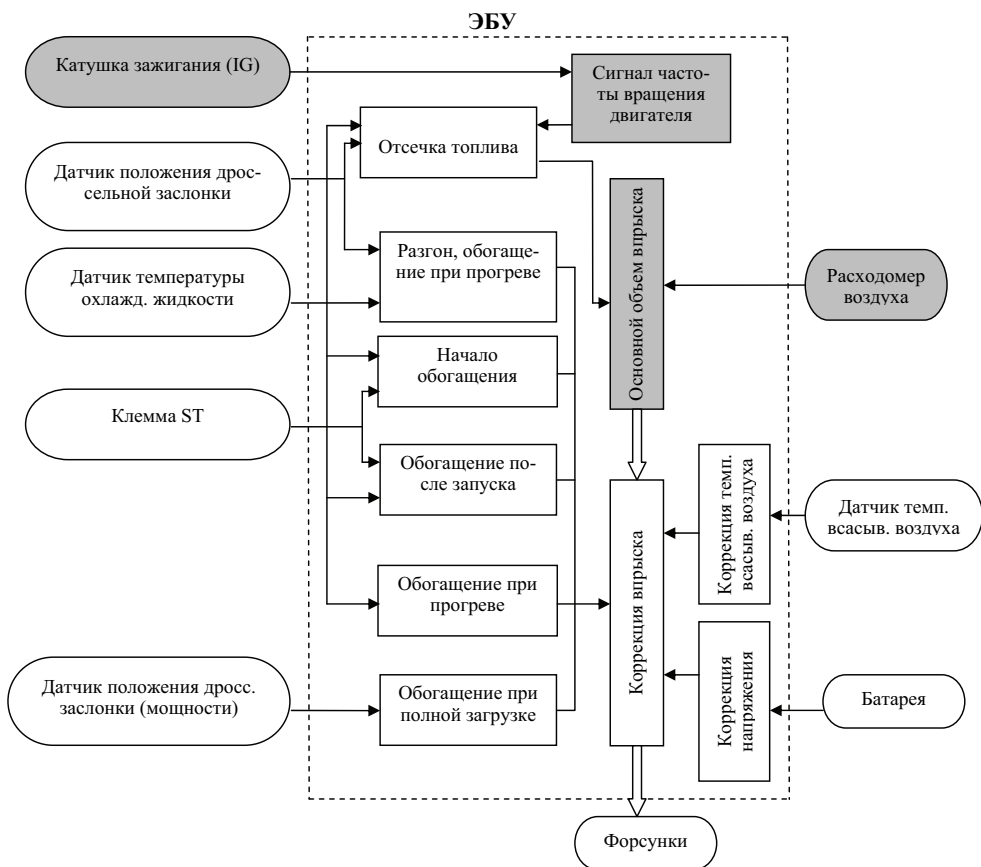


Рис. 2.35. Схема управления основным объемом топлива

Когда напряжение отрицательного вывода катушки зажигания возрастает до 150 В или выше, ЭБУ обнаруживает это как первичный сигнал зажигания и преобразует его в сигнал об/мин^{-1} . Этот сигнал об/мин^{-1} не только информирует ЭБУ о частоте вращения двигателя, но и определяет момент впрыска. Минимальная длительность впрыска устанавливается для основного впрыска, чтобы гарантировать, что она не упадет ниже заданной. Имеется также и максимальная длительность впрыска для исключений неконтролируемого впрыска топлива в случае отказа системы.

2.6.5.3. Коррекция впрыска и состава рабочей смеси

Коррекция впрыска. Есть два метода коррекции соотношения смеси. Один из них называется «коррекция обогащения», посредством которого ЭБУ срабатывает для увеличения объема впрыскиваемого топлива. К дру-

тому методу относятся вспомогательные устройства, которые выполняют те же функции без использования ЭБУ.

Различные виды данных относительно рабочих условий двигателя (например, температура охлаждающей жидкости, температура всасываемого воздуха и т. д.) поступают к ЭБУ от различных датчиков в дополнение к данным по количеству воздуха от расходомера и оборотам двигателя от катушки зажигания. ЭБУ обладает способностью увеличивать количество топлива на основе этих данных (табл. 2.1, рис. 2.36). Другими словами, даже при постоянном количестве всасываемого воздуха, количество топлива, впрыскиваемого форсунками, увеличивается или уменьшается в соответствии с условиями работы двигателя.



*Только для некоторых моделей

Рис. 2.36. Данные, поступающие в ЭБУ от датчиков

Таблица 2.1

Датчики и их назначение

Датчик/сигнал	Назначение
Расходомер воздуха	Сигнализирует об объеме всасываемого воздуха изменением напряжения с помощью потенциометра
Датчик положения дроссельной заслонки	Сигнализирует о тяжелой нагрузке и холостых оборотах в соответствии с открытием дроссельной заслонки
Датчик температуры воды	Сигнализирует о температуре охлаждающей жидкости

Датчик/сигнал	Назначение
Датчик температуры всасываемого воздуха	Сигнализирует о температуре всасываемого воздуха
Первичный сигнал зажигания	Сигнализирует о моменте зажигания и оборотах двигателя посредством первичных сигналов зажигания
Сигнал стартера	Сигнализирует о проворачивании коленчатого вала двигателя
Датчик кислорода	Сигнализирует о количестве остаточного кислорода в выхлопных газах

Пусковое и послепусковое обогащение. Эта коррекция увеличивает объем впрыска в соответствии с температурой охлаждающей жидкости (увеличение объема впрыска при низких температурах) для облегчения запуска и улучшения устойчивости работы двигателя в течение некоторого времени после запуска. Объем впрыска постепенно снижается до основного объема впрыска (рис. 2.37).

Сигналы напряжения к ЭБУ (рис. 2.38):

- от клеммы (ST) выключателя зажигания – обнаруживается проворачивание двигателя;

- от датчика температуры воды – определяется температура охлаждающей жидкости.

Обогащение при разгоне. Когда дроссельная заслонка закрыта (контакты холостого хода замкнуты), а требуется резко разогнать автомобиль, (при этом контакты холостого хода разомкнуты), то для лучшей работы двигателя топливо впрыскивается дополнительно только один раз в течение заданного периода времени. Однако, обогащение не происходит, если его период совпадает с обычным впрыском при разомкнутых контактах холостого хода (рис. 2.39).

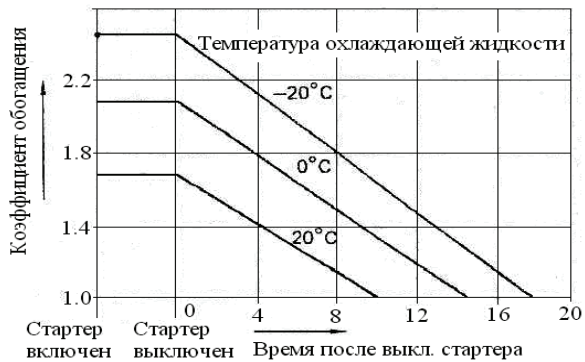


Рис. 2.37. Коррекции впрыска

ЭБУ сравнивает напряжение сигналов, посылаемых от датчика кислорода, с заранее заданным напряжением. Если напряжение сигнала выше этого напряжения, топливовоздушная смесь оценивается как более богатая, чем теоретическая смесь, и постепенно величина впрыскиваемого топлива уменьшается. Если напряжение сигнала ниже, делается оценка, что топливовоздушная смесь беднее теоретической и увеличивается количество впрыскиваемого топлива (рис. 2.40). Этот коэффициент коррекции изменяется в диапазоне от 0,8 до 1,2 и равен 1,0 в режиме разомкнутой системы.

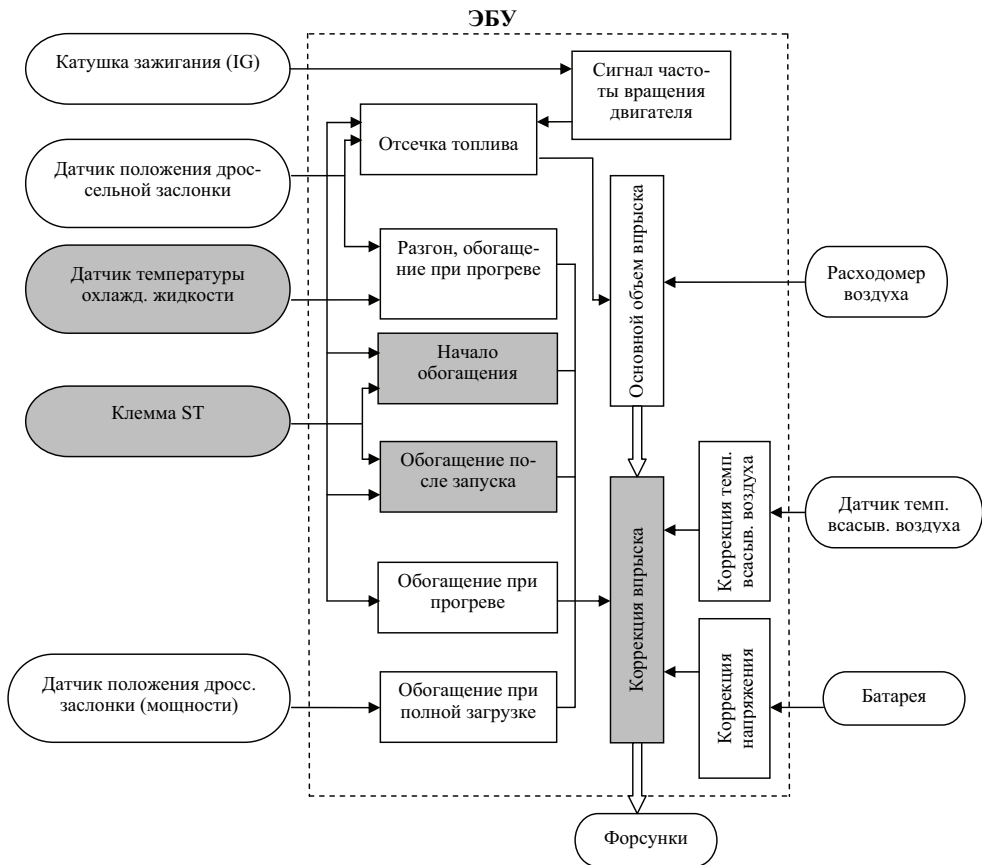


Рис. 2.38. Коррекции напряжения в ЭБУ

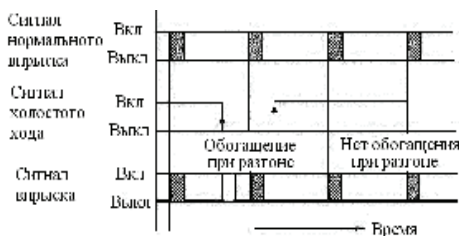


Рис. 2.39. Сигналы обогащения

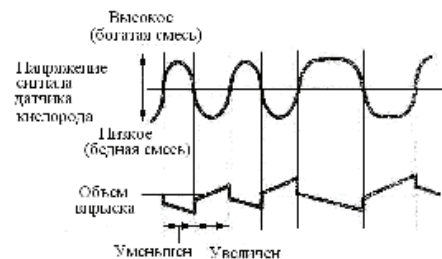


Рис. 2.40. Распознавание и коррекция состава горючей смеси

Коррекция состава рабочей смеси по методу обратной связи (только некоторые модели). ЭБУ корректирует длительность впрыска на основании сигналов от датчика кислорода для поддержания состава рабочей смеси, близкого к теоретическому (это называют работой по замкнутой системе - рис. 2.41). Однако, чтобы исключить перегрев катализатора и обеспе-

чить нормальную работу двигателя, коррекция состава рабочей смеси по методу обратной связи не происходит при следующих условиях (это называется процессом разомкнутой системы):

- при запуске двигателя;
- при послепусковом обогащении;
- при обогащении в режиме полной нагрузки;
- когда температура охлаждающей жидкости ниже заданной;
- при отсечке топлива.

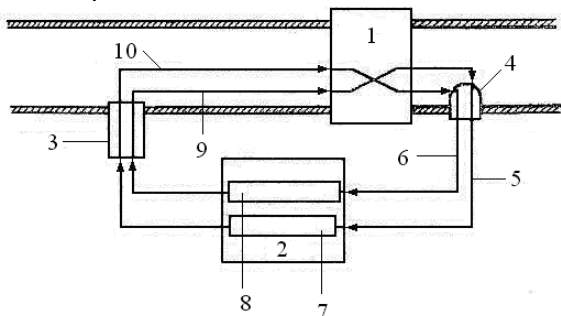


Рис. 2.41. Коррекция по методу обратной связи

На рис. 2.41 цифрами обозначены: 1 – двигатель; 2 – ЭБУ; 3 – форсунка; 4 – датчик кислорода; 5 – сигнал бедной смеси; 6 – сигнал богатой смеси; 7 – увеличение объема впрыска; 8 – уменьшение объема впрыска; 9 – бедная смесь; 10 – богатая смесь.

В ряде ЕСКД λ -зонды расположены за нейтрализатором и осуществляют не только контроль технического состояния самого нейтрализатора, но и используются для дополнительной коррекции состава смеси.

В результате изменения технического состояния элементов системы управления двигателем или топливной аппаратуры может наблюдаться значительное изменение состава топливовоздушной смеси на разных рабочих режимах двигателя. А использование обратной связи по λ -зонду в большинстве случаев позволяет вернуть смесь до стехиометрического соотношения. Это обеспечивается за счет использования нескольких алгоритмов коррекции величины топливоподачи: кратковременной и долговременной, адаптивной и мультипликативной.

В результате изменения технического состояния элементов системы управления двигателем или топливной аппаратуры может наблюдаться значительное изменение состава топливовоздушной смеси на разных рабочих режимах двигателя. А использование обратной связи по λ -зонду в большинстве случаев позволяет вернуть смесь до стехиометрического соотношения. Это обеспечивается за счет использования нескольких алгоритмов коррекции величины топливоподачи: кратковременной и долговременной, адаптивной и мультипликативной.

2.6.6. Компоненты системы регулирования расхода топлива

Система регулирования расхода топлива на примере бензинового двигателя FSI представлена на рис. 2.42.

Двигатель FSI имеет рабочий объем 1,4 л и мощность 77 кВт. Производительность подкачивающего электронасоса устанавливается равной расходу топлива насосом высокого давления. Благодаря этому снижается расход электроэнергии и соответственно уменьшается расход топлива.

В систему низкого давления входят:

- блок управления топливоподкачивающим электронасосом J538;
- топливный бак;
- топливоподкачивающий электронасос;
- топливный фильтр;

- датчик низкого давления топлива G410.

Обычно в этой системе давление топлива равно 4 бар, только при пуске холодного или горячего двигателя оно повышается до 5 бар.

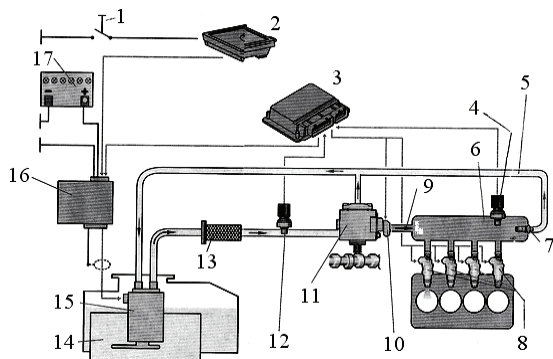


Рис. 2.42. Система регулирования расхода топлива

6 – распределитель топлива; 7 – предохранительный клапан (он защищает детали от чрезмерных давлений, открываясь при 120 барах); 8 – форсунки высокого давления N30-N33; 9 – трубопровод высокого давления; 10 – регулирующий давление топлива клапан N276; 11 – топливный насос высокого давления; 12 – датчик низкого давления топлива G410; 13 – топливный фильтр; 14 – топливный бак; 15 – топливоподкачивающий электронасос; 16 – блок управления электронасосом J538; 17 – аккумуляторная батарея.

В состав системы высокого давления входят:

- топливный насос высокого давления;
- клапан регулирования деления топлива N276;
- трубопровод высокого давления;
- аккумулятор топлива;
- ограничительный клапан;
- датчик высокого давления G247;
- форсунки N30-N33.

В топливной системе высокого давления давление топлива изменяется от 50 до 100 бар.

Контрольные вопросы

1. Какой принцип работы любой системы впрыска?
2. Охарактеризовать три устройства впрыска топлива: систему электронного управления, топливную систему и систему впуска воздуха.
3. Как осуществляется управление моментом и длительностью впрыска топлива?
4. Как осуществляется управление объемом впрыска топлива?
5. Как происходит основной впрыск топлива и последующее обогащение объема впрыска?
6. Как осуществляется коррекция впрыска и состава рабочей смеси?

2.7. Системы управления дизельным двигателем

2.7.1. Системы и компоненты впрыска топлива

Системы управления дизельным двигателем имеют много общего с системами управления бензиновым двигателем. У них отличаются, прежде всего, системы непосредственного впрыска топлива.

Использование простейших электромеханических форсунок для впрыскивания жидкого топлива в цилиндры дизельных двигателей, где требуются все более высокие давления впрыскивания, пока затруднено из-за отсутствия освоенных в серийном производстве электрических приводов с необходимыми ходом, перестановочными силами и быстродействием.

Системы впрыска существующих дизельных двигателей отличаются между собой, главным образом, составными частями топливного насоса высокого давления (ТНВД), регуляторами давления, конструкцией форсунок, механизмом создания высокого давления. Для этого в системе впрыска используется топливный насос высокого давления.

Существуют следующие системы впрыска для дизельного двигателя:

- система с рядным ТНВД;
- система с распределительным ТНВД;
- система с индивидуальными ТНВД;
- система Common Rail.

Системы впрыска со стандартным рядным ТНВД с механическим регулятором частоты вращения и с электронным управлением представлены на рис. 2.43, 2.44.

Наряду с рядным ТНВД система впрыска дизельного топлива (рис. 2.43, 2.44) содержит:

- топливоподкачивающий насос для подачи топлива из бака через систему фильтров к ТНВД;
- механическую или электронную систему регулирования частоты вращения коленчатого вала и количества впрыскиваемого топлива;
- механизм изменения угла опережения впрыскивания в зависимости от частоты вращения коленчатого вала (дополнительное оборудование);
- соответствующее числу цилиндров количество магистралей высокого давления;
- соответствующее числу цилиндров количество форсунок.

Для безупречной работы дизеля все узлы системы впрыска должны быть согласованы друг с другом.

Электронный регулятор. При применении электронного регулятора на педали акселератора размещается датчик, который связан с электронным блоком управления. Датчик определяет положение педали и с учетом реальной частоты вращения коленчатого вала задает исполнительному механизму параметры определенного положения рейки ТНВД.

Электронный регулятор выполняет существенно более обширные задачи, чем механический. Благодаря использованию электрических сигналов, гибкой электронной обработке данных и контуров регулирования с электрическими исполнительными механизмами, электронный регулятор позво-

ляет осуществлять расширенную оценку влияющих факторов, которые не могли учитываться при использовании механического регулятора.

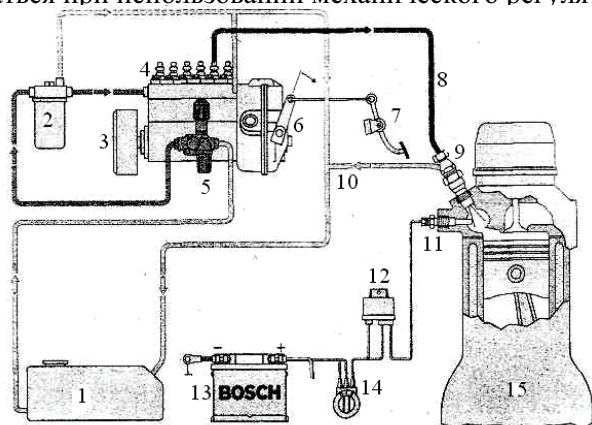


Рис. 2.43. Система впрыска со стандартным рядным ТНВД и механическим регулятором частоты вращения коленчатого вала:

1 – топливный бак; 2 – фильтр тонкой очистки топлива с перепускным клапаном (дополнительное оборудование); 3 – устройство установки угла опережения впрыскивания топлива; 4 – рядный ТНВД; 5 – топливоподкачивающий насос; 6 – регулятор частоты вращения коленчатого вала; 7 – педаль акселератора; 8 – магистраль высокого давления; 9 – форсунка в сборе; 10 – магистраль обратного слива топлива; 11 – штифтовая свеча накаливания; 12 – устройство для регулирования времени включения свечей накаливания; 13 – аккумуляторная батарея; 14 – выключатель свечей накаливания и стартера; 15 – дизель с разделенными камерами сгорания

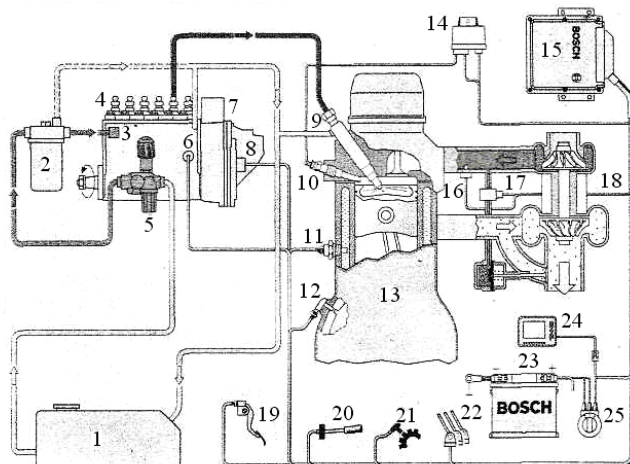


Рис. 2.44. Система впрыска топлива с электронным управлением рядным ТНВД с дополнительной втулкой

На рис. 2.44 приняты следующие обозначения: 1 – топливный бак; 2 – фильтр тонкой очистки топлива; 3 – электромагнитный запирающий клапан; 4 – рядный ТНВД; 5 – топливоподкачивающий насос; 6 – датчик тем-

пературы топлива; 7 – исполнительный механизм изменения момента начала подачи топлива; 8 – исполнительный механизм изменения величины цикловой подачи топлива с датчиками частоты вращения коленчатого вала и положения рейки ТНВД; 9 – форсунка; 10 – штифтовая свеча накаливания; 11 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 12 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 13 – дизель с непосредственным впрыском топлива; 14 – устройство для регулирования времени включения свече накаливания; 15 – блок управления работой дизеля; 16 – датчик температуры воздуха на впуске; 17 – датчик давления наддува; 18 – турбонагнетатель; 19 – датчик положения педали акселератора; 20 – разъем электрического соединения с другими системами автомобиля; 21 – тахограф или датчик скорости движения автомобиля; 22 – датчики на педалях сцепления и тормоза; 23 – аккумуляторная батарея; 24 – диагностический монитор; 25 – выключатель свечей накаливания и стартера двигателя.

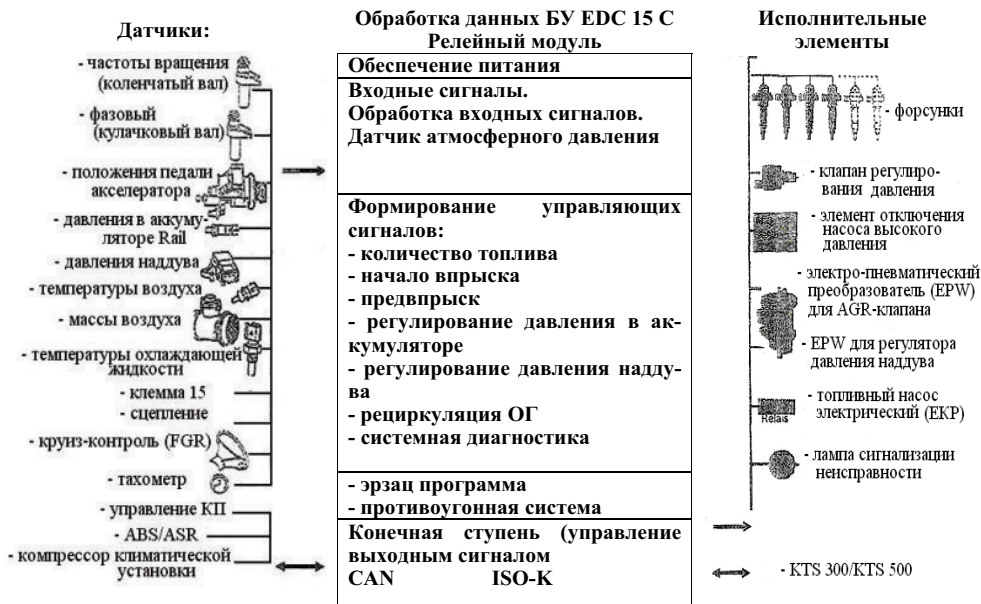


Рис. 2.45. Компоненты системы EDC дизельного двигателя

Компоненты систем электронного управления двигателем (EDC) приведены на рис. 2.45. Они позволяют осуществлять:

- регулирование скорости автомобиля;
- коррекцию подачи топлива в зависимости от:
 - температуры двигателя;
 - температуры топлива;
 - температуры воздуха;
- активное подавление рывков;
- регулирование равномерности работы двигателя;
- исключение аварийных режимов;

- регулирование системы рециркуляции отработавших газов;
- регулирование давления наддува;
- регулирование момента впрыска;
- самодиагностику;
- регулирование стартовой подачи в зависимости от температуры воздуха.

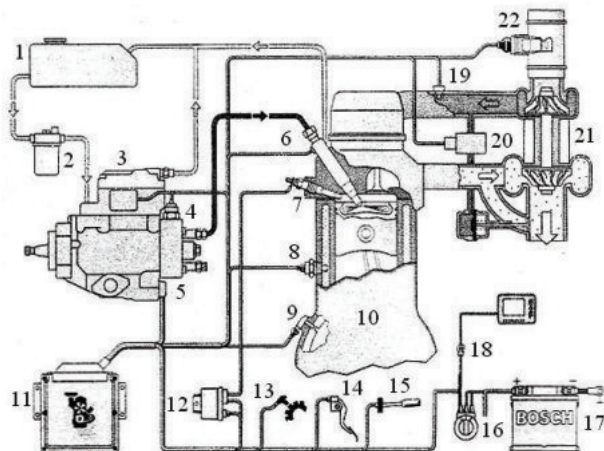


Рис. 2.46. Компоненты системы дизельного впрыска с использованием ТНВД типа VE:

1 – топливный бак; 2 – топливный фильтр; 3 – распределительный ТНВД с исполнительным электромагнитным механизмом и датчиками; 4 – электромагнитный остановочный клапан; 5 – электромагнитный клапан опережения впрыскивания; 6 – форсунка с датчиком хода иглы (как правило в первом цилиндре); 7 – штифтовая свеча накаливания; 8 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 9 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 10 – дизель с непосредственным впрыском топлива; 11 – блок управления работой дизеля; 12 – блок управления временем включения свечей накаливания; 13 – датчик скорости автомобиля; 14 – датчик положения педали акселератора; 15 – дополнительные элементы регулятора скорости автомобиля; 16 – выключатель свечей накаливания и стартера; 17 – аккумуляторная батарея; 18 – штекер подключения системы диагностики; 19 – датчик температуры воздуха; 20 – датчик давления наддува; 21 – турбоагнетатель; 22 – датчик массового расхода воздуха

На рис. 2.46 показаны агрегаты системы впрыска, собранной на основе распределительного ТНВД с аксиальным движением плунжера, работа которой регулируется электронным блоком управления. В зависимости от вида установки и типа автомобиля отдельные компоненты могут отсутствовать. Система состоит из четырех элементов:

- контур снабжения топливом (магистраль низкого давления);
- ТНВД;
- электронная система регулирования работы дизеля с системными блоками датчиков, блоком управления и исполнительными механизмами;
- периферия (например, турбоагнетатель, системы рециркуляции ОГ и управления временем работы свечей накаливания).

Системы управления с электромагнитным клапаном обеспечивают большую гибкость при дозировании топлива и изменении момента начала впрыскивания, чем системы с управлением регулирующей кромкой. Они делают возможными также предварительное впрыскивание для уменьшения шума и коррекцию равномерности цикловой подачи по цилиндрам.

Подобные системы состоят из четырех элементов (рис. 2.47):

- контур снабжения топливом (магистраль низкого давления);
- контур высокого давления со всеми компонентами системы впрыска;
- контур электронного регулирования работы дизеля с системными блоками датчиков, блоком управления и исполнительными механизмами;
- системы управления подачей воздуха, нейтрализации вредных веществ в ОГ и рециркуляции ОГ.

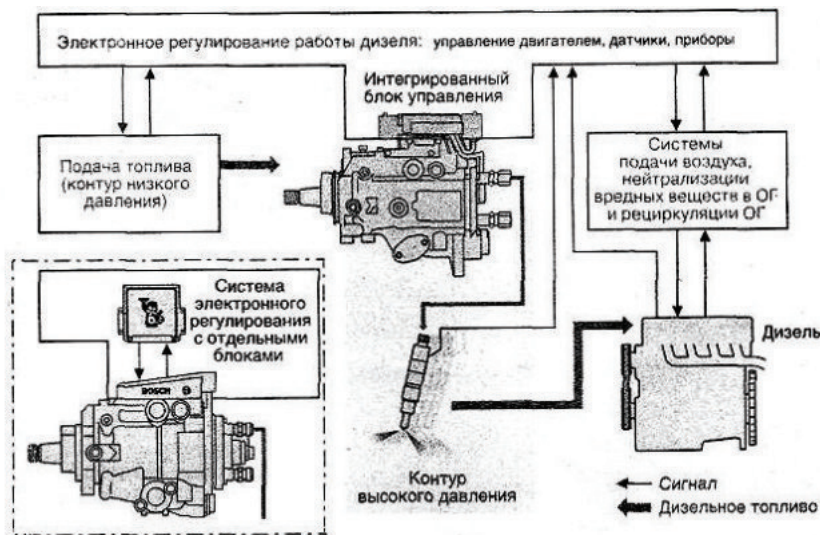


Рис. 2.47. Схема использования в дизелях распределительных ТНВД, управляемых электромагнитным клапаном

На рис. 2.48 показан пример общей схемы управления системой впрыска для четырехцилиндрового дизеля с непосредственным впрыском топлива в камеру сгорания, включая различные компоненты системы. Управление распределительным радиальным ТНВД модели VR осуществляется единым блоком управления двигателем и ТНВД. В зависимости от комплектации и типа автомобиля некоторые узлы могут не применяться. Чтобы получить более наглядное представление о системе, датчики и элементы исполнительных механизмов (А) расположены на схеме не на своих конструктивных местах, а собраны в единую группу. Исключение составляет датчик 21 хода иглы форсунки [5].

Благодаря использованию бортового контроллера связи CAN, помещенного в группу «приборы» (В), стал возможен обмен данными между такими различными системами и агрегатами, как:

- стартер;
- генератор;
- система электронной остановки автомобиля;
- система управления автоматической коробкой передач;
- противобуксовочная система;
- электронная программа стабилизации.

Панель приборов 12 и кондиционер 13 могут быть также подключены через бортовой контроллер связи.

На рис. 2.48 обозначены: двигатель, блок управления двигателем и ТНВД и узлы контура высокого давления системы впрыска: 16 – привод ТНВД; 17 – единый блок PSG 16 управления двигателем и ТНВД; 18 – распределительный ТНВД модели VP 44; 21 – датчик хода иглы форсунки (первый цилиндр); 22 – штифтовая свеча накаливания; 23 – дизель с непосредственным впрыском топлива; М – крутящий момент; А – датчики и исполнительные механизмы: 1 – датчик хода педали акселератора; 2 – механизм выключения сцепления; 3 – контакты тормозных колодок (2); 4 – элементы регулятора скорости автомобиля; 5 – выключатель свечей накаливания и стартера; 6 – датчик скорости автомобиля; 7 – индуктивный датчик частоты вращения коленчатого вала; 8 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 9 – датчик температуры воздуха на впуске; 10 – датчик давления наддува; 11 – пленочный датчик массового расхода воздуха на впуске; В – приборы: 12 – комбинированная панель приборов с отображением сигналов по расходу топлива, частоте вращения и т. п.; 13 – кондиционер с системой управления; 14 – диагностический монитор; 15 – блок управления временем включения свечей накаливания; CAN (Controller Area Network) – бортовой контроллер связи; С – система подачи топлива (контур низкого давления): 19 – топливный фильтр с перепускным клапаном; 20 – топливный бак с фильтром грубой очистки и топливоподкачивающим насосом (только при магистралях большой протяженности или большой разнице между уровнями топливного бака и ТНВД); D – система подачи воздуха: 24 – механизм подачи ОГ с клапаном рециркуляции ОГ; 25 – вакуумный насос; 26 – регулирующая заслонка; 27 – турбонагнетатель (здесь с изменяемой геометрией турбины); 28 –

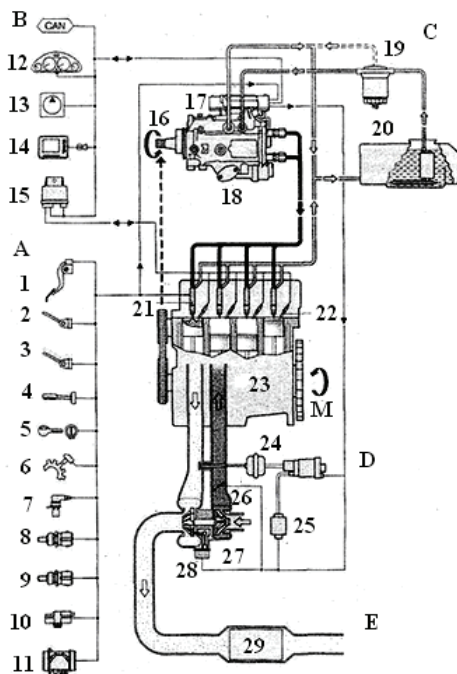


Рис. 2.48. Система впрыска для дизеля с распределительным ТНВД модели VP 44 с управлением электромагнитным клапаном и единым блоком управления PSG 16 для двигателя и ТНВД

исполнительный механизм изменения давления наддува; **Е** – система нейтрализации вредных веществ в ОГ: 29 – нейтрализатор вредных веществ в ОГ.

2.7.2. Функциональные возможности систем управления двигателем

Для эффективной работы дизеля важно, чтобы в его цилиндры впрыскивалось нужное количество топлива в нужный момент. Даже небольшое отклонение от нормы этих параметров впрыска (из-за неисправностей системы) приводит к возрастанию вредных выбросов, к повышенному шуму и снижению топливной экономичности. Процесс впрыска в дизеле происходит за тысячные доли секунды, тогда как количество введенного топлива должно быть выдержано очень точно.

Существует четыре вида характеристик впрыскивания: трапециевидной, прямоугольной формы и двухфазное впрыскивание двух видов. Форма характеристики устанавливается микроконтроллером в соответствии с режимом работы двигателя. Смена форм характеристики впрыскивания обеспечивает уменьшение выбросов NO_x , CH , снижает шум, а также улучшает топливную экономичность двигателя.

Прямоугольная форма с постоянным высоким давлением впрыскивания обеспечивает получение максимальных значений среднего эффективного давления. При двухфазном впрыскивании микроконтроллер устанавливает для каждой фазы продолжительность и давление впрыскивания (т. е. и величину подачи). Повышение устойчивости малых подач достигается в электрогидравлических насос-форсунках предварительным дозированием. Окончание подачи топлива осуществляется нормально закрытым затвором на плунжере при выходе его в заданное крайнее положение, а величина подачи задается временем заполнения камеры под плунжером при взведении мультипликатора в паузах между впрыскиваниями.

Требования снижения расхода топлива и эмиссии вредных веществ с ОГ вместе с повышением мощности и крутящего момента являются решающими факторами, которые стоят за современным развитием топливных систем дизелей.

Это привело к высоким требованиям, предъявляемых к дизельным топливным системам и их управлению, а именно:

- высокое давление впрыскивания;
- формирование необходимой характеристики впрыскивания;
- регулируемый угол опережения впрыскивания;
- двухфазовое впрыскивание топлива с предварительным впрыскиванием, а также возможное дополнительное впрыскивание после основного;
- адаптация количества впрыскиваемого топлива (цикловая подача), давления наддува и угла опережения впрыскивания для данного рабочего режима;
- величина пусковой подачи в зависимости от температуры охлаждающей жидкости двигателя и окружающей среды;
- регулирование минимальной частоты вращения на холостом ходу;

- круиз-контроль;
- управление с обратной связью рециркуляции ОГ;
- жесткие допуски для цикловой подачи и угла опережения впрыскивания вместе с высокой точностью, которая должна поддерживаться на протяжении всего срока службы автомобиля.

Все возрастающие требования к системам регулирования дизелей привели к тому, что электронные системы управления прошли путь от простых систем с электромагнитным приводом, управляемого пусковым сигналом, до сложных систем с электронным блоком управления (ЭБУ), который способен обрабатывать множество сигналов в реальном времени.

Значительное увеличение вычислительных возможностей микропроцессоров сделало возможным осуществление электронного управления дизелями в соответствии с перечисленными ранее требованиями.

В отличие от управления автомобилем с дизелем, которые имеют обыкновенные рядные или распределительного типа ТНВД, водитель автомобиля с электронным управлением дизелем не может прямо влиять, например, через педаль акселератора с механическим приводом (трос Боудена), на величину подачи топлива. Наоборот, количество впрыскиваемого топлива определяется множеством рабочих параметров, например:

- входным сигналом от водителя (положение педали акселератора);
- рабочим режимом двигателя;
- температурой охлаждающей жидкости двигателя;
- эмиссией токсических компонентов и т. п.

Используя эти рабочие параметры (переменные), ЭБУ не только рассчитывает количество впрыскиваемого топлива, но может также изменять момент начала впрыска топлива (то есть угол опережения впрыска). Это значит, что может быть применен всесторонний защитный метод, при котором определяются отклонения параметров и в зависимости от их серьезности инициируются соответствующие контрмеры, например, ограничение крутящего момента или (в случае неисправности – аварийный режим работы) движение на режиме холостого хода. Таким образом, система электронного управления содержит определенное число контуров управления с обратной связью.

Система электронного управления дизелей позволяет также обмен данными с другими электронными системами автомобиля, например, с системой противобуксовывания (TCS), электронной системой управления трансмиссией или электронной системой курсовой устойчивости (ESP). Это значит, что управление двигателем может быть интегрировано в общую систему управления автомобилем, как, например, для уменьшения крутящего момента во время переключения передач в автоматической коробке передач, адаптации крутящего момента двигателя при проскальзывании колес, сигнала на разблокирование подачи топлива от иммобилайзера автомобиля и т. д.

Система электронного управления дизелем полностью интегрирована с диагностической системой автомобиля. Она сообщается с бортовой системой диагностики OBD и EOBD.

Система электронного управления дизелем содержит три системных блока (рис. 2.49):

1. Датчики и генераторы импульсов для регистрации эксплуатационных условий (например, частоты вращения) и генерирования желаемых значений параметров (например, положение любого выключателя). Они преобразуют различные физические величины в электрические сигналы.

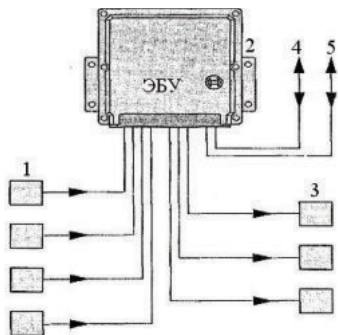


Рис. 2.49. Основные компоненты системы электронного управления дизелем:

1 – датчики и генераторы импульсов; 2 – ЭБУ; 3 – исполнительные устройства (приводы); 4 – интерфейс с другими системами; 5 – диагностический интерфейс

Система электронного управления дизельным двигателем контролирует количество впрыскиваемого топлива, момент начала впрыска, ток факельной свечи и т. п. На рис. 2.50 представлена система управления топливным насосом высокого давления, переделанная из механической в электронную.

На этом примере видно, что поскольку насос работает на принципах механики, данная система существенно отличается от электронной системы впрыска бензинового двигателя.

Схема топливной системы Common Rail приведена на рис. 2.49-2.52.

Управление опережением и

2. Электронный блок управления (2) обрабатывает информацию, полученную от датчиков и генераторов (1), в соответствии с данным алгоритмом управления. ЭБУ выдает управляющие сигналы на исполнительные устройства (3), а также устанавливает связь с другими системами автомобиля 4 и его диагностическим оборудованием 5 (рис. 2.49).

3. Электромагнитные исполнительные устройства (приводы) преобразуют электрические выходные сигналы ЭБУ в механические величины (например, для электромагнитного клапана управления подачей или другим электромагнитным приводом).

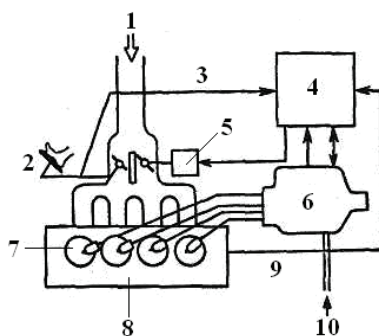


Рис. 2.50. Комплексная электронная система управления дизельным двигателем:

1 – воздух; 2 – датчик открытия дроссельной заслонки; 3 – степень открытия дроссельной заслонки; 4 – ЭБУ; 5 – исполнительное устройство; 6 – топливный насос высокого давления; 7 – форсунка впрыска топлива; 8 – двигатель; 9 – частота вращения коленчатого вала двигателя; 10 – топливо

продолжительностью впрыскивания осуществляется изменением фазы и длительности электрического импульса, подаваемого микроконтроллером. Фаза управляющих импульсов устанавливается в соответствии с сигналами датчиков положения коленчатого и распределительного валов. Один из них используется обычно и в качестве датчика частоты вращения. Оба датчика необходимы для определения тактов в очередных цилиндрах четырехтактных двигателей. Датчик положения коленчатого вала вообще нужен только для повышения точности управления опережением впрыскивания топлива. На определение положения поршня в цилиндре по положению распределительного и тем более кулачкового вала ТНВД влияют погрешности передач от коленчатого вала.

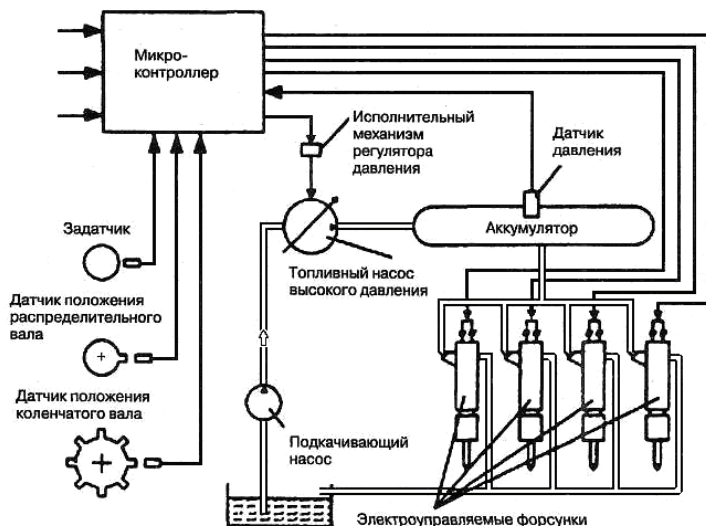


Рис. 2.51. Схема аккумуляторной топливной системы высокого давления с электроуправляемыми форсунками

Давление впрыскивания устанавливается непрерывным регулированием давления в аккумуляторе по сигналам датчика давления за счет изменения, например, производительности ТНВД.

Более рационально использовать в аккумуляторных системах упрощенные и надежные нерегулируемые ТНВД. Фирма Bosch для регулирования давления использует (рис. 2.52) сброс части топлива из магистрали высокого давления [12].

Давление в аккумуляторе адаптивно поддерживается оптимальным для каждого режима работы двигателя автоматическим регулятором, программно реализованном в микропроцессоре.

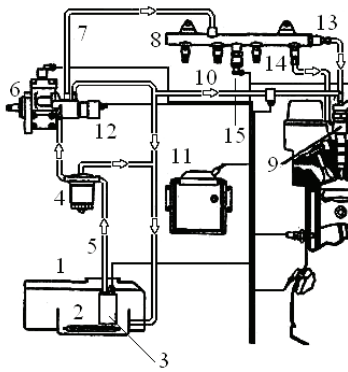


Рис. 2.52. Схема аккумуляторной топливной системы высокого давления фирмы Bosch

в аккумуляторе; 14 – ограничители подачи топлива в форсунки; 15 – датчик давления топлива в аккумуляторе.

Применительно к электронным топливным системам (ЭТС) высокого давления можно выделить следующие основные их классы **отличительных признаков** [5, 12]:

1. Импульсное питание форсунок от ТНВД с механическим приводом плунжеров, с непрерывным усредненным управлением впрыскиванием в ТНВД – ЭТС с непрерывно управляемыми ТНВД (непрерывно управляемые ЭТС).

2. Импульсное питание форсунок от ТНВД с механическим приводом плунжеров, с импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыскивания в магистралях высокого давления или форсунках – механоприводные ЭТС.

3. Импульсное питание форсунок от ТНВД с пневматическим приводом плунжеров и импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыскивания в магистралях высокого давления или форсунках – пневмоприводные ЭТС.

4. Непрерывное питание форсунок от аккумуляторов топлива среднего давления и импульсной мультипликацией в ТНВД, с гидравлическим приводом плунжеров, импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыскивания в ТНВД и/или форсунках при непрерывном управлении давлением в магистралях среднего давления – гидрприводные ЭТС.

5. Непрерывное питание форсунок от аккумуляторов топлива высокого давления и импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыскивания в форсунках при непрерывном управлении давлением в магистралях высокого давления – аккумуляторные ЭТС.

Подсистема высокого давления включает ТНВД, форсунки, трубки высокого давления, аккумулятор высокого давления. Форсунки связаны с аккумулятором короткими магистралями высокого давления.

На рис. 3.52 цифрами обозначены: 1 – топливный бак; 2 – предварительный фильтр топлива; 3 – электроприводной топливоподкачивающий насос; 4 – фильтр дополнительной очистки топлива; 5 – топливопроводы низкого давления; 6 – ТНВД; 7 – топливопроводы высокого давления; 8 – аккумулятор; 9 – электрогидравлическая форсунка; 10 – сливные топливопроводы; 11 – микроконтроллер; 12 – исполнительный электромагнитный клапан регулятора давления в аккумуляторе; 13 – клапан-ограничитель давления

Давление внутри аккумулятора измеряется датчиком давления топлива и ограничивается клапаном регулирования давления до некоторой максимально допустимой величины в зависимости от параметров системы впрыскивания. Через ограничитель расхода топлива, который дросселирует поток топлива, оно под давлением поступает к форсункам. Электрогидравлические форсунки, независимо от производителя, имеют одинаковый принцип. Чтобы осуществить впрыскивание, на электромагнитный клапан подается электрический импульс, после чего он открывает сливное отверстие специальной управляющей камеры. Так как в закрытом состоянии игла форсунки удерживается не пружиной как в классической топливной аппаратуре, а силой от давления топлива, действующей на шток-мультипликатор, то падение давления в управляющей камере приводит к перемещению мультипликатора и поднятию иглы форсунки.

Функциональные возможности. Во всех вариантах ЭТС наиболее важными являются те функциональные возможности, которые трудно или вообще не осуществимы в неэлектронных топливных системах. К их числу относятся [12]:

- раздельная управляемость величиной подачи, давлением, опережением, числом фаз, формой характеристики впрыскивания, числом работающих цилиндров (циклов), равномерностью нагрузки цилиндров, ограничением подачи;

- независимость давления впрыскивания от длительности и опережения впрыскивания;

- независимость опережения впрыскивания от длительности и давления впрыскивания;

- возможность сохранения работоспособности двигателя при отказах отдельных элементов.

Сложность адаптации ЭТС на двигателе определяется объемом и характером изменений, вводимых в другие агрегаты двигателя, что вызвано необходимостью размещения и работы ЭТС.

В непрерывно управляемых электронных топливных системах импульсным модулятором служит ТНВД, в котором осуществляется формирование гидравлических импульсов питания форсунок топливом и непрерывное усредненное управление параметрами этих импульсов. При этом в ТНВД сосредоточено все управление впрыскиванием, которое может выражаться перемещением реек, определяющих величину, фазу и давление подачи топлива к обычным форсункам, или перемещением клапанов, изменяющих гидравлическое сопротивление на входе, выходе или в перепускных каналах насоса, и т. п.

В большинстве случаев для этого используются электромеханические преобразователи непрерывного действия, но применимы и преобразователи релейного действия, осуществляющие широтно-импульсную модуляцию. Гидравлическая часть такой топливной системы в большинстве случаев мало отличается от систем с механическим или гидравлическим управлением.

Управляющие воздействия на ТНВД формируются и осуществляются микроконтроллером на основе информации о заданной (через задатчик) и

действительной (через датчик) частоте вращения, а также информации о состоянии двигателя и связанных с ним агрегатов и от других систем управления через электромеханические преобразователи, установленные в ТНВД.

В двигателях с искровым зажиганием: момент появления искры определяет начало процесса сгорания, в то время как в дизельных двигателях таким моментом является начало впрыска топлива. Целью управления впрыском является уменьшение количества вредных примесей в отработавших газах, дымность, вибрацию и шум, оптимизировать и стабилизировать частоту вращения коленчатого вала, на холостом ходу.

Система впрыска топлива дизельных двигателей выполняет следующие функции:

- измерение необходимого количества впрыскиваемого топлива;
- создание необходимого давления для системы впрыска топлива;
- впрыск топлива в определенный момент за определенный промежуток времени.

Аккумуляторная система содержит в себе контур низкого давления, контур высокого давления, систему электронной регулировки работы дизельного двигателя, датчики и исполнительные механизмы, системы подачи воздуха и отвода отработавших газов.

Давление впрыска создается и регулируется автономным ТНВД независимо от частоты вращения коленчатого вала и величины цикловой подачи. Впрыскивание осуществляется посредством форсунки, открытие и закрытие которой определяет электромагнитный клапан. Системы управления с электромагнитным клапаном обеспечивают большую гибкость при дозировании топлива и изменении момента начала впрыска, чем системы с управлением регулирующей рейкой. Из-за высокого давления в системе Common Rail топливо нагревается так сильно, что перед обратным сливом его следует остудить для защиты от перегрева. Для этого топливо пропускают через специальные радиаторы.

2.7.3. Преимущества и недостатки электронных систем управления двигателем

Преимуществами применения электронной системы управления являются:

- точно определен момент начала впрыска;
- точное определение количества впрыскиваемого топлива;
- регулировка холостого хода независимо от нагрузки;
- управление рециркуляцией отработавших газов;
- регулирование принудительного холостого хода;
- передача информации о температуре двигателя, расходе топлива и других значениях с помощью шины передачи данных.

Благодаря последним разработкам в области технологии производства топливных систем можно обеспечить прямой впрыск, использовать общий топливный аккумулятор, многоступенчатый впрыск, работу турбонагнетателей различной геометрии. Система управления двигателем регулирует

давление топлива, обеспечивает нужное опережение впрыска, контролирует работу системы рециркуляции газов и характеристики турбонагнетателя.

Для эффективной работы дизеля важно, чтобы в его цилиндры впрыскивалось нужное количество топлива в нужный момент. Многие системы управления дизелями работают совместно со штатными насосами рядного или распределительного типов, а цикловая подача топлива и опережение впрыска управляются не механически, а с помощью электроники. На автомобиле установлены многочисленные датчики, измеряющие различные переменные величины, такие как положение педали акселератора, обороты коленчатого вала, положение распределительного вала, массовый расход воздуха, поступающего в двигатель, давление в нагнетателе, температура охлаждающей жидкости, температура наружного воздуха и т. д.

Информация с многочисленных датчиков регистрируется электронным блоком управления (ЭБУ), который рассчитывает значения управляющих сигналов. В памяти ЭБУ хранятся карты значений цикловой подачи топлива и моментов начала впрыска. Выполнив ряд вычислений, основанных на показаниях датчиков, ЭБУ выбирает из карт наиболее подходящие значения цикловой подачи и момента начала впрыска. ЭБУ способен анализировать данные и выполнять вычисления много раз в секунду, обеспечивая очень точное управление двигателем в соответствии с режимом его работы.

ЭБУ адаптируется к изменениям рабочих характеристик двигателя, постоянно контролируя сигналы многочисленных датчиков. По мере износа двигателя и его деталей ЭБУ приспособливается к изменившимся характеристикам и корректирует исходные карты.

Давление впрыска топлива на современных автомобилях с компьютеризированным дизелем увеличено до 150 МПа при минимальном его отклонении на каждой из форсунок, что достигается использованием в системе общей для всех форсунок аккумулятора топлива. На некоторых автомобилях в качестве форсунок применяются впрыскиватели насос-форсунки, приводимые в действие от специальных кулачков на распределительном вале двигателя.

Несмотря на повышенную по сравнению с бензиновыми двигателями дымность, дизель становится все популярнее. Новые, более совершенные системы впрыска и методы сгорания, устройства очистки отработавших газов делают дизель все более экологически чистым.

Особенности систем с микропроцессорным управлением, в качестве преимуществ по сравнению с аппаратурой топливоподачи традиционного типа:

- обеспечение гибкого регулирования цикловой подачи в соответствии с заданным скоростным режимом двигателя; обеспечение необходимой внешней скоростной характеристики (не обязательно жестко заданной);

- достижение минимальной неравномерности подачи топлива по цилиндрах или, наоборот, оптимальные неравномерность подачи и угол опережения впрыскивания для каждого цилиндра в соответствии с его особенностями конструкции, технологии изготовления и текущего технического состояния;

- оптимальное регулирование угла опережения впрыскивания в соответствии с режимом работы;
- автоматизация пуска, необходимое обогащение при пуске, выключение подачи топлива на принудительном холостом ходе, регулирование на переходных режимах;
- отключение цилиндров и циклов на частичных режимах;
- диагностирование датчиков и исполнительных устройств и компенсация вышедших из строя с помощью резервных программ.

Функции системы управления могут объединяться с управлением двигателем или транспортным средством.

Автоматическая система подачи топлива (АСПТ) с микропроцессорным управлением позволяет:

- получить низкий эксплуатационный расход топлива при достаточно высоких динамических показателях транспортного средства;
- организовать построение гидравлической схемы по модульному принципу при относительно простой конструкции отдельных узлов топливных аппаратур;
- обеспечить самостоятельное прокачивание системы в случае попадания воздуха при утрате герметичности;

Недостатки АСПТ:

- высокая чувствительность к качеству фильтрации топлива;
- высокая чувствительность к наличию воды в топливе;
- пониженная надежность гидравлических узлов форсунки, из-за того, что вся система постоянно пребывает под высоким давлением, а также из-за усложнения ее конструкции;
- высокое сажеобразование вследствие специфики реализованного рабочего процесса.

2.7.4. Размещение и взаимосвязь компонент систем управления двигателем

Взаимосвязь компонентов электронной топливной системы дизельного двигателя, оснащенного аккумуляторной топливоподачей, показана на рис. 2.53.

На рис. 2.53 обозначены: 1 – ТНВД; 2 – впускной электроклапан; 3 – электроклапан перепуска на слив; 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – бак, фильтр, электрический ТПН; 6 – блок управления; 7 – реле свечи; 8 – электроаккумулятор; 9 – гидроаккумулятор CR; 10 – датчик давления; 11 – аварийный ограничитель подачи; 12 – предохранительный клапан; 13 – датчик температуры топлива; 14 – электрогидравлическая форсунка; 15 – свеча накаливания; 16 – датчик температуры жидкости; 17 – датчик частоты и положения коленчатого вала; 18 – датчик такта дизеля; 19 – датчик температуры воздуха; 20 – датчик давления воздуха; 21 – расходомер воздуха; 22 – турбокомпрессор; 23 – регулятор рециркуляции отработавших газов; 24 – регулятор наддува; 25 – компрессор; 26 – панель приборов; 27 – педаль ак-

селератора; 28, 29 – датчики трансмиссии, агрегатов и др.; 30 – датчик и указатель скорости; 31 – задатчик скорости; 32 – компрессор кондиционера; 33 – задатчик работы кондиционера; 34 – лампа и разъем диагностики.

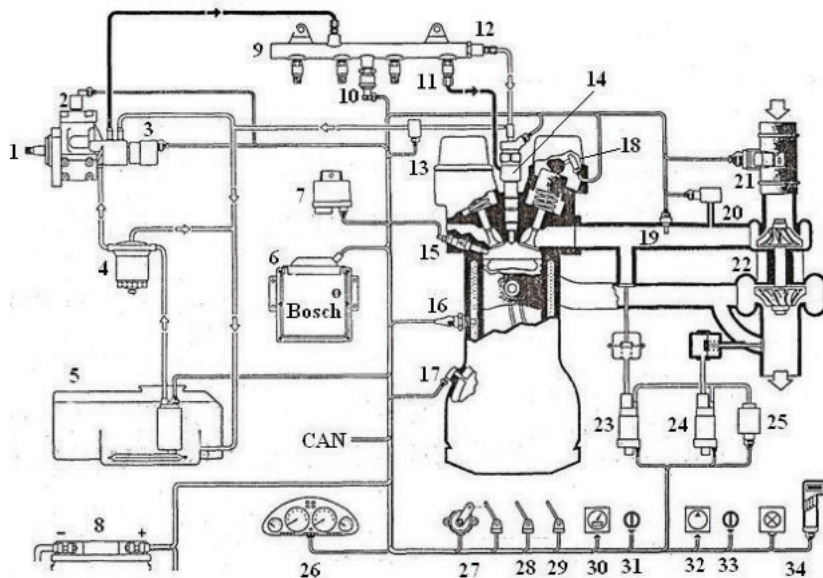


Рис. 2.53. Система CR в составе быстроходного автомобильного дизеля:

Комбинация аккумуляторной системы топливоподачи с микропроцессорным управлением, усиливая энергетические связи и расширяя информационные связи, создает важнейшие предпосылки для повышения удельной мощности, снижения расхода топлива, а также для уменьшения уровня шума и эмиссии отработавших газов. Взаимосвязь компонентов системы управления можно рассмотреть на примере схемы, приведенной на рис. 2.54.

На схеме выделены характерные зоны размещения компонентов [5].

Зона «А» отображает элементы, расположенные на рабочем месте водителя: 1 – выключатель стартера и свечей накаливания; 2 – датчик-выключатель сцепления; 3 – контакты тормозов (2); 4 – установочный элемент регулятора скорости автомобиля; 5 – датчик положения педали акселератора; 6 – комбинированная панель приборов; 7 – панель управления компрессором кондиционера; 8 – диагностический монитор и таймер работы свечей накаливания; комбинированная панель приборов с выдачей сигналов о расходе топлива, частоты вращения коленчатого вала и др.; шина CAN (интерфейс межсистемного обмена).

В зоне «В» сгруппированы датчики, расположенные на двигателе: 9 – пленочный измеритель массового расхода воздуха; 10 – датчик фазы; 11 – датчик скорости автомобиля; 12 – датчик частоты вращения коленчатого

вала; 13 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 14 – датчик температуры воздуха на впуске; 15 – датчик давления воздуха во впускном трубопроводе.

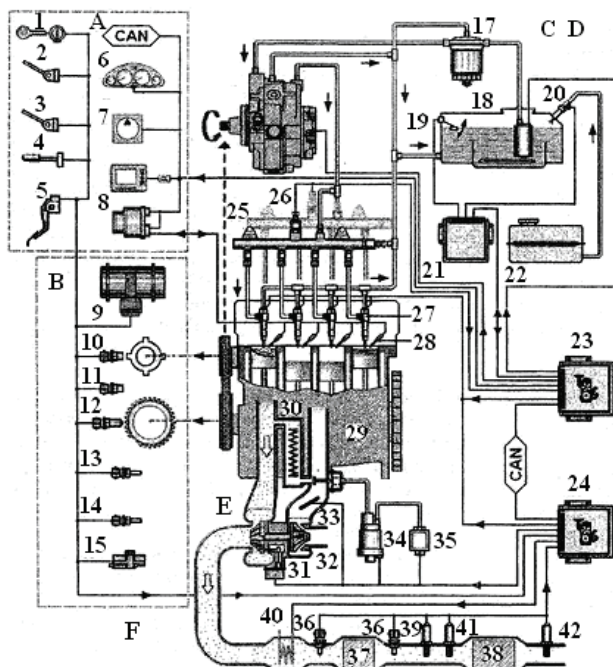


Рис. 2.54. Схема размещения компонентов системы управления дизелем

В зоне «С» расположен контур низкого давления топливной системы: топливный фильтр с клапаном перепуска топливный бак с фильтром грубой очистки и топливоподкачивающим насосом; датчик уровня топлива.

Зона «В» охватывает дополнительные системы: 20 – дополнительное дозирование; 21 – дополнительный (ведомый) контроллер; 22 – дополнительный бак.

Зона «Е». Снабжение воздухом: 30 – охладитель рециркуляционных отработавших газов; 31 – регулятор давления наддува; 32 – турбоагнетатель (здесь с изменяемой геометрией турбины VTG); 33 – регулирующая заслонка; 34 – исполнительный механизм рециркуляции отработавших газов; 35 – вакуумный насос.

Зона «F». Очистка отработавших газов: 36 – датчик температуры отработавших газов; 37 – нейтрализатор окисляющий; 38 – сажевый фильтр; 39 – датчик перепада давлений; 40 – подогреватель отработавших газов; 41 – датчик уровня NO_x ; 42 – широкополосный лямбда-зонд; 43 – нейтрализатор NO_x накопительного типа; 44 – двухрежимный лямбда-зонд; 45 – каталитический очистной сажевый фильтр.

Двигатель, его система управления и агрегаты высокого давления представлены на схеме таким образом: 16 – ТНВД; 23 – блок управления работой дизеля (ведущий контроллер); 24 – блок управления работой дизеля (ведомый); 25 – топливный аккумулятор высокого давления; 26 – датчик давления топлива в аккумуляторе; 27 – электрогидравлическая форсунка; 28 – штифтовая свеча накаливания; 29 – дизель.

Элементы системы электронного впрыска топлива, установленной на двигателе Audi 2,5 литра, показаны на рис. 2.55.

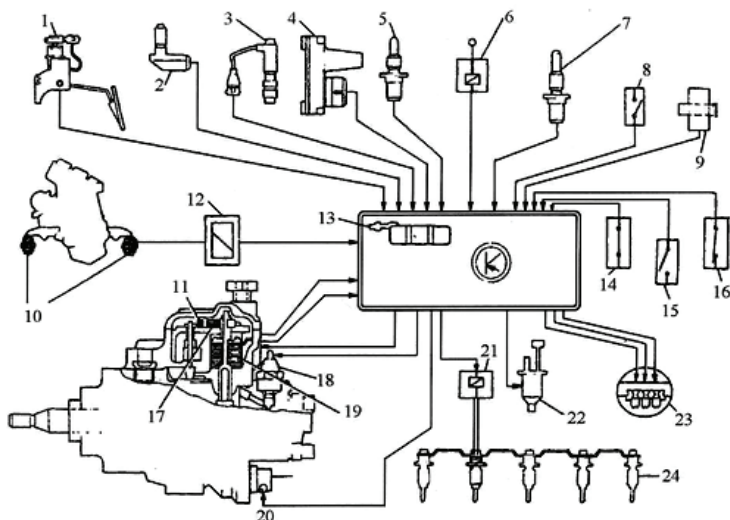


Рис. 2.55. Элементы системы электронного впрыска топлива, установленные на двигателе Audi 2,5 литра

На рис. 2.55 приняты следующие обозначения: 1 – датчик положения педали акселератора; 2 – датчик скорости двигателя; 3 – форсунка с датчиком подъема иглы; 4 – датчик давления нагнетателя; 5 – датчик температуры нагнетаемого воздуха; 6 – реле подачи топлива; 7 – датчик температуры двигателя; 8 – выключатель кондиционера; 9 – датчик скорости автомобиля; 10 – электрогидравлические опоры двигателя; 11 – датчик температуры топлива; 12 – реле электрогидравлических опор двигателя; 13 – датчик атмосферного давления; 14 – датчик сцепления (круиз-контроль); 15 – датчик тормозной педали (круиз-контроль); 16 – выключатель стоп-сигнала; 17 – потенциометр перемещения управляющей втулки; 18 – клапан отсечки топлива; 19 – исполнительный механизм; 20 – электронное устройство опережения впрыска; 21 – реле свечей накаливания; 22 – золотник; 23 – диагностический разъем; 24 – свечи накаливания.

Блок-схема типичной электронной системы управления дизельным двигателем приведена на рис. 2.56.

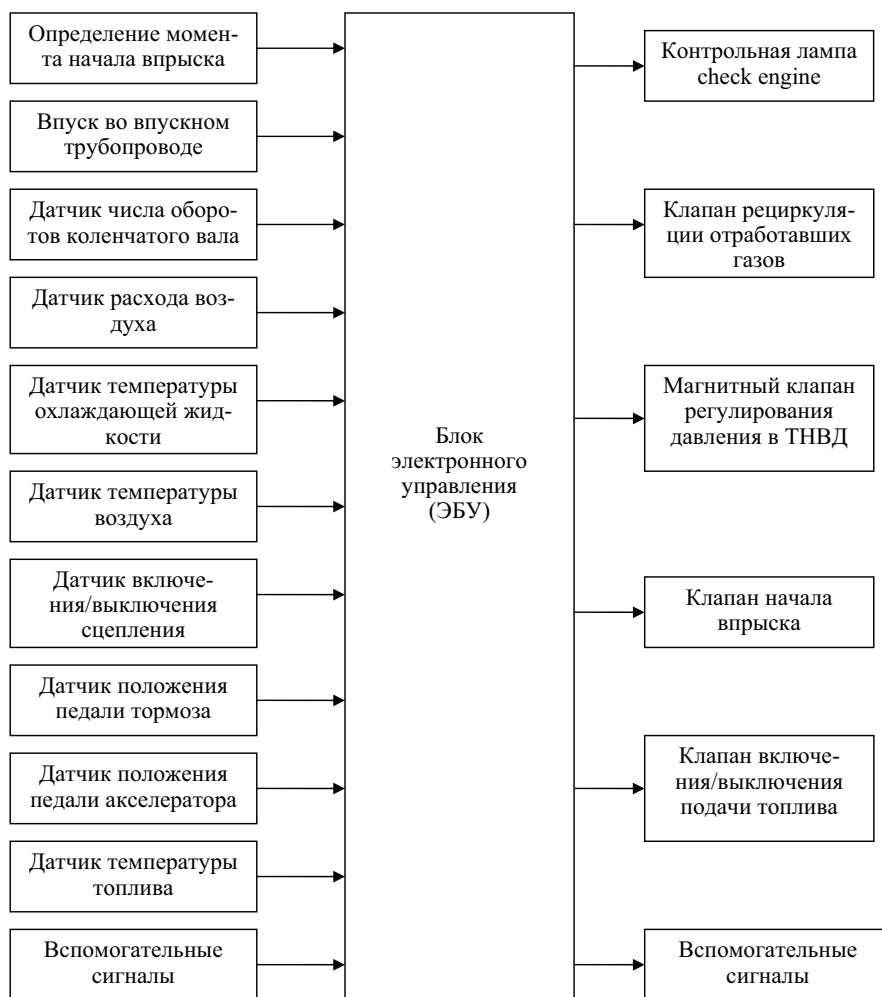
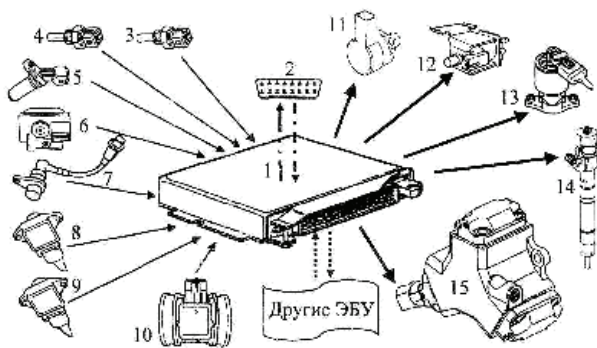


Рис. 2.56. Блок- схема электронной системы управления дизельным двигателем

Принципиальная схема систем управления двигателем представлена на рис. 2.57. Здесь 3, 4 – датчики сигналов, 11-15 – исполнительные устройства.

Другие ЭБУ – блок коробки передач, система АБС, система ЕСП, система круиз-контроля.

Другие обозначения: 1 – ЭБУ; 2 – диагностический разъем; 3, 4 – датчики температуры воздуха и охлаждающей жидкости соответственно; 5 – датчик фазы; 6 – датчик давления наддува; 7 – датчик числа оборотов;



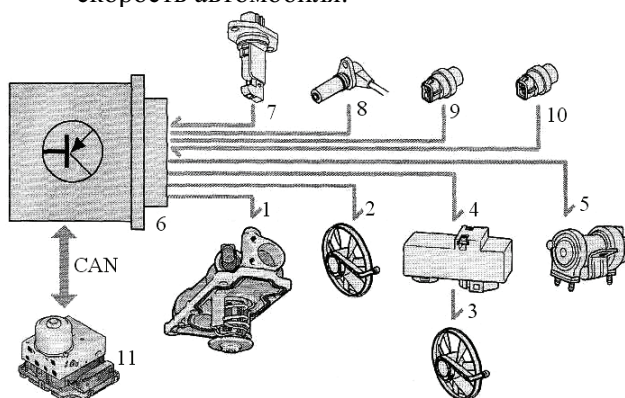
8, 9 – датчики положения педалей акселератора и тормоза соответственно; 10 – расходомер воздуха; 11 – регулятор давления топлива; 12 – клапан управления турбокомпрессором; 13 – клапан рециркуляции отработавших газов; 14 – форсунка; 15 – ТНВД.

Рис. 2.57. Элементы системы управления двигателем

2.8. Компоненты системы регулирования температуры охлаждающей жидкости и дроссельной заслонки

Регулирование температуры охлаждающей жидкости позволяет привести ее в соответствие с режимами работы двигателя. Регулирование температуры осуществляется по данным входных параметров (рис. 2.58):

- частота вращения коленчатого вала;
- нагрузка двигателя – сигнал измерителя массового расхода воздуха;
- температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя;
- температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора;
- скорость автомобиля.



На рис. 2.58 цифрами обозначены: 1 – термостат регулирования системы охлаждения в соответствии с многопараметровой характеристикой; 2 – основной вентилятор системы охлаждения; 3 – дополнительный вентилятор системы охлаждения; 4 – блок управления дополнительным вентилятором системы охлаждения;

Рис. 2.58. Компоненты регулирования температуры охлаждающей жидкости двигателя
5 – насос охлаждающей жидкости; 6 – блок управления двигателем; 7 – измеритель массового расхода воздуха; 8 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 9 – датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя; 10 – датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из

радиатора; 11 – сигнал скорости автомобиля, поступающий от блока управления (АБС) (J104).

Если входные сигналы свидетельствуют о необходимости увеличения интенсивности охлаждения, блок управления двигателем подает команду на открытие термостата в соответствии с многопараметровой характеристикой. При этом начинает действовать большой контур системы охлаждения. Дальнейшее усиление охлаждения двигателя происходит в результате включения обоих вентиляторов и регулирования их в соответствии с многопараметровой характеристикой. При этом включение дополнительного вентилятора осуществляется посредством отдельного блока управления.

Положение дроссельной заслонки определяет степень открытия воздухопропускного канала (отверстия). Это позволяет управлять расходом воздуха, поступающего в цилиндры.

Управление дроссельной заслонкой осуществляется по данным основных входных сигналов с модуля педали акселерометра (рис. 2.59) и дополнительных сигналов (6):

- сигналы с системы регулирования скорости;
- сигналы с системы кондиционирования;
- сигналы с системы регулирования состава смеси;
- сигналы с автоматической трансмиссии;
- сигналы с АБС;
- сигналы с усилителя руля;
- сигналы с генератора.

Сигналы с модуля педали акселератора, положение которой изменяется водителем, поступают на вход блока управления двигателем. В блоке управления производится обработка этих сигналов с учетом всех дополнительных величин и определяется оптимальный режимы работы двигателя, соответствующий задаваемому водителем крутящему моменту.

Переход на новый режим работы двигателя осуществляется поворотом приводимой от электромотора дроссельной заслонки при соответствующих установках систем зажигания и впрыска топлива. О возникновении в системе какой-либо неисправности водитель узнает по свечению контрольной лампы.

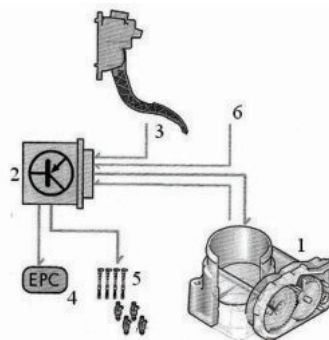


Рис. 2.59. Управление дроссельной заслонкой:

1 – блок управления дроссельной заслонкой; 2 – блок управления двигателем; 3 – модуль педали акселератора; 4 – контрольная лампа электропривода дроссельной заслонки EPC (Electronic Power Control); 5 – система зажигания и впрыска; 6 – дополнительные сигналы

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте систему впрыска с рядным, распределительным и индивидуальным ТНВД.
2. Как работает система впрыска Common Rail?
3. Из каких основных компонентов состоит электронная система управления двигателем Common Rail?
4. Какие отличительные признаки электронной топливной системы высокого давления?
5. Привести функциональные возможности электронных топливных систем.
6. Какие преимущества электронных систем управления двигателем.
7. Какие недостатки имеют автоматические системы подачи топлива с микропроцессорным управлением?
8. Назвать особенности системы впрыска с рядным ТНВД.
9. Привести особенности системы впрыска с распределительным ТНВД.
10. Какие особенности системы впрыска с индивидуальным ТНВД?

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Классификация методов диагностирования и области их применения

Двигатели внутреннего сгорания вместе с их системами управления режимами работы являются самыми сложными объектами транспортных машин. Двигатели имеют сложные механические системы ЦПГ, КШМ, ГРМ; узлы трения качения и скольжения; зубчатые, ременные и другие передачи; гидро-, газо-, аэродинамические системы наддува, приготовления горючей смеси и топливоподачи с принудительным воспламенением в бензиновых двигателях или воспламенения от сжатия в дизелях; сложные системы воздушного или жидкостного охлаждения двигателя и мехатронные и электронные системы управления рабочими процессами.

Для проектирования диагностического обеспечения двигателей, их доводки, диагностирования отдельной системы двигателя требуется большой арсенал теоретических, эвристических и эмпирических методов.

В табл. 3.1 приведены основные группы интеллектуальных и инструментальных методов. В каждой группе методов показаны их виды, дана характеристика и указана область применения. Представленные в табл. 3.1 методы применительно к автомобилям рассматривались в работах [14, 15].

Все процессы диагностирования неразрывно связаны с использованием описанных интеллектуальных и инструментальных методов. При этом первостепенную роль в диагностировании играют интеллектуальные методы, включая необходимость получения диагноста большого объема знаний по объекту диагностирования. Особое значение интеллектуальных методов проявляется на этапах разработки диагностического обеспечения двигателя. В первую очередь необходимы знания конструкции и рабочих процессов, типовых дефектов и неисправностей, их диагностических параметров, методов и средств их диагностирования. Описанию таких знаний посвящены работы [24, 32, 47].

Таблица 3.1

Классификация методов диагностики и области их применения

Группы методов	
1. Интеллектуальные системы	
Виды методов	Области применения
Органами чувств человека – органолептические. Теоретические. Эвристические. Экспертные. Опросы и интервью. Когнитивный анализ и отбор информативных диагностических признаков. Логические, математическая логика.	Фундаментальные теоретические познания объектов, методов, средств и ключевых понятий диагностики на стадиях конструирования, изготовления и эксплуатации двигателей. Определение взаимосвязей, обобщение, систематизация, обоснование и принятие решений.

Виды методов	Области применения
<p>Логическая алгоритмизация выбора диагностических параметров и поиска дефектов и неисправностей.</p> <p>Структурно-следственные и функционально-структурные методы распознавания неисправностей.</p> <p>Детерминированные.</p> <p>Статистические.</p> <p>Математического моделирования.</p> <p style="text-align: center;">• • •</p>	<p>Разработка диагностического обеспечения, моделирование, алгоритмизация и программирование процессов диагностики.</p>
2. Неразрушающий контроль	
<p>Магнитный.</p> <p>Электрический по регистрации электрических полей.</p> <p>Вихревой.</p> <p>Визуально-оптический.</p> <p>Радиоволновой.</p> <p>Тепловой.</p> <p>Радиационный.</p> <p>Оптический.</p> <p>Акустический.</p> <p>Проникающих веществ.</p> <p>Акустической голографии.</p>	<p>Контроль качества материалов, технологических процессов, конструкций, соединений деталей при изготовлении, ремонте и эксплуатации двигателей, прогнозирование остаточного ресурса деталей и конструкций.</p>
3. Распознавание по эталонам, маскам и нормативным параметрам	
<p>Сравнение с эталонным образцом.</p> <p>Совмещение с опорным спектром процесса.</p> <p>Сравнение показаний измерительного прибора с показаниями эталонного прибора.</p> <p>Сравнение текущих значений диагностического параметра с нормативным значением.</p>	<p>Создание программного обеспечения автоматизированных бортовых, переносных и стационарных систем диагностирования с элементами распознавания неисправностей, прогнозирования остаточного ресурса.</p>
4. Тепловые и оптические	
<p>Измерение теплового инфракрасного излучения.</p> <p>Контактные методы.</p> <p>Неконтактные методы.</p> <p>Электронно-оптические преобразователи.</p> <p>Термография.</p> <p>Ультразвуковые.</p> <p>Оптико-электронные.</p> <p>Визуальные (эндоскопы, энтроскопы).</p> <p>Измерение отражаемого света.</p> <p>Оптические лазерные методы.</p>	<p>Тепловой контроль перегрева деталей и узлов трения, электрических контактов, электрических соединений, электронной аппаратуры.</p> <p>Визуально-оптический контроль, обнаружение трещин, расслоения, отклонения геометрических форм от заданных, измерение дымности, контроль качества масла.</p>

Виды методов	Области применения
5. Газоаналитические	
<p>Методы химического анализа состава отработавших газов двигателя. Методы инфракрасного излучения (поглощение отдельных газов).</p>	<p>Контроль общего технического состояния ЦПГ, состава топливной смеси, системы подачи и сгорания топлива, электрооборудования системы управления двигателем по составу отработавших газов газоанализаторами.</p>
6. Контроль износа трущихся деталей и смазки	
<p>Микрометрирование. Профилографирование. Взвешивание. Метод искусственных баз. Виброакустический. Тепловой. Калориметрия, химический, активационный и спектральный анализ содержания продуктов износа в масле.</p>	<p>Исследование процессов изнашивания и контроль износа пар трения в эксплуатации для определения технического состояния объектов диагностирования.</p>
7. Трибодиагностика, физические и физико-химические методы	
<p>Рентгенографический. Снятие «реплик» с поверхностей трения (искусственных баз). Физические: Эмиссионная спектрометрия. Атомарно-абсорбционная спектрометрия. Атомарно-флуоресцентная спектрофотометрия. ИК- и УФ-спектроскопия. Абсорбционная спектрофотометрия. Прямое фотометрирование. Электрооптический метод. Микроскопия. Светорассеивание. Поточная ультрамикроскопия. Феррография. Магнитометрия. Метод ядерного магнитного резонанса. Нейтронно-активационный анализ. Акустический анализ. Физико-химические: Седиментометрия. Поляграфия. Плотнометрия.</p>	<p>Исследование процессов изнашивания, разработка бортовых и стационарных систем диагностики, изнашивание и прогнозирование остаточного ресурса. Эксплуатационная диагностика.</p>
8. Методы контроля состояния работающих масел	
<p>Стандартные методы определения (группы методов). Вязкостно-температурных свойств. Срабатываемости.</p>	<p>Стандартные показатели: - кинематическая вязкость; - щелочное и кислотное число; - коксуемость;</p>

Виды методов	Области применения
Загрязнения масла. Диэлектрических показателей.	<ul style="list-style-type: none"> - содержание воды; - водородный показатель; - угар масла; - оптическая плотность; - диспергирующая способность; - состав продуктов износа; - диэлектрическая проницаемость.
9. Виброакустические	
Спектральный анализ вибрации: <ul style="list-style-type: none"> - частотный анализ; - спектральный анализ; - анализ ударных импульсов; - кепстральный анализ; - анализ спектра вибрации по огибающей; - фазовое сравнение сигналов вибрации; - амплитудно-временной анализ сигналов вибрации; - корреляционный анализ взаимных спектров вибрации; - определение акустической эмиссии; - статистический анализ вибрационных характеристик; - модуляция вибрационных процессов; - амплитуда вибрации пик-фактора; - величина эксцесса; - резонансная частота узла (детали), механизма, газовых и гидравлических потоков; - сопоставление спектров. 	Исследование динамических характеристик конструкции, технологий производства и технического состояния двигателей в эксплуатации. Высокая информационность вибрационных сигналов на изменение, структурных, функциональных и динамического состояния машин. Высокая универсальность, чувствительность и избирательность вибрационного сигнала к параметрам механических, гидравлических, газо- и аэродинамических, электрических и магнитных систем. Большой объем информации в одном измерении вибрации, высокая скорость диагностирования, позволяющая автоматизировать контроль технического состояния. Нормирование вибрации для контроля уровня проектирования, качества изготовления и эксплуатации.
10. Энергетические и гидрогазодинамические методы	
Механический КПД. Индикаторные показатели (мощность, КПД, расход топлива). Эффективная мощность. Неравномерность работы цилиндров. Скорость и неравномерность вращения коленчатого вала. Компрессионные свойства цилиндров. Внутрицикловое изменение (колебание) угловой скорости коленчатого вала. Изменение крутящего момента и угловой скорости вала по углу поворота при равномерной работе цилиндров. Амплитудно-фазовые параметры (осциллограммы) изменения напряжения, тока, сопротивления в первичной и вторичной цепях (переходных процессов) зажигания, давления в цилиндрах.	Диагностика ЦПГ, КШМ, элементов топливной системы (насосов, гидравлического аккумулятора, форсунок, системы сгорания и расхода топлива). Доводка конструкции двигателей до заданных технических характеристик, оценка качества ремонта и эксплуатации отдельного двигателя и в составе транспортного средства.

Виды методов	Области применения
<p>Температура отработавших газов, соответствующая определенным рабочим тактам и порядку работы цилиндров.</p> <p>Величины пульсации давления газовой среды во впускном и выпускном коллекторах и топлива в трубопроводах высокого давления.</p> <p>Осциллограммы скорости нарастания давления топлива в гидравлическом аккумуляторе, давления, создаваемого ТНВД и пульсация давления в топливной системе.</p> <p>Расход топлива в линиях подачи и обратного слива.</p> <p style="text-align: center;">• • •</p>	
<p>11. Диагностирование гидроприводов и гидросистем. Контроль жидкостей</p>	
<p>Статопараметрический.</p> <p>Амплитудно-фазовых и переходных характеристик.</p> <p>Термодинамический.</p> <p>Спектральный анализ и индикация ионов примесей.</p> <p>Силовой метод.</p> <p>Акустический.</p> <p>Виброакустический.</p> <p>Скорость нарастания усилия.</p> <p>Кинематический по скорости перемещения исполнительного элемента (сопоставления и наложения осциллограмм (эталонных)).</p> <p>Тепловой.</p> <p>Состояния рабочей жидкости.</p>	<p>Диагностика гидроприводов, гидросистем и отдельных элементов (насосов, топливных систем, систем охлаждения двигателя).</p> <p>Диагностика рабочих процессов в гидросистемах подачи и сгорания топлива.</p> <p>Распознавание источников нестабильных режимов работы двигателя (провалов, рывков, подергивания, вялого разгона).</p>
<p>12. Контроль электрических и электронных систем управления рабочими процессами</p>	
<p>Интеллектуальные, органами чувств человека.</p> <p>Аппаратные и программные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - допускового контроля и диагностики; - сравнение с эталоном и мажоритарного контроля («голосования») и диагностики цифровых и аналоговых систем; - контроль и диагностика с использованием корректирующих кодов (работоспособности цифровых систем) информационных систем. 	<p>Электронные системы управления процессами и режимами работы силовых агрегатов автомобиля.</p> <p>Электронные системы автоматического контроля технических систем (подвески, коробки передач, рулевого управления и др.) автомобиля.</p> <p>Электронные и микропроцессорные системы самоконтроля. Контроль датчиков и исполнительных механизмов.</p>

Виды методов	Области применения
<p>Контроль достоверности максимальных и минимальных значений напряжения, тока, сопротивления, формы, уровня, периодичности и длительности сигнала, амплитуды и частоты входных и выходных сигналов датчиков систем управления.</p> <p>Распознавание сбоев и собственных шумов.</p> <p>Выявление связи между контролируемыми параметрами и характеристиками диагностических систем, определяющих техническое состояние.</p> <p>Факторный анализ определения статистической связи показателей качества диагностической системы.</p> <p>Математическое моделирование.</p> <p>Экспертные оценки номенклатуры контролируемых параметров.</p> <p>Оптимальный выбор контролируемых параметров.</p> <p>Алгоритмы и программы контроля и диагностирования.</p> <p>Тестовое, функциональное и комбинированное диагностирование.</p>	

3.2. Интеллектуальные методы диагностирования

3.2.1. Методы диагностирования на эвристическом и теоретическом уровнях

В процессе любой творческой деятельности человеку приходится совершать определенные виды мыслительной работы, пользоваться теми или иными канонами логики, использовать методы и приемы системного анализа, оценивать и измерять полученные результаты, сравнивать их с ранее полученными результатами, сопоставлять с известными аналогами и прототипами.

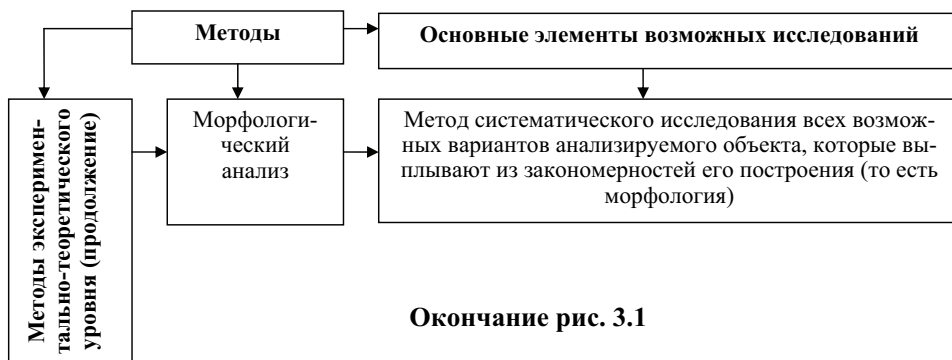
Дедуктивные рассуждения, индукция, основанная на воображении и интуиции, позволяют осуществлять великие завоевания логической мысли, которые лежат в основе всех больших достижений науки и практики, разработки и диагностического обеспечения машин. Беглость и гибкость мысли, вариативность точек зрения, целостность восприятия объекта диагностирования – это те свойства человека, которые хорошо соотносятся с правополушарным мышлением. Многие авторы сводят интуицию к рождению аналогии из цепи ассоциаций. Когда мера общности между чем-то и чем-то превосходит некий порог, человек ощущает изменение своего эмоционального состояния и воспринимает это изменение как предчувствие решения задачи.



Рис. 3.1. Общенаучные методы теоретических исследований



Продолжение рис. 3.1



Окончание рис. 3.1

К методам теоретических исследований и диагностирования двигателей относятся: анализ и синтез, дедукция и индукция, аналогия, абстрагирование, моделирование, формализация, идеализация, метод восхождения от абстрактного к конкретному, ранжирование, мнимый эксперимент, классификация, эксперимент, сравнение, методы математической статистики, обобщение, испытание, морфологический анализ, аксиоматический, исторический, гипотетический (рис. 3.1 [16, 17]).

Теоретические исследования включают в себя:

- анализ физической сущности процессов и явлений;
- разработку физической модели;

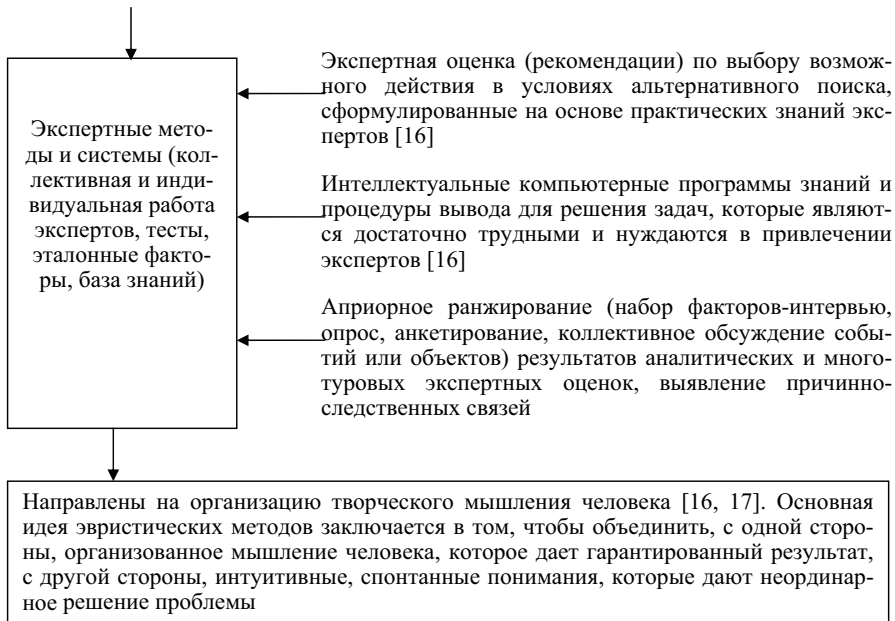
На их основе выводят практические следствия и определяют способы реализации, разрабатывают алгоритмы и программы, оценивают полезный эффект.

В процессе теоретических исследований приходится непрерывно ставить и решать разнообразные по типам и сложности формальные задачи. Логика не приводит к открытиям. Но логика абсолютно необходима при проверке самых блестящих озарений и опровержении чужих мнений, формальной проработке и описании результатов, а поэтому должна входить в арсенал каждого ученого, каждого диагноста.

На теоретическом уровне используют логические методы подобности, отличности, сопутствующих изменений, логический анализ собранных фактов, выработки понятия, предположения, делают выводы. Осознанное (правильное) использование приведенных на рис. 3.2 ([16, 17]) методов необходимо рассматривать как основное условие получения новых знаний и успешное решение проблемы. Эти методы не могут, например, заменять творческую мысль человека (исследователя), его способность анализировать, делать выводы и допущения. Но использование правильных методов направляет движение мысли человека, открывает перед ними кратчайший путь для достижения цели и обеспечивает, таким образом, возможность рационально расходовать энергию и время.



Рис. 3.2. Методы эвристических исследований



Окончание рис. 3.2

Эвристический метод базируется на знании причинно-следственных связей между основным функциональным звеном и их обобщенными диагностическими параметрами. Минимальной необходимой информацией при этом является описание функциональной модели объекта диагностирования и логическая алгоритмизация процесса распознавания.

Эвристическими считаются методы решения особо сложных задач диагностики (исследований), для которых нельзя точно очертить границы применимости и оценить возможные ошибки. Эвристика обычно используется для сокращения перебора вариантов решения, активизации и синхронизации знаний и операций поиска дефектов и неисправностей, направления и регулирования поиска решения. Эвристические операции являются разновидностью мышления.

Эвристика – это некоторые правила, стратегия, методы упрощения, которые значительно уменьшают объем пространства решений. Понятно, что человек не сможет воспользоваться эвристикой, если у него отсутствуют знания предметной области, к которой относится решаемая задача, и опыт решения аналогичных задач. Для того, чтобы эффективно решать сложные задачи, необходимо иметь опыт и экспертные знания.

К методам эвристических исследований и диагностирования относятся метод Дельфи и синектики, мозговой штурм и мозговая атака, морфологический анализ как выявление причинно-следственных связей, метод контрольных вопросов, ассоциативные методы (фокальных объектов и гирлянд случаев), приемы теоретических решений изобретательских задач, методы логического мышления, экспертный метод [16].

Все эти методы проявляются в **трех формах мышления человека**: наглядно-действующем, понятийно-логическом и чувствительно-образном [16]. В этом плане можно сформулировать основы, которые отражают тот или иной преимущественно-ориентированный подход действующего человека до разрешения вопросов.

Наглядно-действующее мышление является непосредственной формой связи с действительностью на основе практики.

Понятийно-логический тип мышления тесным образом связан с формированием выводов, эмпирических знаний и научных основ технической деятельности человека.

Чувствительно-образный тип мышления связан с образными основами деятельности. Основную помощь при этом оказывает воображение, фантазия, ассоциации, предчувствие [16]. Символическое представление аналогий в виде геометрических фигур, иконических знаков обеспечивает наибольшую продуктивность мышления при наименьших затратах.

Важнейшими правилами рассуждений и принципами логики являются:

- анализ самого объекта, а не нашего представления о нем;
- рассмотрение конкретного объекта в конкретных условиях;
- анализ всех тех и только тех его свойств и связей, которые существенны в этих условиях.

С понятием диагностирования связываются необходимые и достаточные в совокупности диагностические признаки предмета. При образовании понятия дефекта (неисправности) сначала надо отделить существенные признаки от несущественных и т. д.

Творчество человека-диагноста в любых его проявлениях, в том числе и в форме исследования объекта диагностирования, где, казалось бы, должны доминировать сугубо рациональные приемы получения и переработки информации, представляет собой сложный сплав осознанного и неосознанного, строгого расчета и интуитивных прозрений. Уровень интуитивных представлений о процессах и явлениях определяется знаниями и опытом.

В сложных вопросах углубленного диагностирования руководствуются прежде всего логическим мышлением. Чуткое возвышенное сознание умеет прислушиваться к глубинному мышлению: предвосхищение, прогноз - ключевые моменты интуиции. С точки зрения диагноста и исследователя основные свойства бессознательного – это множество протекающих в нем параллельных между собой и параллельных сознанию процессов, а также их тесная связь с эмоциями. Сила эмоции есть функция от потребности и от дефицита информации для ее удовлетворения.

Бессознательные процессы не упорядочены во времени и не меняются сами по себе. При выключенной «логической машине» (это происходит во время сна) мысли превращаются в образы и обрабатываются как таковые, причем связи между образами получают эмоциональную стимуляцию и окраску. Результатом завершения такой обработки может стать полученный наутро ответ на долго мучивший «сновидца» вопрос.

Задача принятия решения состоит в выборе среди множества возможных решений (их называют также вариантами, планами и т. п.) такого решения, которое являлось бы в определенном смысле лучшим или оптимальным. Выбор решения производит некоторый объект (лицо) принимающий решение, который преследует вполне определенные цели. В зависимости от конкретной ситуации в роли принимающего решение может выступать как отдельный человек (оператор, диагност, инженер, научный сотрудник и т. п.), так и целый коллектив (группа специалистов, занятая решением одной задачи).

Каждое возможное решение характеризуется определенной степенью достижения цели. В соответствии с этим у лица, принимающего решение, имеется свое представление о достоинствах и недостатках решений, на основании которого одно решение предпочитается другому.

Оптимальное решение – это решение, которое с точки зрения субъекта, принимающего решение, предпочтительнее других возможных решений. Таким образом, понятие оптимального решения связано с предпочтениями субъекта, принимающего решение. Эти предпочтения на практике выражаются в различной форме, и их математическая формализация может составить сложную задачу, поскольку субъект, принимающий решение, как правило, не может ясно и четко сформулировать их.

Цель теории принятия решений состоит в разработке методов, которые помогли бы субъекту, принимающему решение, наиболее полно и точно выразить свои предпочтения в рамках соответствующей математической модели и в конечном счете обоснованно выбрать действительно оптимальное решение.

Логика и интуиция. Первейшие условия для проявления вспышек интуиции – максимальное расширение поля поиска, переоценки причин и ценностей, уравнивание главного и второстепенного перед лицом смутного хаоса неясностей.

Характерными чертами научной интуиции являются [16, 17, 18]:

- принципиальная невозможность получения искомого результата посредством чувственного познания или прямого логического вывода;
- внезапность и неожиданность полученного результата;
- неосознанность механизма творческого акта;
- необычайные легкость, простота и скорость прохождения пути от исходных данных к решению;
- безотчетная уверенность в истинности результата (который, конечно же, требует логической или экспериментальной проверки) и ярко выраженное чувство удовлетворения.

Дальнейшая логическая обработка найденного результата позволяет ввести его в обычные логические формы (индукция и дедукция, анализ и синтез, переход от конкретного к абстрактному и обратный).

Факты, по-видимому, «дозревают» в памяти, притираясь и укладываясь на свои места. Все данные, попавшие когда-либо в гигантский миксер нашей подсознательной памяти, постоянно сталкиваются друг с другом, причем родственные элементы могут объединяться, образуя полезные соче-

тания. Воображение – бессознательная способность комбинировать факты новыми способами. Новообразованные группы идей в состоянии произвольно управлять целенаправленными действиями, даже не становясь осознаваемыми.

Интуиция позволяет увидеть задачу в целом, преодолеть ограниченность известных подходов к решению и выйти за рамки привычных, одобряемых логикой и здравым смыслом представлений. Ее можно сравнить с туннельным эффектом – происходит проникновение сквозь барьер старых представлений.

Обязательными условиями вспышки интуиции являются:

- предшествующая, иногда весьма длительная и мучительная работа диагноста, изобретателя;
- сохранение на достаточно высоком уровне интеллектуальной потребности в решении задачи;
- стрессовая ситуация (например, острейший дефицит времени).

Очевидно, что простая ссылка на бессознательное, как источник постижения, недостаточна. Все большее число авторов склоняются к тому, что в основе интуиции лежит предметная логика, реализующая категориальный строй данной области творческой деятельности человека, следовательно, здесь работает скорее надсознание, чем подсознание.

3.2.2. Структура человеческих и технических систем диагностирования

Методы диагностирования органами чувств человека следует рассматривать как неотъемлемую часть технической диагностики на всех стадиях жизненного цикла машин.

Определение реального состояния технических объектов, изменяющегося во времени из-за различных внешних и внутренних причин, в 50-80 случаях из 100 решаются опытным оператором-диагностом автоматически без выделения самого этапа принятия решения. Эти методы диагностирования основаны на опыте диагноста и совершенстве его чувств и разума. При этом интуитивно выполняются некоторые действия по получению и интеллектуальной обработке информации, на основе которой делаются выводы о состоянии объекта.

К средствам и методам диагностирования машин органами чувств относятся анализаторы зрения, слуха, нюха, ощупывания и мышления человека. Органы чувств человека дают информацию о получении определенных ощущений. Значение показателя технического состояния определяют путем анализа и классификации совокупности признаков, полученных ощущений, руководствуясь знаниями, накопленным опытом, разумом и личными качествами диагноста (рис. 3.3). Скорость и эффективность классификации образов состояния зависит от того, насколько хорошо (точно) подобраны основные признаки на первом этапе диагностирования.

Для формирования ощущений человеку необходимо внешнее раздражение определенных органов - «датчиков чувств». Это общая схема возник-

новения ощущения. Внешние раздражения оцениваются головным мозгом в виде определенных сигналов, формирующих определенные ощущения. Вслед за этим принимается решение, и мозг выдает необходимые командные сигналы исполнительным органам. При этом действия могут быть сознательными и бессознательными.

Нервная система человека состоит из 50 типов клеток, называемых нейронами, и имеет ошеломляющую сложность – около 10 нейронов участвуют в порядка 10^{15} передающих связей (синапсов) имеющих длину метр и более. К примеру, нервная система муравья составляет всего 1000 нейронов. Каждый нейрон обладает многими качествами, общими с другими клетками, но его уникальной способностью является прием, обработка и передача электрохимических сигналов по нервным путям, которые образуют коммуникационную систему мозга.

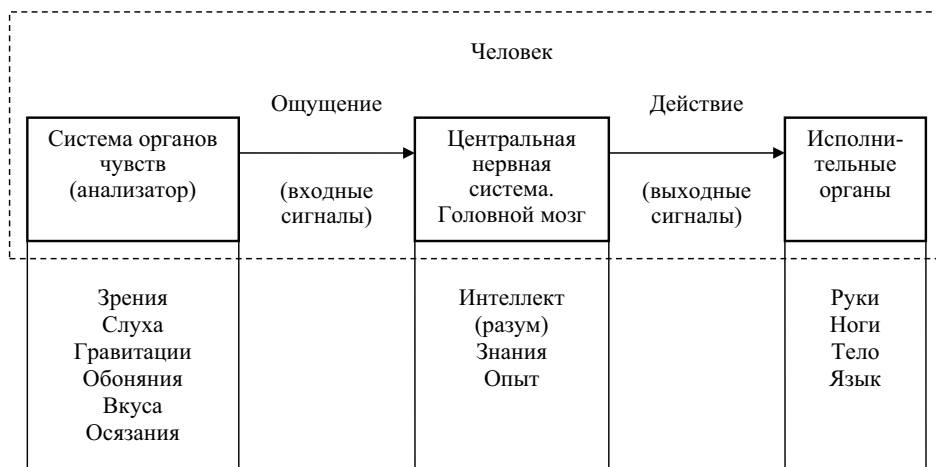


Рис. 3.3. Человеческая система

Нечто аналогичное происходит и в технической системе, состоящей из датчиков, и микро-ЭВМ (рис. 3.4). Микропроцессор и память системы на рис. 3.4 выполняет аналогичные функции головного мозга человека. У человека согласно сигналам мозга приводятся в действие руки, ноги, тело, а в технической системе по командам процессора действует механическая рука или другое исполнительное устройство (клапан, выключатель и т. п.).

В качестве средств диагностирования выступают органы чувств человека. Оценка технического состояния на основе органолептических методов и логического анализа структурных и входных параметров рабочих процессов является неотъемлемой частью первого этапа любого процесса диагностирования. Биологические системы человека по многим свойствам превосходят технические аналоги (датчики).

В общем плане по компактности, срокам службы, мобильности, надежности и ряду других показателей технические датчики являются менее совершенными по сравнению с органами человека. Но по отдельным пока-

зателям, например, температуры, смещения, отдельно взятые технические датчики превышают аналогичные показатели человека. Порог чувствительности изменения температуры техническими датчиками составляет 10^{-5} °С, а человека 10^{-1} °С, соответственно смещения – 10^{-8} см и 2-3 °С.

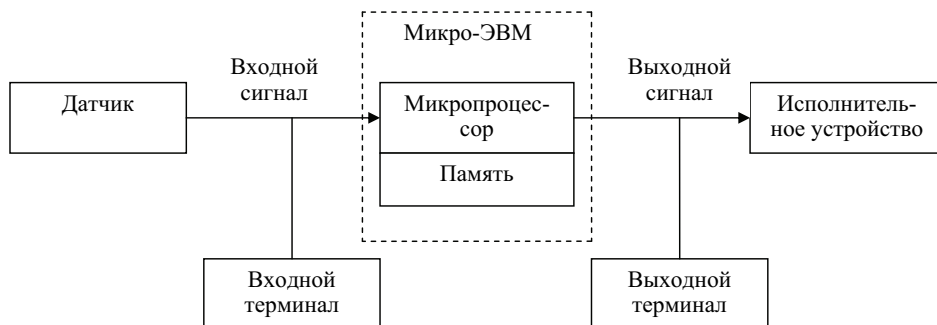


Рис. 3.4. Техническая система

3.2.3. Достоинства человеческих систем диагностирования

Как в простых, так и в сложных реализациях роль анализатора информации и исполнительного механизма выполняет оператор-диагност. Наблюдая за большим числом переменных многомерной системы автомобиля, характеризующих его техническое состояние, оператор в большинстве случаев принимает решение быстро и эффективно без привлечения специалистов. Эффективность принимаемого им решения в значительной степени определяется знанием объекта, опытом и интуицией. До настоящего времени отсутствуют доступные приборы и средства, способные реализовать все функции, выполняемые человеком при диагностировании.

Система диагностирования состоит в самом общем случае из трех элементов: объекта диагностирования, технических средств диагностирования (ТСД) и человека-оператора. В зависимости от назначения, специфики использования и расположения на машине объекта структура системы диагностирования бывает различной, однако все структуры можно свести к небольшому числу типовых. Структура системы – это устойчивая упорядоченность в пространстве и во времени ее элементов и связей.

На рис. 3.5 приведена одна из типовых структур. Диагностирование в этом случае осуществляют в период выполнения объектом его рабочих функций, то есть оно является функциональным. ТСД играют пассивную роль в процессе диагностирования: они только воспринимают и перерабатывают информацию, характеризующую качество выполнения объектом диагностирования (ОД) рабочих функций. Человек-диагност (ЧД), человек-оператор (ЧО) непосредственно не контактируют с объектом, только взаимодействуют с ТСД, воспринимая информацию, управляя процессом диагностирования и принимая решения об использовании объекта. Прежде чем делать какие-либо выводы о техническом состоянии, даже при использова-

нии инструментальных методов, проводят логические рассуждения, изучают, какие работы и когда проводились с узлом, каковы их результаты, исправны ли средства диагностирования.

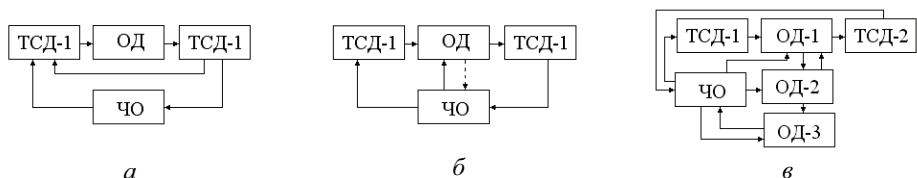


Рис. 3.5. Структурные схемы систем тестового диагностирования:

а – обычная; *б* – при наличии связи ОД-ЧО; *в* – системы тестового диагностирования объекта, состоящего из отдельных частей

Даже в самых сложных системах диагностирования ТСД (рис. 3.5) диагност выполняет те же функции, что и ранее (рис. 3.6): принимает от объекта информацию о его состоянии и перерабатывает ее. Человек-оператор имеет доступ к объекту для его включения и выключения, постоянно или периодически контролирует работоспособность системы диагностирования.

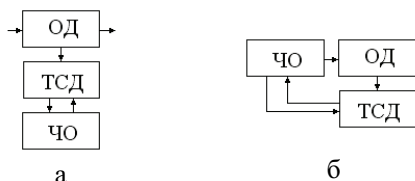


Рис. 3.6. Структурные схемы системы функционального диагностирования (а) и системы диагностирования ОД в специальном режиме (б)

При необходимости оператор делает соответствующие переключения в процессе диагностирования. В обоих случаях ЧО воспринимает информацию и управляет процессом диагностирования. В отличие от приведенной на рис. 3.6 для структуры системы диагностирования (см. рис. 3.5) характерно,

что в процессе диагностирования объект не работает.

Для глубокого анализа информации, ее сопоставления и принятия решения нужны достаточные знания и опыт, позволяющие человеку при диагностировании использовать системный подход, построить логический план действий с учетом сложной взаимосвязи возможных неисправностей, режимов диагностирования и прогнозировать работоспособность объекта на определенное время. К необходимым общим знаниям человека-диагноста (оператора) относятся знания конструкции объекта диагностирования, видов эксплуатационных неисправностей, параметров их диагностирования, средств и методов диагностирования.

Во всех описанных случаях (см. рис. 3.5, 3.6) диагностирование органами чувств человека при проведении осмотра и технического обслуживания остаются практически основным способом получения первичной информации о техническом состоянии машин, несмотря на появление и развитие новых методов технического диагностирования, таких как виброметрия, спектральный анализ вибрации, ультразвуковой анализ, электронные системы контроля, тепловыделения и др. Оценка органами чувств человека

технического состояния (наличие дефектов, повреждений, снижение управляемости транспортной машиной и др.) остается главным методом контроля, позволяет своевременно обнаруживать и устранять неисправности и предупреждать отказы из-за поломки сложных деталей узлов и улучшить функционирование системы. Диагностирование органами чувств человека во многих случаях дает возможность избежать возникновения аварии механизмов.

Человек представляет собой совершенную биофизическую систему диагностирования, элементами которой являются рецепторы (глаза, уши, нос, кожа и др.), головной мозг, язык. Части тела, кожа, голова, руки и ноги составляют систему осязания. Организм человека очень чувствителен к ускорению и реагирует даже на небольшие его изменения, вызванные различными неисправностями (карбюратором, режимами работы механизмов и т. п.). Опыт технической диагностики показывает, что человек, как правило, ставит диагноз не по одному, а по нескольким признакам.

Соединение техники, биологии и психологии представляет собой совершенные эрготехнические (эргактические) системы и интеллектуальные системы знаний и управления процессами и машинами. Органы чувств и нейронная система человека может кодировать и классифицировать по признакам сигналы, объекты, явления, процессы, ситуации и другие образы; выполнять техническую, экономическую, медицинскую, социальную диагностику; проводить обобщение и интеллектуальную обработку данных; различать добро и зло; принимать нравственные решения. Ни одна из технических систем не обладает подобными качествами.

Человеческая биофизическая система диагностирования имеет следующие достоинства: огромное количество свойств в одной автоматической системе, простота методов контроля, мобильность и оперативность постановки диалога, возможность постановки диагноза при отсутствии многих дорогостоящих технических средств диагностирования, малая трудоемкость и стоимость постановки диагноза.

Человеческая биофизическая система способна оценивать комплексно техническое состояние объекта, окружающую среду, дорожные условия, быстро меняющиеся процессы и происшествия и вырабатывать алгоритм принятия решения за доли секунд с учетом нравственного осознания ситуации. Никакая электронная система диагностирования, бортовая и стационарная, не может быть в достаточной мере наделена богатой комбинацией человеческих качеств, совестью и такими мобильными средствами и алгоритмом комплексного диагностирования в реальном времени. При многих положительных сторонах применения электронных средств диагностирования систем в управлении автомобилем принятие решения в управлении и поиске неисправностей остается всегда за человеком-оператором, человеком-водителем, человеком-диагностом. Машины – творение Человека и их уровень развития, принцип действия, конструктивное содержание так же разнообразны, как и наши мысли и действия.

Биофизические системы человека обладают высокими возможностями совершенствования путем получения знаний, опыта и тренировок, позво-

ляющих формировать нейронные системы памяти и автоматического управления техническими системами.

При известных недостатках методы диагностирования органами чувств человека во многих случаях дают возможность предотвратить отказы и аварии механизмов. Эти методы эффективно применяют для предварительной экспертной оценки состояния отдельных механизмов машин. В сочетании с простыми техническими средствами, которые не рассчитаны на проведение измерений, но повышают возможности, восприимчивость и разрешающую способность органов чувств человека (например, лупа, микроскоп, микрофон, щуп, слуховая трубка, эндоскоп и т. д.), эти методы могут давать хорошие результаты.

При широком использовании совершенных технических средств диагностирования методы диагностики органами чувств человека не утратили своего значения в организации потоков технического обслуживания многих типов как отдельных двигателей, так и в составе автомобиля. Многие поколения диагностов собрали бесценный опыт, диагностирования органами чувств человека. Систематизация и обобщение приемов такого диагностирования представляет большой практический интерес, составляет основу разработки бортовых электронных и других технических систем диагностирования двигателей [19].

Диагностику неисправностей органами чувств человека полезно освоить хотя бы для того, чтобы понимать объем, стоимость и сроки выполнения работ, необходимые диагностические средства и решить, кому доверить их устранение (самому себе, мастеру на стоянке или автосервисной фирме).

Основным недостатком человеческого глаза является то, что при малой освещенности ему не помогают самые лучшие оптические приборы. Чаще всего осмотр проводится в условиях худшей освещенности, чем при дневном свете, что обеспечивает малую вероятность обнаружения мелких поверхностных дефектов, зависимость результатов осмотра от субъективных факторов и условий контроля. Тем не менее, простота методов контроля, малая трудоемкость, возможность осмотра основных узлов, больших площадей и достаточная информативность делает их незаменимыми при контроле технического состояния машин. Данные методы предваряют оценку технического состояния и использование методов неразрушающего контроля, являясь в то же время основным аргументом наличия дефектов, неисправностей и повреждений.

Диагност органами чувств может определять большое количество неисправностей двигателя, например:

- герметичность топливной системы;
- наличие утечек в системе выпуска;
- разъединения в системе вентиляции картера;
- негерметичность систем смазки и маслопроводов;
- цвет отработавших газов;
- вибрация и шум узлов и агрегатов;
- температура механических узлов и контактных соединений электропроводки;

- трещины, повреждения и деформации деталей и корпусов;
- зазоры в сопряжениях деталей;
- режимы работы двигателя и отдельных систем;
- ослабление затяжки болтовых и винтовых соединений.

Важнейшим результатом диагностирования органами чувств человека является способность диагноста давать комплексную оценку контролируемым параметрам, выявлять их взаимосвязь.

3.2.4. Диагностические и физиологические характеристики анализаторов человека

Высококвалифицированный диагност на базе своего опыта и знаний может за 15 минут установить причины типовой неисправности в 9 из 10 случаев. Однако таких специалистов мало. Человек по визуальному контролю графического материала проявления сложных процессов на экране многоканальной системы может быстро определить техническое состояние объекта, не ожидая решения автоматизированной системы контроля.

Для успешной диагностики объекта машины необходим личный опыт, знание объекта и инженерная интуиция. Необходимы хорошие знания конструкции (системы), средств и методов устранения дефектов, неисправностей и отказов, рабочих процессов и нормативных параметров объектов диагностирования.

Трудоемкость и достоверность оценки технического состояния органами чувств человека зависит от проектного и эксплуатационного диагностического обеспечения конкретной транспортной машины. Здесь как и при инструментальных методах диагностического обеспечения необходим комплекс взаимосвязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования.

При разработке эксплуатационно-технической документации диагностирования органами чувств и мышления человека составляют контрольно-регулирующие и маршрутно-настроечные карты, таблицы и схемы поиска неисправностей всех систем двигателя с указанием диагностических структурных и функциональных признаков и параметров, каталоги видов износа и повреждений с фотографиями и описанием их отличительных особенностей. Разрабатываются подробные карты смазки, контроля смазочной системы, качества смазки, периодичности ее замены и др.

С назначением диагностического параметра одновременно определяют и использование конкретного метода и алгоритма диагностирования, совокупность признаков, физических процессов, способов и приемов, обеспечивающих их оценку (или измерение).

В перечень этапов контроля входит решение следующих задач:

- определение работоспособности (исправности, правильности функционирования);
- поиск дефектов (неисправностей);
- прогнозирование изменения состояния;
- прогнозирование работоспособности.

При поиске дефектов необходимо выполнять операции сравнения реакций объекта диагностирования на тестовые воздействия или оценивать выходные сигналы. Диагноз должен содержать указания о неисправном элементе и рекомендации по способу устранения неисправности.

В таблицах диагностирования объектов указываются нормы на исходные, допустимые и предельные ресурсные и функциональные параметры всех узлов и агрегатов конкретных транспортных машин.

Основными средствами диагностирования органами чувств являются зрительный, слуховой, вестибулярный, нюховый и вкусовой анализаторы, ощущения (показания) которых обрабатываются в мозге. Физиологические характеристики анализаторов человека и психофизические характеристики нейронной системы и мозга человека приведены в [20].

Средства, требующие интенсивного участия человека-диагноста для обслуживания приспособлений, приборов и аппаратных средств относятся к классу «ручных работ».

Методы диагностирования органами чувств человека также включают возможность применения технических средств, которые не рассчитаны на проведение измерений, но повышают восприимчивость и разрешающую способность органов чувств человека. Такими средствами могут быть: лупа, микроскоп, микрофон, слуховая трубка, эндоскоп, масштабная линейка, щуп, манометр, вакуумметр, указатели уровня, расходомеры, штангенциркуль, нутромер, микронная головка, компрессометр, стетоскоп и другие средства «малой» диагностики. При таком широком использовании средств «малой» диагностики применяемые методы можно назвать визуально-измерительными.

Оптические приборы значительно расширяют пределы возможностей глаза, что позволяет видеть дефекты, размеры которых находятся за пределами разрешающей способности невооруженного глаза. Считается, что для визуально-оптического контроля деталей целесообразно применять приборы с кратностью увеличения не более 20-30, так как с возрастанием кратности увеличения уменьшаются поле зрения, глубина резкости, производительность и надежность контроля.

В последнее время в арсенал средств, используемых человеком при диагностировании транспортных машин, значительно расширен за счет появления бортовых средств визуального контроля реакции объекта диагностирования на тестовые воздействия. Бортовые средства значительно повышают информативность восприятия объекта органами чувств человека и качество логического контроля при поиске места и причины неисправности.

«Кибернетический» подход полагает, что в мозгу исследователя (диагноста) создается информационная динамическая модель, начинающая самостоятельную жизнь и автономно устанавливающая новые связи и отношения между элементами проблемной ситуации; после решения задачи результаты как бы выдаются поставившему ее человеку.

3.3. Экспертные методы диагностирования

3.3.1. Области применения экспертных методов

Экспертный метод применяется в тех случаях, когда трудно или практически невозможно использовать экспериментальный или расчетный метод. В практике диагностирования машин и управления данный метод очень распространен (например, при определении коэффициентов весомости показателей, численных значений показателей, которые не могут определяться каким-либо другим методом). Методология и методика применения экспертных методов достаточно глубоко представлена в различных литературных источниках [16, 21].

На этапе создания и доводки опытных образцов двигателей, оценки их технического уровня основным методом углубленного диагностирования как сложного изделия является метод экспертов. Надежность двигателей, их долговечность и рентабельность во многом зависят от уровня диагностического обеспечения качества их изготовления, уровня механизации и автоматизации технологического процесса изготовления отдельных деталей, а также от уровня диагностического обеспечения их эксплуатации, обслуживания и ремонта. С этой целью в процессе опытной эксплуатации партии механизмов и машин проводят анализ дефектов, выясняют причины отказов, условия их появления и их влияние на общее техническое состояние транспортных машин. Эту работу выполняет экспертно-техническая комиссия, которая создается из опытных специалистов, занимающихся разработкой, изготовлением и эксплуатацией транспортных машин. После проведенного анализа дефектов и выявления их причин разрабатывают методику их устранения. Метод экспертов субъективен, так как не всегда можно получить достоверную информацию о причинах появления дефекта из-за ограниченных человеческих возможностей при обработке поступающей информации. Многие дефекты одних деталей способствуют появлению дефектов других деталей, что вызывает дополнительные субъективные погрешности.

Эксперт – это человек, обладающий большими познаниями в некоторой области. Познания делятся на факты и правила. Правила определяют структуру, которая позволяет делать выводы на основе фактов. Экспертные системы на основе правил основаны на формальной логике и используют операторы «если-тогда».

Метод экспертов – это анализ рабочих параметров и диагностических признаков, проводимый человеком-экспертом, или измерение их приборами, завершающееся постановкой диагноза. Данным методом широко используются при разработке более совершенных методов диагностирования, выборе диагностических параметров и разработке систем диагностирования, используя при этом автоматические и микропроцессорные устройства и системы.

Экспертные методы широко используются при разработке и эксплуатации транспортных машин, оптимизации перевозок, при техническом обслуживании машин, для устойчивой работы удаленных инженерных объек-

тов, диагностики отказов сложных устройств, неисправностей автомобилей, отслеживания состояния автомобиля в пути, своевременного предупреждения аварийной ситуации, принятия управленческих решений.

Методы экспертных оценок применимы для прогнозирования любых процессов: для непрерывных и дискретных, стационарных и нестационарных, вне зависимости от наличия статистики, скачков в развитии процесса и описания математической закономерности. Экспертные методы прогнозирования могут быть использованы для получения как количественных, так и качественных прогнозов. Недостатком методов экспертных оценок являются субъективность оценки и зависимость применения от наличия экспертов, знакомых с прогнозируемой ситуацией.

Основными способами восполнения или компенсации дефицита информации при принятии инженерных, управленческих оценок технического состояния объектов диагностирования являются:

1. Сбор дополнительной информации и ее анализ. Очевидно, это возможно, если система располагает определенным резервом времени и средств.

2. Использование опыта аналогичных предприятий или решений. При этом важно располагать банком решений или иметь надежный доступ к нему. Кроме того, опыт других не может быть использован без корректирования.

3. Использование коллективного мнения специалистов или экспертизы.

4. Интервью и опросы.

5. Применение специальных инструментальных методов и критериев, основанных на теории игр.

6. Использование имитационного моделирования, которое создает производственные ситуации, близкие к реальным, и других методов.

Наиболее подробно все вышеперечисленные способы изложены в работах [16, 33, 22, 37].

Область применения эвристических методов прогнозирования: узлы, детали силовых агрегатов автомобиля, анализ которых либо полностью, либо частично не поддается математической формализации. На рис. 6.3 дана классификация этих методов.

В основе экспертных методов лежит субъективная оценка эксперта, зависящая от его умения с достаточной степенью достоверности оценить остаточный ресурс силового агрегата на будущий период эксплуатации, учитывая внешние условия эксплуатации и техническое состояние агрегата.

3.3.2. Основные положения теории экспертного прогнозирования

Различным аспектам теории прогнозирования посвящено значительное количество исследований [16, 19, 22, 23].

Прогноз в большинстве работ определяется как вероятностное научно обоснованное суждение о перспективах, возможных состояниях того или

иною процесса и явления в будущем и/или об альтернативных путях и системах прогнозирования.

Методологией прогнозирования является область знаний о методах, способах и системах прогнозирования, а именно:

- метод прогнозирования – способ исследования объекта, направленный на разработку прогноза;
- методика прогнозирования – совокупность одного или нескольких методов;
- система прогнозирования – упорядоченная совокупность методик и средств реализации.

Теория прогнозирования включает: анализ объекта прогнозирования; методы прогнозирования, подразделяющиеся на математические (формализованные) и экспертные (интуитивные); системы прогнозирования, в частности, непрерывного, при котором за счет мониторинга и диагностирования осуществляется корректировка прогнозов в процессе функционирования объекта.

По теории прогнозирования при анализе объектов производится классификация прогнозов, при этом в качестве основных признаков указываются следующие:

- масштабность, отражающая количество значащих переменных при описании объекта;
- сложность, характеризующая степень взаимосвязи переменных;
- детерминированность или стохастичность переменных;
- информационная обеспеченность периода ретроспекции, включая все возможные варианты от объектов с полным количественным обеспечением до объектов, у которых такое обеспечение отсутствует.

Одним из основных классификационных признаков является также период прогноза, при этом выделяют три вида прогнозов: краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные. Естественно, что временные интервалы прогнозов зависят от природы объекта, то есть изучаемой области деятельности. Например, при рассмотрении технико-экономических показателей деятельности фирм период краткосрочного прогноза не превышает 1 года, среднесрочный прогноз строится на период от 1 до 5 лет, долгосрочный – свыше 5 лет.

При прогнозировании классифицируют не только прогнозы, но и методы прогнозирования. Известно большое количество методов прогнозирования, в основном они базируются на двух крайних подходах: эвристическом и математическом.

Эвристические методы включают построение интуитивных прогнозных моделей, которые формируются экспертами на основе целевой установки, предоставленной информации, опыта, интуиции и знаний эксперта. Выделяют индивидуальные (модели типа интервью, генерации идей), коллективные (метод простого ранжирования; метод задания весовых коэффициентов; метод последовательных сравнений; метод парных сравнений) и комбинированные (метод Дельфи и его модификации) экспертные оценки (рис. 3.2) [16, 17].

Экспертные методы прогнозирования рекомендуется использовать в том случае, если:

- нет достаточной статистической информации об изменении анализируемого показателя и влияющих на него факторов;
- показатель не изменяется численно, а выражается качественными признаками;
- анализируемый показатель не может быть описан на основе эволюционного развития, поскольку изменяется скачкообразно и природа этих изменений неизвестна.

Математические методы прогнозирования подразделяются на три группы:

- симплексные (простые) методы экстраполяции по временным рядам (метод наименьших квадратов, экспоненциальное сглаживание и др.);
- статистические методы, включающие корреляционный и регрессионный анализ, факторный анализ и др.;
- комбинированные методы, представляющие собой синтез различных вариантов прогнозов.

При формировании методики прогнозирования целесообразно рассматривать прогноз в узком и широком смысле.

В узком смысле (первого типа) прогноз выполняется при условии, что основные факторы, определяющие развитие прогнозируемого процесса или явления, не претерпят существенных изменений. Это позволяет выдвигать гипотезы о будущем развитии процессов и явлений, в значительной мере базирующиеся на анализе прошлого.

Прогнозы осуществляются с применением симплексных или статистических методов на основе временных рядов. Для прогнозов в узком смысле характерно, что:

- число значимых переменных включает от 1 до 3 параметров, то есть по масштабности они относятся к сублокальным прогнозам;
- при использовании одного параметра, например, времени, такие прогнозы считаются сверхпростыми, при двух-трех взаимосвязанных параметрах – сложными;
- по степени информационной обеспеченности периода ретроспекции прогнозы первого типа могут быть отнесены к объектам с полным информационным обеспечением.

Наиболее часто для прогнозирования типа используются методы, основанные на анализе временных рядов. Эти методы имеют разную сложность. Так, например, если все имеющиеся данные существенны и имеют равную ценность для прогноза, можно найти среднее всех значений динамического ряда, это и будет являться прогнозом на один шаг. Такой метод можно применять при любом количестве данных при условии равноценности всех данных. Но если последнее значение динамического ряда наиболее значимо по сравнению с остальными, то оно и может быть принято как прогноз на один шаг. Эти наивные методы прогнозирования практически не требуют каких-либо сложных расчетов.

Для повышения точности и достоверности прогнозных оценок первого типа целесообразно использование комбинированных методов, при этом желательно использование большого количества вариантов прогноза, рассчитанных на основе различных подходов или альтернативных источников информации.

Прогноз второго типа (в широком смысле) подразумевает, что исходные данные для получения оценок определяются с использованием опережающих методов прогнозирования: патентного, публикационного и др. Как правило, прогнозы второго типа используются для долгосрочного прогнозирования и разбиваются на два этапа: первый – получение прогнозных оценок основных факторов, второй – собственно прогноз развития процесса или явления. Учитывая объективную сложность и трудоемкость выполнения прогнозов второго типа, можно констатировать, что наибольшее распространение получили методы прогнозирования первого типа.

Для успеха в построении прогнозов знаний только о способах получения прогнозных оценок недостаточно. Важно четко разграничивать области применения разных методов прогнозирования и в зависимости от объема и характера данных быстро и безошибочно выбирать нужный метод в соответствии с целью получения конкретного прогноза.

Методы выбора и формирования групп экспертов описаны в работах [22, 23, 24]. К методам работы экспертов относятся:

1. Априорное ранжирование в задачах принятия инженерных и управленческих решений.
2. Опрос и интервью по оценке технического состояния и ресурса объекта диагностирования.
3. Эвристическое прогнозирование по методу парных сравнений.
4. Когнитивный анализ и отбор информативных диагностических признаков.
5. Логическая алгоритмизация выбора диагностических параметров и поиска неисправностей, в частности, распознавание образов и их классификация (детерминированные системы, вероятностные системы, логические системы, структурные системы, нейронные сети, системы использования метода потенциалов, экспертные системы распознавания образов и нормализации).
6. Эвристический подход к набору диагностических признаков распознавания.
7. Прогнозирование диагностических параметров и признаков.
8. Построение структурно-следственных и функционально-структурных моделей определения технического состояния объектов.
9. Построение граф-моделей в пространстве свойств и параметров.
10. Функционально-вероятностные методы локализации неисправностей.
11. Логические модели диагностирования.
12. Вероятностные и детерминированные модели построения решающих правил.
13. Постановка диагноза по комплексу диагностических параметров.

14. Моделирование зависимости параметра состояния от наработки.

Для учета мнений экспертов предварительно разрабатываются анкеты опросов, в которых все возможные варианты ответов закодированы для дальнейшей обработки на ЭВМ.

Более объективными являются методы, основанные на результатах прошлой деятельности специалистов. Простейший метод этого вида – отбор специалистов по стажу работы, ученым званиям и степеням, занимаемой должности, публикациям и т. д.

Существует несколько методов коллективной экспертной оценки, в том числе: метод простого ранжирования, метод задания весовых коэффициентов, метод последовательных сравнений, метод парных сравнений [16, 22].

В зависимости от организации работы экспертов методы экспертных оценок можно разделить на две основные группы: коллективные и индивидуальные.

К первой группе относятся:

- совещания, то есть метод открытого обсуждения и принятия решений (метод «комиссий»);

- метод «мозговой атаки», в процессе которой внимание участников концентрируется на выдвижении идей возможных путей решения одной конкретной задачи;

- метод «суда» воспроизводит правила ведения судебного процесса, причем рассматриваемое решение выступает в качестве «подсудимого», а группы экспертов исполняют роли «прокурора» и «защиты».

Особенности коллективной работы экспертов:

- при обсуждении вопроса присутствует вся группа;

- группу комплектует руководитель, проводящий совещание, как правило, из своих подчиненных и «доверенных» лиц;

- последовательность выступлений и предоставление слова регламентирует руководитель;

- подведение итогов и принятие (или непринятие) решения также осуществляет руководитель.

Преимуществом этих методов является оперативность и внешняя демократичность, а недостатками – давление авторитета руководителя, отсутствие строгой процедуры учета мнения экспертов, подведения итогов и принятия решения. Последний недостаток частично может быть компенсирован, если решение принимается тайным голосованием.

При индивидуальной работе экспертов для получения мнения каждого эксперта используют интервью в виде свободной беседы по типу «вопрос-ответ», а также анкетирование, в процессе которого каждый эксперт дает количественные оценки сравниваемым факторам или альтернативам, то есть ранжирует их. Затем индивидуальные оценки участников экспертных групп суммируются по определенным правилам. При втором подходе все этапы экспертизы (подбор экспертов, технология получения и обработки их мнений и др.) более или менее регламентированы, эксперты, как правило, подбираются из числа внешних специалистов, а организует проведение экспер-

тизы не руководитель, а специалист. При этом результаты экспертизы, так же как и при первом методе, носят для руководителя не обязательный, а рекомендательный характер.

Метод Дельфи является самым распространенным среди эвристических методов. В нем используются процедуры опроса экспертов, статистическая обработка результатов экспертиз и не требуется проведение специального эксперимента. Типичные задачи, решаемые указанным методом, включают: выявление деталей или узлов машин, лимитирующих их надежность; качественную и количественную оценки показателей эксплуатационной надежности, определение весомости различных факторов, влияющих на работоспособность машин. При этом предполагается, что фактическое значение оцениваемого параметра находится внутри диапазона значений, высказанных экспертами, а «обобщенное» коллективное мнение является более достоверным.

Укрупненный алгоритм экспертных процедур, базирующийся на методе Дельфи, представлен на рис. 3.7.

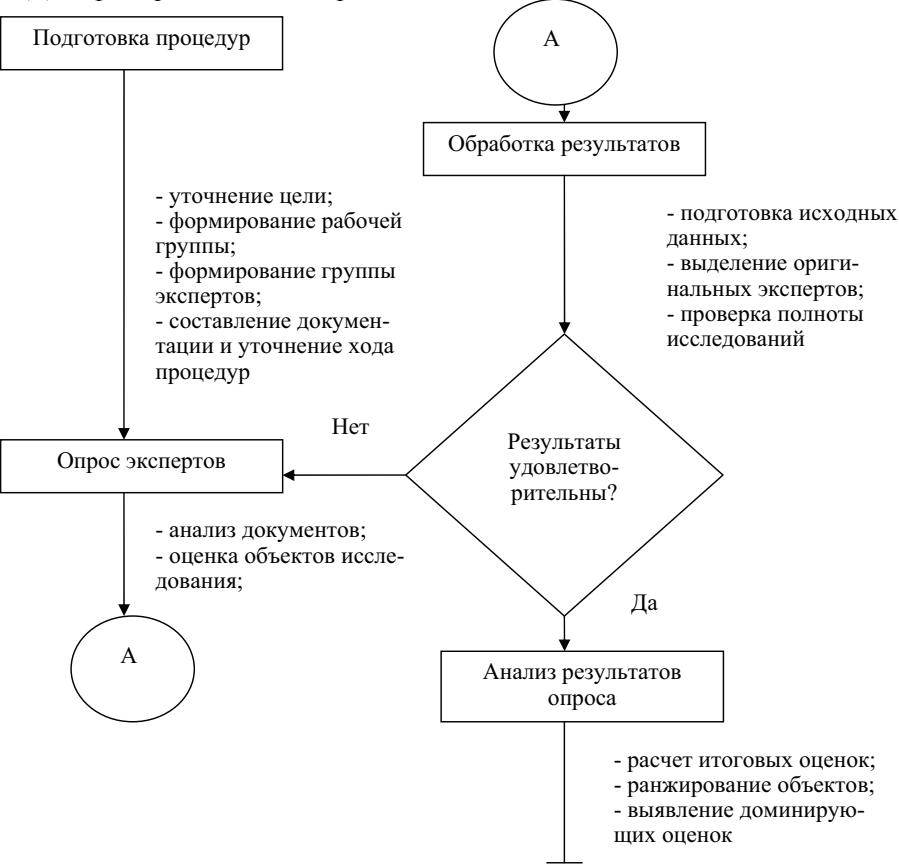


Рис. 3.7. Алгоритм процедур метода Дельфи

При практическом использовании метода создаются две независимых группы исполнителей – рабочая и экспертная.

В состав рабочей группы входит организатор, являющийся высококвалифицированным специалистом в области надежности машин, и технические работники. Основной задачей организатора является своевременный, правильный и объективный анализ получаемой от экспертов информации и корректировка результатов.

В настоящее время метод Дельфи – это итерационная процедура, позволяющая подвергнуть мнению каждого эксперта критическому анализу со стороны всех остальных. Предположим, что перед группой экспертов, состоящей из 12 специалистов, поставлена задача оценки продолжительности выполнения определенного мероприятия, например, перевод парка автомобилей на газомоторное топливо.

Порядок применения данного метода следующий:

1. Руководитель экспертизы индивидуально ставит задачу перед экспертами и получает их оценки, то есть в рассматриваемом примере продолжительность реализации мероприятия.

2. При обработке оценки экспертов располагаются в порядке возрастания (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Оценка экспертов

Эксперт, номер	Оценка экспертами (первый тур) продолжительности мероприятия, месяцы
Э9	10
Э8	11
Э5	12
	Q_1 (или $\bar{x} - \sigma$)=12,5
Э7	13
Э12	14
Э10	16
	$M=Q_2$ (или \bar{x})=17
Э4	18
Э3	20
Э11	21
	Q_3 (или $\bar{x} + \sigma$)=21,5
Э1	22
Э2	24
Э6	25

3. На шкале оценок наносятся квантили Q_1 , $M=Q_2$, Q_3 таким образом, чтобы число экспертов и оценок разделить на четыре равные доли. M – медианное значение результатов опроса экспертов, делящее их на две равные части. Иногда в качестве оценок принимается $\bar{x} - \sigma$ (вместо Q_1), \bar{x} (вместо M), $\bar{x} + \sigma$ (вместо Q_3).

4. После обработки данных каждому члену группы индивидуально сообщаются следующие результаты первого тура: $Q_1=12,5$; $M=17$; $Q_3=21,5$ мес. и предлагается во втором туре пересмотреть свою оценку, причем, если новая оценка больше $Q_3=21,5$ или меньше $Q_1=12,5$, эксперту рекомендуется в письменном виде обосновать свое мнение.

5. Определяются результаты второго тура, и новые значения Q_1 , M и Q_3 сообщаются всем экспертам. Как правило, после каждого тура дисперсия оценок сокращается. Обычно процедура продолжается 3-4 раза, после чего аргументы экспертов повторяются, а вариации оценок стабилизируются. В качестве группового мнения принимается медиана завершающего тура, то есть $M_{зав}$.

Точность метода Дельфи увеличивается с ростом числа экспертов и количества итераций и сокращается с увеличением интервала времени между турами и ответами членов группы.

Преимущества данного метода: анонимность, оперативность, управляемая обратная связь, возможность оценки мотивации при изменении мнения эксперта.

Основной недостаток метода: влияние мнения большинства на экспертов, давших крайние оценки (меньше Q_1 и больше Q_3) в последующих за первым туром итерациях.

Контрольные вопросы

1. Какие методы анализа в диагностике относятся к теоретическим?
2. На чем базируются эвристические методы?
3. Какие виды анализа в задачах диагностики относятся к эвристическим?
4. Какие методы операций мышления относятся к эвристическим?
5. Какую роль в решении диагностических задач играют логика и интуиция?
6. В чем проявляется аналогия между человеческой и технической системами диагностирования?
7. В чем заключается достоинство человеческих систем диагностирования?
8. Привести примеры неисправностей, которые может диагностировать человек органами чувств.
9. Какие области применения экспертных систем в практике диагностирования?
10. Какие существуют методы выбора и формирования экспертных групп?
11. Какой порядок применения метода Дельфи?

3.4. Методы диагностических исследований на эмпирическом уровне

3.4.1. Основные методы эмпирических исследований

Для оценки технического состояния объекта диагностирования необходимо определить текущее состояние конструктивного параметра и сравнить это значение с нормой. Однако конструктивные параметры в большинстве случаев не поддаются измерению без разборки узла или агрегата. Кроме того, разборка является нежелательной, так как каждая разборка и нару-

шение взаимного положения приработанных деталей приводит к сокращению остаточного ресурса на 30-40% и более.

Для этого о значениях конструктивных показателей при диагностировании судят по косвенным признакам проявления технического состояния без разборки, мерой которых являются диагностические параметры. Независимо от применяемого метода получения данных о техническом состоянии объекта, постановка диагноза производится на основании логической обработки полученной информации путем сопоставления текущих значений параметра с нормативными.

К методам эмпирических исследований и диагностирования двигателей относятся: наблюдение, сравнение, измерение, испытание, эксперимент, опрос, обобщение, вычисление, обработка результатов исследований (рис. 3.8) [16, 17].

Эмпирические методы	Исследования фактологий выявления состояния и связей в исследуемом объекте
Наблюдение	Планомерность, изучение четко поставленной задачи, целенаправленность, систематичность, активность, обобщение
Сравнение	Классификация и группирование по наиболее существенным признакам и параметрам, установление подобия или определенных признаков предметов, процессов, явлений, объектов
Измерение	Определение числового значения некоторой величины с помощью единицы измерения
Эксперимент	Апробация знаний исследуемых процессов и явлений в контролируемых условиях. Натурные, искусственные, естественные, социальные эксперименты. Повторяемость, управляемость, выявление новых свойств, проверка гипотезы, теоретических положений и т. п.
Опрос	Сбор первичной информации об объективных и субъективных факторах со слов опрашиваемого
Обобщение	Логический процесс перехода от единичного к общему или к более общему знанию
Вычисление	Определение случайных событий и вероятностей, математического ожидания и дисперсии, измерений, закона распределения случайных величин, оценка погрешностей измеряемых величин
Обработка результатов исследований	Математическая статистика, корреляционный анализ, регрессивный анализ, метод наименьших квадратов, дисперсионный анализ, ковариационный анализ

Рис. 3.8. Методы эмпирических исследований

Основными методами эмпирических исследований являются: экспериментальный и измерительный.

Экспериментальный метод основан на получении информации о показателях в результате проведения эксперимента (например, в период опытной эксплуатации). Естественно, что показатели при этом могут измеряться приборами, регистрироваться, рассчитываться, определяться экспертным или иным способом (наблюдение, сравнение, пробные испытания двигателя или поездки автомобиля и др.).

Измерительный метод применяется в тех случаях, когда можно использовать средства измерений. Технических средств, применяемых в практической деятельности, сравнительно много, соответственно с их помощью можно проводить измерения: электрические, физические, биологические, физико-химические, микробиологические и ряд других.

Методы эмпирических исследований составляют основу инструментальных методов, широко применяются на стадиях разработки систем диагностирования на всех стадиях жизненного цикла двигателя.

Под качеством измерений понимается совокупность свойств, обуславливающих получение результатов с требуемыми точностными характеристиками, в необходимом виде и в установленные сроки. Количество измерений характеризуется такими показателями, как точность, правильность и достоверность. Эти показатели должны определяться по оценкам, к которым предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности.

На основании проведенных эмпирических исследований разрабатывают методы диагностирования, которые, исходя из установленных задач, должны включать:

- диагностическую модель объекта диагностирования;
- алгоритм диагностирования и программное обеспечение;
- правила измерения диагностических параметров;
- правила определения структурных параметров;
- правила анализа и обработки диагностической информации и принятие решения.

Основными методами диагностирования являются тестовые и функциональные (рабочие). При тестовом диагностировании на объект подается тестовое воздействие, а при рабочем – рабочее воздействие.

3.4.2. Классификация методов диагностирования по виду контролируемых физических процессов и способу получения информации

Методы диагностирования двигателя характеризуются физической сущностью и способом измерения диагностических параметров, наиболее приемлемых для использования в зависимости от задачи диагностирования отдельного двигателя или в составе автомобиля.

На практике диагностирования двигателей применяют три основных группы методов (рис. 3.9).

1. Метод диагностирования по параметрам рабочих процессов и эксплуатационных свойств. Техническое состояние устанавливают по ди-

намике изменения параметров. Например, изменение давления впрыска топлива, времени разгона до заданной скорости, частоты вращения коленчатого вала, расхода топлива, мощности двигателя и др. Такие показатели непосредственно характеризуют состояние агрегатов и узлов двигателя.

Измеряемые этим методом параметры образуют множество внутренних параметров и множество выходных параметров объекта диагностирования.

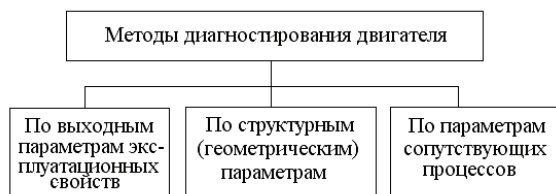


Рис. 3.9. Общая классификация методов диагностирования

Диагностирование проводится в составе автомобиля с использованием стендов с беговыми барабанами или непосредственно на одном отдельно работающем двигателе. Методы широко применяют для общей оценки технического состояния двигателя и автомобиля.

2. Метод диагностирования по параметрам сопутствующих процессов. При этом анализируют показатели, косвенно влияющие на работу узлов и агрегатов двигателя и автомобиля, например, тепловое поле агрегатов и деталей, шумы, виброакустические процессы и т. п. Измеряемые этим методом параметры образуют подмножество внутренних процессов.

К методам диагностирования по параметрам сопутствующих процессов относятся следующие:

- методы диагностирования по герметичности рабочих объемов. Сущность процесса диагностирования заключается в создании в контролируемом объеме избыточного давления (или разрежения) и в оценке интенсивности его снижения. Таким методом диагностируют цилиндропоршневую группу двигателя, пневматические приводы, плотность прилегания клапанов и др.;

- тепловой метод, заключающийся в определении параметров, характеризующих количество теплоты, выделяемой в результате протекания процессов сгорания, работы сил трения при заданных скоростном и нагрузочном режимах. Такими параметрами могут быть температура нагрева, скорость ее изменения. Метод может применяться для диагностирования узлов трения агрегатов и подшипников, электрических контактов (соединений), гидравлических и других процессов;

- методы диагностирования узлов и систем по параметрам колебательных процессов. Методы широко используют при создании средств технического диагностирования двигателей; их можно разделить на методы оценки колебаний напряжения в электрических цепях (на этой основе созданы мотор-тестеры), параметров виброакустических сигналов, получаемых при работе зубчатых зацеплений, клапанных механизмов, подшипников и т. д.;

Методы этой группы базируются на имитации скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя, определении при заданных условиях выходных параметров и сравнении их количественных значений с нормативными (эталонными).

пульсации давления в гидравлическом аккумуляторе и трубопроводах (на этой основе созданы дизель-тестеры для диагностирования дизельной топливной аппаратуры);

- методы, оценивающие состояние узлов и агрегатов по физико-химическому составу отработавших газов, жидкостей и других эксплуатационных материалов. Например, простейший экспресс-анализ отработавшего масла на загрязнение, спектральный анализ проб масел, в результате проведения которого по наличию и концентрации различных химических элементов в масле можно установить работоспособность отдельных узлов и сопряжений агрегата. Если в пробе картерного масла двигателя имеется высокое содержание свинца, имеет место износ вкладышей шатунных и коренных подшипников, если высокое содержание железа – износ гильз цилиндров, если высокое содержание кремния – засорение воздушного фильтра и т. д. По составу отработавших газов можно оценить техническое состояние топливной системы, по изменению цвета тормозной жидкости – тормозной системы и т. д.

3. Метод диагностирования по структурным (геометрическим) параметрам, непосредственно характеризующим состояние узлов и агрегатов двигателя.

Эта группа методов основывается на объективной оценке геометрических параметров (зазор в сопряжениях, люфт, размер детали, величина износа и т. д.). Метод применим, когда указанные параметры легкодоступны для непосредственного измерения. Техническое состояние устанавливается по зазорам в сопряжениях, значениям регулируемых параметров и т. д. Согласно классификации параметров диагностирования, измеряемые этим методом параметры образуют подмножество внутренних и выходных параметров.

Группа методов по геометрическим параметрам включает в себя методы, оценивающие состояние двигателя по герметичности рабочих объемов, степени износа цилиндропоршневой группы двигателя, гидравлических систем, работоспособности воздушно-пневматических систем, плотности прилегания клапанов и др. путем создания в контролируемом объеме избыточного давления или, наоборот, разрежения, а также определяющие интенсивность падения давления (разрежения).

Структурные параметры, изменяющиеся в процессе эксплуатации машин, оценивают различными диагностическими методами, которые можно объединить в две группы:

- требующие полной или частичной разборки;
- позволяющие без разборки узлов оценить техническое состояние.

Методы первой группы (микрометрирование, искусственные базы, профилографирование и др.) очень трудоемки.

По воздействию на исследуемый объект методы второй группы можно разделить на контактные и бесконтактные.

Физические методы основаны на использовании различных физических явлений, сопутствующих работоспособному или неработоспособному состоянию объекта.

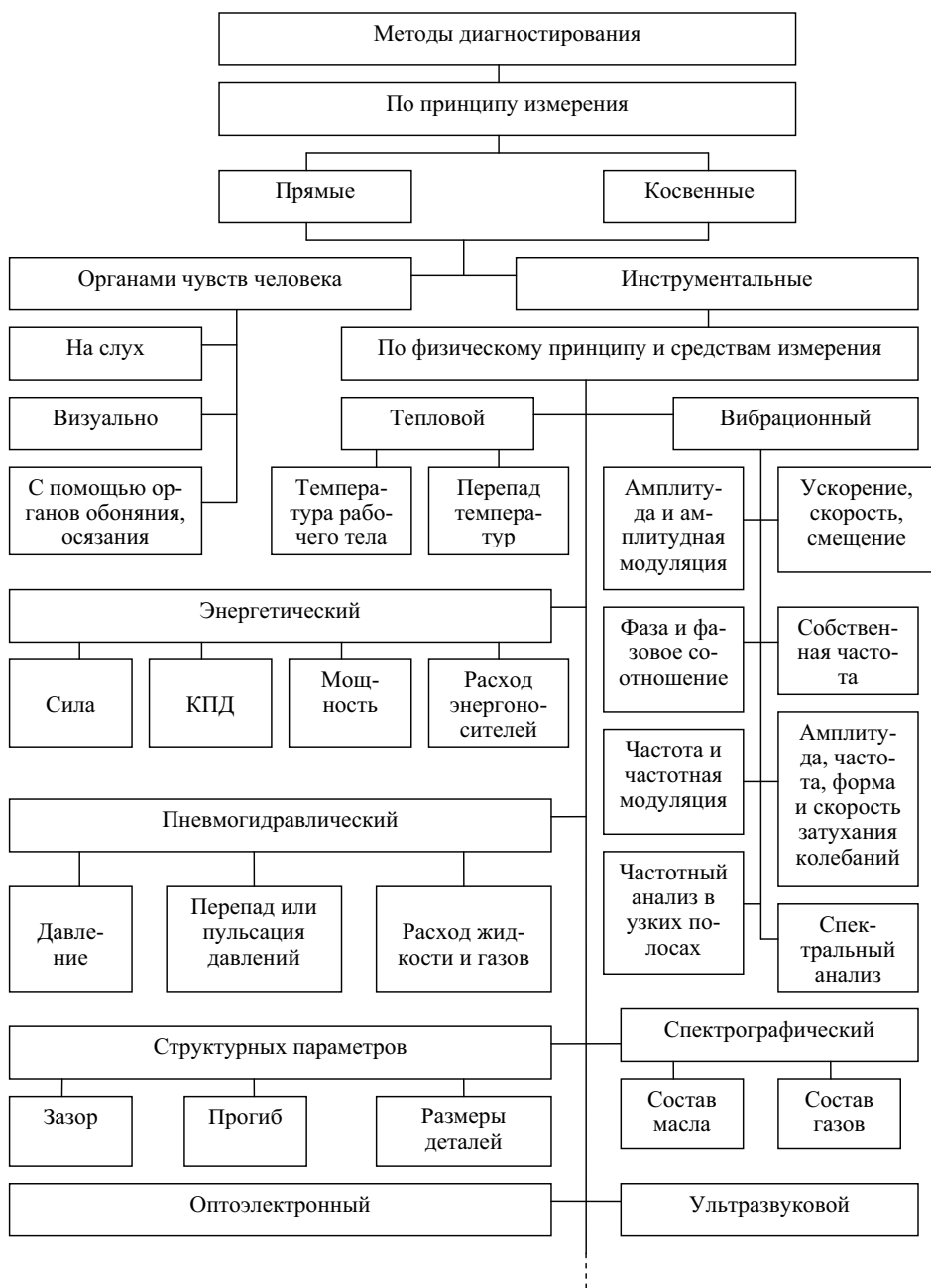
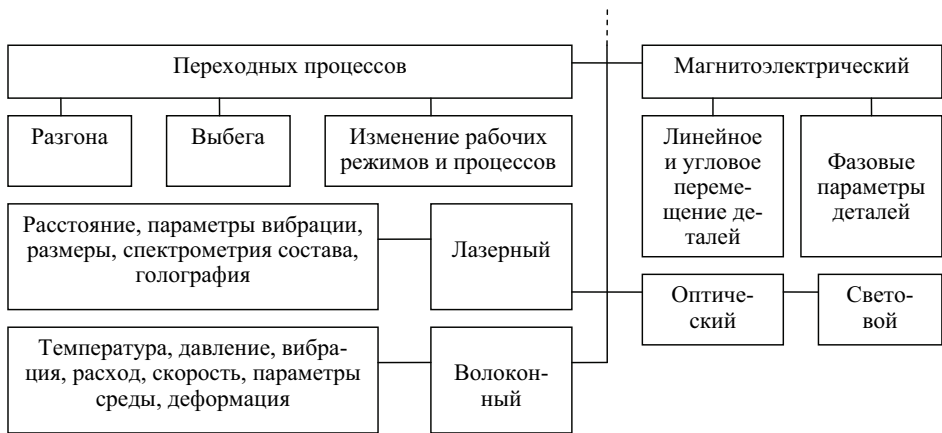


Рис. 3.10. Классификация методов диагностирования по виду контролируемых физических процессов и принципу работы узла, агрегата



Окончание рис. 3.10

Большое разнообразие разработанных методов диагностирования отдельных двигателей и в составе автомобиля, можно классифицировать на прямые и косвенные (рис. 3.10).

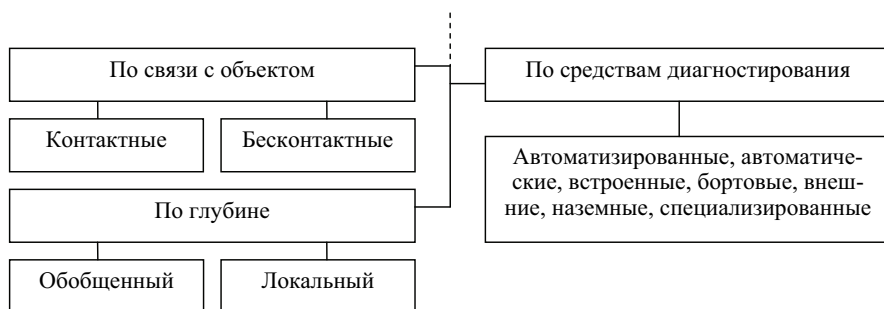


Рис. 3.11. Классификация методов диагностирования по способу получения информации

Инструментальные методы можно классифицировать по виду контролируемых физических процессов и принципу работы (рис. 3.10, 3.11). Здесь приведенные интеллектуальные методы являются неотъемлемыми при применении любых методов диагностирования.



Продолжение рис. 3.11



Окончание рис. 3.11

Все методы диагностирования разделяют: по способу определения, по виду структурных параметров физических величин, по принципу работы объекта, принципу реализации, способу получения информации, степени универсальности цели и глубине диагностирования, по периодичности и оперативности, по средствам диагностирования, способам связи с объектом и др.

По характеру взаимодействия между объектом и средством диагностирования различают функциональное и тестовое диагностирование.

Методы диагностирования подразделяют на механические, электрические, электронные. Реализующие их средства технической диагностики бывают с ручным и программным управлением, автоматизированные и автоматические.

Классификационно-структурная схема методов оценки технического состояния применительно к основным узлам дизелей приведена на рис. 3.12 (без учета микропроцессорных (электронных) систем). Анализ этой схемы говорит о том, что общей проблемой предлагаемых методов диагностирования является отсутствие устойчивых закономерностей диагностики даже для однотипных двигателей работающих в аналогичных условиях. Значения одного и того же параметра с разной степенью вероятности свидетельствует о различных состояниях или причинах отказов. Указанное обстоятельство требует внимательного подхода к формированию алгоритмов диагностирования, тем более что достоверность диагноза при этом определяется как вероятность, т. е. величина меньше единицы.

При диагностических исследованиях и разработке бортовых систем диагностирования двигателей широко применяются методы, описанные в работе [14]:

- методы тестового и функционального диагностирования;
- методы определения технического состояния элементов и рабочих процессов путем сопоставления их с нормативными параметрами: временных характеристик, эталонных зависимостей, эталонных осциллограмм; наложения и сопоставления текущих осциллограмм рабочих и переходных процессов с эталонными зависимостями и масками;
- статопараметрический метод определения параметров давления, расхода рабочих жидкостей (топлива) и газов;

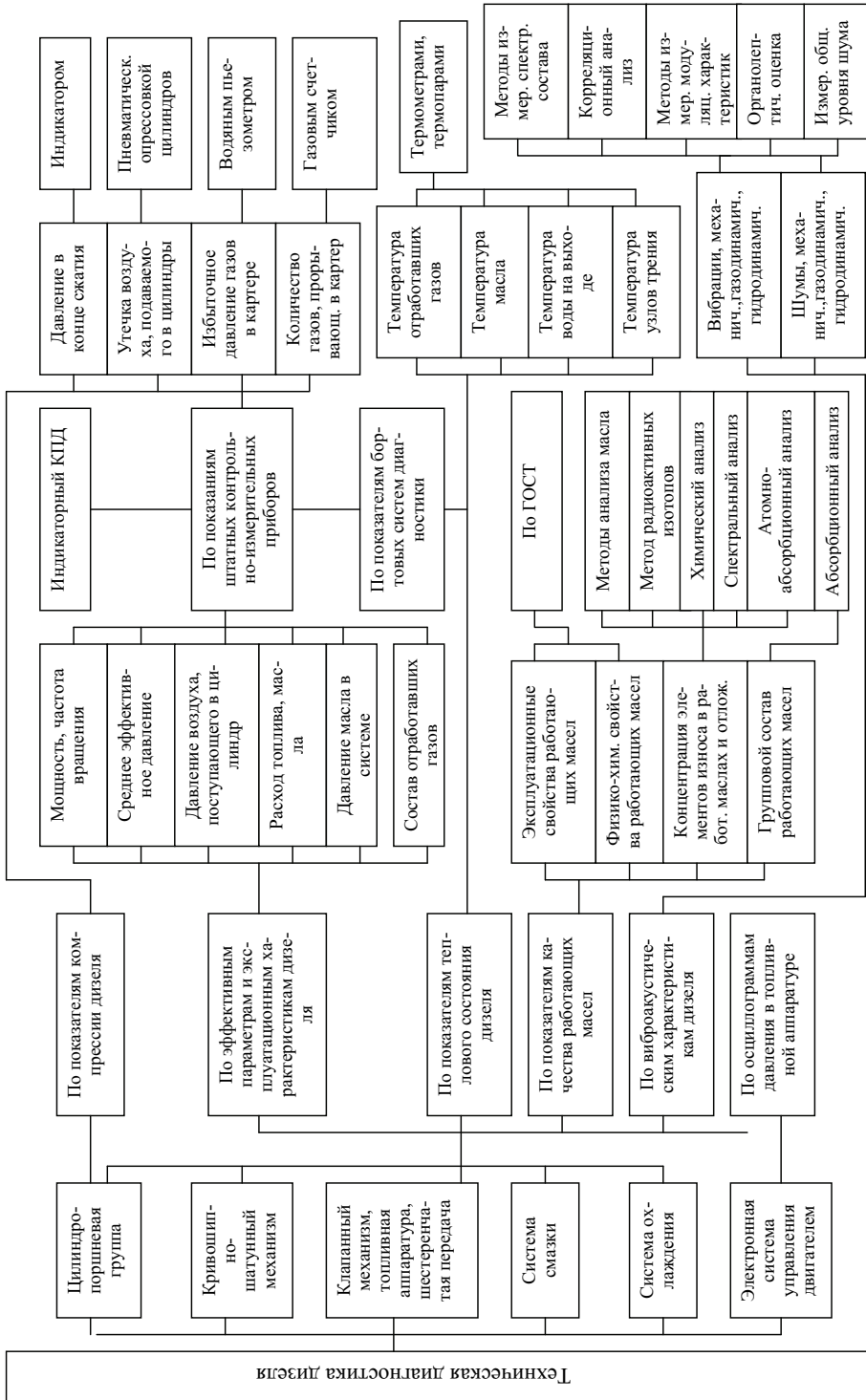


Рис. 3.12. Методы технической диагностики дизеля

- метод амплитудно-фазовых характеристик пульсаций давления;
- метод переходных характеристик – анализа диаграмм изменения давления и гидравлического сопротивления в гидросистемах;
- термодинамический метод измерения перепадов температур на входе и выходе элементов гидросистем;
- метод спектрального анализа жидкостей и моторных масел для определения количества и вида износа элементов двигателя;
- силовой метод, основанный на определении усилия, развиваемого исполнительным механизмом;
- метод измерения скорости нарастания давления, усилия на исполнительном элементе;
- метод переходных характеристик, основанный на анализе диаграмм реакции гидросистемы на изменение в ней давления при неустановившихся рабочих режимах;
- акустический метод – применяется для диагностирования потоков жидкостей и газов, протекающих через повреждения, путем регистрации шума в ультразвуковом диапазоне;
- кинематический метод, определяющий общее техническое состояние по скорости перемещения исполнительного элемента;
- неразрушающие методы (магнитный, электрический, вихревой, тепловой, оптический, радиационный, проникающих веществ, автоэмиссионный, капиллярный, акустический, акустической голографии и др.), контроля трещин, пор, потери герметичности и т. п.;
- структурно-следственные и функционально-структурные методы определения технического состояния объектов диагностирования;
- тепловой и оптический методы контроля неисправностей и дефектов;
- газоаналитические методы контроля технического состояния двигателя по составу отработавших газов;
- методы контроля изнашивания элементов в механических системах (микрометрирование, профилографирование, взвешивания, метод искусственных баз, анализа содержания продуктов износа и химического состава трущихся поверхностей, виброакустический метод);
- программные, логические и автоматизированные методы контроля и диагностирования технических систем (методы программно-логического контроля, методы алгоритмического контроля и методы тестового контроля и диагностирования).

При выборе метода диагностирования важное значение имеет его назначение: для комплексной оценки технического состояния двигателя или для углубленного диагностирования, направленного на локализацию и устранение выявленной неисправности или отказа; точность диагноза, количество диагностируемых двигателей и т. д.

Предварительно считают, что механические методы и средства «малой» диагностики наиболее эффективны, если количество диагностируемых двигателей мало, требования к точности измерения их диагностических параметров не ужесточены и межконтрольные циклы велики. Для большого парка двигателей наиболее эффективны методы диагностирования, реализуемые в

высокопроизводительных и достаточно точных автоматизированных и автоматических системах.

Оптимальным является метод диагностирования, обеспечивающий минимум суммарных издержек на единицу наработки двигателя автомобиля (исключение составляют методы, обеспечивающие дополнительные требования к условиям безопасности работы и безотказности).

В целом наиболее оптимальным является совершенствование конструкции двигателей с позиции повышения контролепригодности и применения более эффективных методов и бортовых средств технической диагностики. В результате сравнения удельных издержек при различных вариантах улучшения конструкции и различных методах диагностирования по всем диагностическим параметрам выбирают вариант, обеспечивающий минимум суммарных издержек.

3.4.3. Виды диагностирования по организационным признакам

Вопросу организации диагностирования двигателей в эксплуатации посвящено много работ, например, [24, 25, 26, 27].

Одной из основных проблем диагностирования массовых двигателей транспортных машин на АТП и СТО является недостаточная приспособленность двигателей к бортовому и стационарному диагностированию. Большинство транспортных машин ранних выпусков не имеют универсальных устройств сопряжения со средствами технического диагностирования. В связи с этим предприятия определяют под свои двигатели разные производственные структуры стационарных диагностических линий и комплексов диагностирования транспортных средств.

По форме организации производства диагностические работы подразделяют на: **централизованное**, при котором работы одного или нескольких видов диагностирования централизованы в масштабе региона, транспортного объединения, комбината или выполняются централизованным техническим обслуживанием; **децентрализованное**, при котором все работы производятся на предприятиях базирования транспортных машин; **распределенное**, при котором одна часть работ централизована, а другая выполняется децентрализованным методом (рис. 3.13).

Организационная структура комплексов диагностирования характеризуется специализацией постов и степенью совмещения диагностирования с техническим обслуживанием, что позволяет разделить методы диагностирования на **специализированные**, при которых работы по отдельным воздействиям технического диагностирования двигателей транспортных машин производятся на отдельных специализированных участках; **комплексные**, при которых все диагностические работы на предприятии выполняются на универсальном диагностическом посту с комплексным (комбинированным) стендом; **совмещенные**, при которых все диагностические работы выполняются на постах технического обслуживания и текущего ремонта с помощью передвижных средств диагностирования.



Рис. 3.13. Классификация видов диагностирования по организационным признакам

По последовательности выполнения работ (относительно других работ технического обслуживания и текущего ремонта) диагностирование можно подразделить на: **предварительное**, которое выполняется перед проведением остальных работ технического обслуживания и текущего ремонта; **заключительное**, которое выполняется после проведения названных работ; **сопутствующее**, операции которого сопутствуют выполнению регулировочных работ в процессах технического обслуживания и текущего ремонта.

По периодичности проведения диагностирование может быть **плановым** – производится в обязательном порядке всем двигателям машин, запланированным на техническое обслуживание; **непрерывным** – осуществ-

ляется непрерывно в процессе движения машины или работы отдельного ее агрегата (например при его обкатке); **выборочным** – проводится дополнительно к плановому диагностированию и реализуется путем выборочного контроля двигателей транспортных машин не на участках (постах) диагностирования, а в дорожных условиях – на постах экспресс-диагностирования.

По типу основных средств диагностирование может классифицироваться как **стационарное** – производится внешними средствами диагностирования двигателей транспортных машин в стационарных условиях; **бортовое** – осуществляется встроенными или установленными на машине средствами диагностирования; **мобильное** – выполняется с помощью передвижных станций и средств диагностирования.

При эксплуатации транспортных машин предусмотрены два основных вида плановых технологий диагностирования (Д-1 и Д-2), соответствующих первому и второму техническому обслуживанию (ТО-1 и ТО-2). Вне эксплуатационных транспортных предприятий могут иметь место контрольное (Дк), заявочное (Дз), регулировочное (Др), годовое (Дг), экспресс (Дэ), приработочное (Дп) и выборочное (Дв) диагностирование. В работе [26] описаны виды названных технологий диагностирования.

Контрольные вопросы

1. Какие основные виды эмпирических исследований?
2. Какие виды неисправностей диагностируются по параметрам рабочих процессов и эксплуатационным свойствам?
3. Какие виды неисправностей диагностируются по параметрам сопутствующих процессов?
4. Какие виды неисправностей диагностируются по структурным параметрам?
5. Назвать виды диагностирования по форме организации диагностических работ.

3.5. Методы тестового и функционального диагностирования

3.5.1. Методы тестового диагностирования

По характеру взаимодействия между объектом и средством диагностирования различают функциональное и тестовое диагностирования.

Методы тестового диагностирования применяются для механических, газо-, гидродинамических и электрических систем на логическом и инструментальном уровнях.

При тестовом диагностировании на объект подаются специальные тестовые воздействия. Этот вид диагностирования применяется тогда, когда необходимо проверить исправность функционирования или обнаружить неисправность (дефект), влияющий на работоспособность проверяемого объекта. При диагностировании реализуются специальные алгоритмы, состоящие из элементарных этапов контроля. Окончательный диагноз ставится по полученным результатам элементарного контроля механических, гидравлических, пневматических и электронных систем. При этом используются эвристические подходы, диагностические модели аналитических описаний

или графоаналитических представлений основных свойств объекта и разработанные на их основе алгоритмы диагностирования в виде совокупности последовательных операций.

Процесс постановки диагноза технического состояния заключается в логической обработке некоторой реально существующей информации. Эта информация поступает в виде внешних признаков, прямо или косвенно характеризующих состояние транспортных машин. На рис. 3.14 представлена классификация методов тестового диагностирования.



Рис. 3.14. Методы тестового диагностирования

Тестовое диагностирование осуществляют как при функционировании объекта, так и в тех случаях, когда объект не выполняет своих рабочих функций. При тестовом диагностировании необходимо принять меры, исключающие влияние тестовых воздействий на правильность функционирования объекта.. При тестовом диагностировании нефункционирующего объекта может потребоваться введение его в режим диагностирования (прогрев, включение и т. п.).

При тестовом диагностировании сигнал контроля формируется в блоках системы диагностирования и по каналам передачи информации подается на входы объекта диагностирования; при этом тестовые воздействия могут подаваться на основные входы объекта (то есть на те входы, которые используются для входа или выхода рабочих сигналов) и дополнительные, используемые специально для целей диагностирования.(рис. 3.15).

Ответы объекта могут сниматься с основных выходов (то есть с тех выходов, которые используются объектом по его назначению) и с дополнительных (специально предназначенных для диагностирования). Все выходы

(основные и дополнительные) представляют собой контрольные точки объекта.

Диагностирование охватывает совокупность операций контроля, которые выполняются в определенной последовательности. От того, насколько быстро и просто контрольные точки дают возможность получить информацию, в большой степени зависит эффективность диагностирования.

Результаты тестовых или рабочих воздействий (ответы) во всех видах систем диагностирования от объекта поступают на входы средств диагностирования.

Сам процесс диагностирования предусматривает наличие умения и способности производить целенаправленные действия. Эти способности и определяют алгоритм управления, то есть совокупность правил, методов и способов, которые дают возможность производить управление. Организовать такое целенаправленное действие (управление) можно только тогда, когда известно действительное состояние объекта управления.

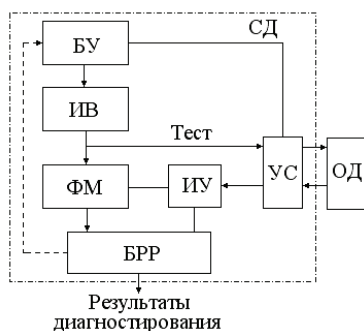


Рис. 3.15. Структурная схема тестового диагностирования

Тестовое диагностирование требует специальных генераторов, которые вырабатывают тестовые воздействия, подаваемые в ОД и стимулирующие его реакцию. По степени отклонения реакции ОД от номинальной судят о его техническом состоянии. При тестовом диагностировании нефункционирующего ОД может потребоваться введение его в режим диагностирования. Для тестового диагностирования используют как рабочие входы, так и входы, специально организованные для диагностирования. Это положение справедливо и для съема информации о реакции ОД на тестовое воздействие при его диагностировании.

Тестовое диагностирование осуществляют одиночным воздействием, например одиночным импульсом (то есть в результате одного элементарного контроля), или многократным воздействием (серией импульсов), то есть в результате совокупности элементарных этапов контроля. Многократное воздействие характерно для тестового диагностирования дискретных объектов, когда на вход подается серия (последовательность) импульсов. При тестовом диагностировании возможен одномерный случай, когда оценивают один показатель, или многомерный, когда оценивают более одного пока-

На рис. 3.15 приняты следующие обозначения: БУ – блок управления; ИВ – источник воздействия; ФМ – физическая модель; ИУ – измерительное устройство; УС – устройства связи объекта диагностирования ОД с системой диагностирования СД; БПП – блок расшифровки результатов диагностирования.

Для реализации алгоритма диагностирования средства диагностирования должны иметь источники воздействий (в системах тестового диагностирования), измерительные устройства, устройства связи и обработки информации.

зателя. Многомерные случаи специфичны для дискретных объектов, когда на вход подают и с выхода снимают векторные величины. К многомерному сводится и случай, когда на выходе объекта оценивают один выходной сигнал по нескольким показателям (например, амплитуда и частота).

Для сложного многофункционального объекта, состоящего из нескольких взаимосвязанных элементов, можно использовать комбинированное диагностирование – сочетание разных методов при диагностировании различных элементов. При этом допустимо применение для одного объекта как функционального, так и тестового диагностирования.

Целью анализа результатов контроля является установление диагноза. Результаты контроля представляются в виде значений сигналов в контрольных точках, а результаты диагностирования должны быть представлены в другой форме, более удобной для практического использования. В простейшем случае данные диагностирования или их расшифровка представляют собой результаты сравнения значений сигналов в контрольных точках с заданными эталонными значениями этих сигналов. Операцию расшифровки полученных сигналов можно проводить с использованием вычислительных устройств или автоматизированных схем.

3.5.2. Методы диагностирования по функциональным параметрам

Диагностирование механических систем. Функциональное диагностирование заключается в обработке информации, характеризующей качество функционирования объекта диагностирования, когда определяются параметры работоспособности узла, агрегата, системы по выполнению основных функций.

Функциональный подход к диагностике требует анализа не только выходных информационных сигналов, но и внутренних процессов, происходящих в механической или потокосодержащей системе машин. Существует много деталей и узлов, ухудшение структурных параметров которых тесно связано с выполнением основных функций механизмом. Это такие параметры, как снижение точности работы, расход энергоносителей, потеря мощности, качества тормозных механизмов и другие.

Параметрические методы основаны на измерении диагностических параметров, которые напрямую связаны с функциональным назначением объекта, а в ряде случаев непосредственно характеризуют его техническое состояние (например, температура отработавших газов, давление масла. КПД и т. п.). Параметрические методы широко применяются при диагностировании.

Функциональное диагностирование осуществляется в процессе функционирования объекта в рабочем режиме. По функциональному назначению средства технической диагностики подразделяют на комплексные для диагностирования автомобиля и средства для углубленного диагностирования.

Задачи контроля работоспособности по комплексным параметрам состоят в выявлении (без указания места и причины) определенной совокупности неисправностей при диагностировании по обобщенным параметрам:

мощности, топливной экономичности, безопасности движения и влияния на окружающую среду. При отклонениях от нормальных значений параметров (выполнение основной функции) необходимо начинать поиск места, вида и причины конкретной неисправности. Во всех этих случаях выбирают наиболее простые способы контроля, позволяющие ответить лишь на вопрос, работоспособен объект или нет, при этом необходимо затратить минимум времени и средств именно на контроль работоспособных объектов.

Наибольшее распространение получили методы диагностирования по эффективным параметрам рабочих процессов: по герметичности рабочих объемов; по геометрическим параметрам; по тепловому состоянию; по колебательным процессам; по составу эксплуатационных материалов и отработавших газов; по периодически повторяющимся процессам или циклам (стробоскопический метод) и пр.

Метод диагностирования по периодически повторяющимся процессам основан на использовании стробоскопического эффекта, сущность которого заключается в том, что вращающаяся деталь кажется неподвижной при освещении ее кратковременными вспышками с частотой, равной (или кратной) частоте вращения детали. Этим методом можно диагностировать узлы и детали автомобилей, совершающие возвратно-поступательные и качательные движения. Широкое применение метод находит для определения правильности установки угла опережения зажигания, контроля пробуксовки колес и пр.

При функциональном диагностировании на основные входы объекта диагностирования поступают рабочие воздействия согласно его рабочему алгоритму функционирования, а сигналы диагноза снимаются с объекта, используя контрольные точки (рис. 3.16).

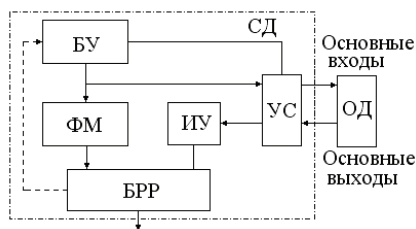


Рис. 3.16. Структурная схема функционального диагностирования

производят по алгоритму функционирования ОД: фиксируют последовательность выполнения всех операций или временные интервалы и продолжительность выполнения операций или то и другое. Выбор метода определяет специфика ОД и особенности построения алгоритма его функционирования. При функциональном диагностировании на вход ОД должны поступать нормальные рабочие сигналы и он должен функционировать в нормальных условиях.

Техническое состояние ОД в процессе его функционирования оценивается по различным внешним признакам. В качестве параметров обычно используются выходные показатели (параметры технической характери-

На рис. 3.16 приняты следующие обозначения: БУ – блок управления; ФМ – физическая модель; ИУ – измерительное устройство; УС – устройства связи объекта диагностирования ОД с системой диагностирования СД; БРР – блок расшифровки результатов диагностирования.

Техническое диагностирование

ки) объекта, отражающие его соответствие назначению. Так, для системы питания дизеля это будут цикловая подача и ее фазы, скорость нарастания и колебание давления топлива в гидравлическом аккумуляторе, несоответствие заданного давления, создаваемого насосом. Для трансмиссии – мощность механических потерь, для гидроцилиндра – тяговое усилие на штоке, для реле-регулятора – регулируемое напряжение. Нагрев элементов ОД выше допустимого характеризует возникновение к ним неисправности. Состояние электротехнических и электронных объектов оценивается по электромагнитному полю, создаваемому ими при функционировании, искажение которого свидетельствует об изменениях технического состояния ОД. Большие возможности для оценки технического состояния ОД с поврежденными элементами вращательного и поступательного движения имеют виброакустические методы.

Анализ виброакустического поля ОД позволяет обнаружить ненормальности в его работе, вызванные изменением его технического состояния. О состоянии механических объектов при их функционировании судят и по различным косвенным признакам. Так в ОД с трущимися деталями изнашивание сопровождается увеличением концентрации металлических включений в смазочном материале. Фиксируя эти изменения, судят о степени изнашивания трущихся деталей и, следовательно, об изменении технического состояния ОД. Информацию о техническом состоянии ОД дает расход (потребление) энергии. Как правило, увеличение потребления энергии свидетельствует о нарушениях в работе ОД, вызванных возникновением дефекта (неисправности).

На рис. 3.17 приведена классификация методов функционального диагностирования.

К функциональным методам контроля двигателей относится измерение мощности и расхода топлива, колебаниях давления в системах подачи топлива, оценка дымности и токсичности отработавших газов. Работоспособность системы смазки оценивается давлением масла в магистрали, а степень пригодности масла – по количеству осадка в роторе центрифуги за определенный промежуток времени. Эффективность работы узлов системы охлаждения оценивают как по значению, так и по перепаду температур на входе и выходе из радиатора. Техническое состояние подкачивающего насоса топливной системы лучше всего оценивать по максимальному противодавлению.

Однако еще очень многие узлы, агрегаты не имеют обоснованных функциональных методов диагностики и для установления их нормальной работоспособности приходится проверять их по многим показателям, с большими затратами времени.

Функциональное диагностирование можно осуществлять по конечному результату, то есть выходу объекта, причем выходную реакцию на рабочие воздействия оценивают одномерно или многомерно. Многомерность характерна для диагностирования дискретных объектов и оценки состояния объектов по диагностическим характеристикам, одномерность, как правило, - для оценки диагностических параметров. Технологическое оборудова-

ние и технологические процессы диагностируют по качеству продукции и ремонтах. При этом возможны одномерные и многомерные оценки.

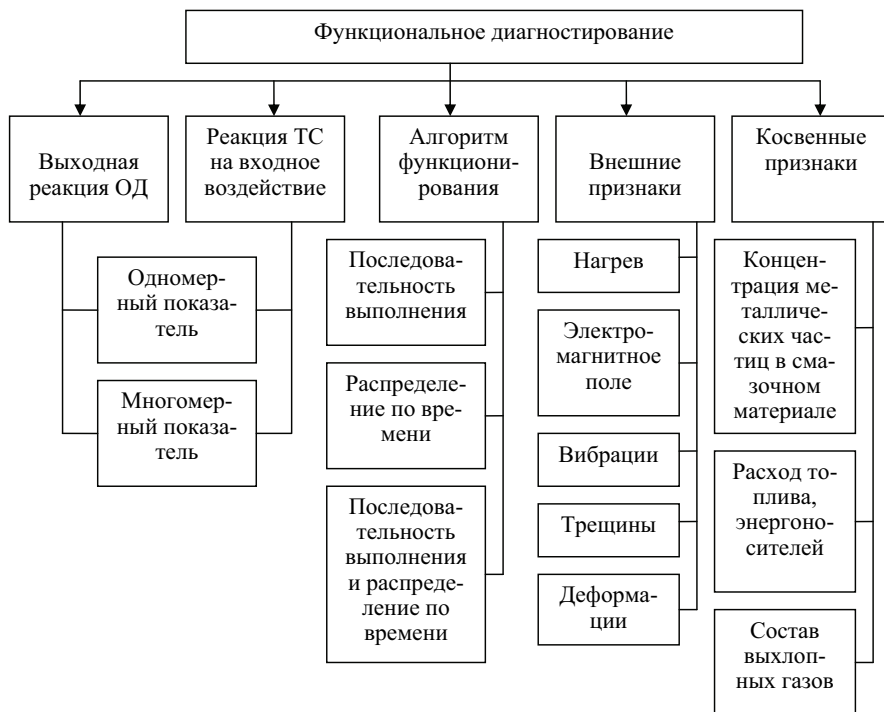


Рис. 3.17. Методы функционального диагностирования

Самыми распространенными являются системы функционального диагностирования когда двигатель автомобиля используют по назначению. Так, водителю современного автомобиля приходит информация о давлении топлива в главной магистрали двигателя, температуре охлаждающей жидкости, об уровне топлива в баках, частоте вращения коленчатого вала и т. д. Эти сигналы дают возможность сразу реагировать на нарушения правильности функционирования объекта (заменять узлы и детали, которые неисправны, переходить на другой режим функционирования, делать несложные регулировки, в большинстве случаев обеспечивать выполнение заданного объема работы и тем самым повышать эффективность использования автомобиля. С другой стороны, они дают возможность более полно использовать богатый опыт водителей при решении задач оптимального управления техническим состоянием автомобилей для их более эффективного использования.

Дальнейшее развитие системы функционального диагностирования предусматривает предоставление водителю информации об основных эксплуатационных характеристиках автомобиля: топливной экономичности, динамичности, тормозной эффективности, уровне загрязнения окружающей

среды. Самым важным требованием, которое ставится перед системой функционального диагностирования является возможность управления режимами движения автомобиля для достижения максимальной топливной экономичности при сохранении безопасности процесса перевозки.

Контрольные вопросы

1. Для каких технических систем применяются тестовые методы диагностирования?
2. В каких случаях используют тестовое диагностирование?
3. В каких случаях используют одиночное и многократное тестовое воздействие?
4. Привести примеры тестового диагностирования механических систем.
5. На чем основаны параметрические методы диагностирования?
6. По каким параметрам производят функциональное диагностирование?
7. Какие существуют методы функционального диагностирования?

3.6. Методы диагностирования по эталонам, маскам и нормативным параметрам

3.6.1. Метод сравнения с эталонным образцом

В тех случаях, когда проверяемый параметр определяется очень многими факторами и существенно зависит от состояния контрольного оборудования и условий испытаний, приходится прибегать к эталонным образцам.

Применение эталонов очень широко используется при производстве дизельной топливной аппаратуры для достижения высокой точности и идентичности регулирования узлов системы. Не в меньшей степени при ремонте и техническом обслуживании нужно обеспечить идентичность регулировок топливных насосов и форсунок, идентичность комплектования прецизионных деталей. Значит, надо иметь эталонные форсунки, эталонные топливные насосы и эталонные контрольные стенды.

Эталонный насос проверяют и регулируют на эталонном стенде; пользуясь эталонным насосом, подбирают эталонные форсунки. Эталонный комплект (насос, форсунки и топливопроводы высокого давления) строго индивидуален по закреплению топливопроводов, форсунок и секций насоса.

Особенно важно использовать эталонную форсунку для оценки качества распыления рабочими форсунками, качества очистки форсунок.

Очень широко используется метод эталонов при контроле амплитудно-фазовых процессов изменения давления, дросселирования жидкостей, эталонных осциллограмм рабочих процессов.

При диагностировании системы зажигания карбюраторного двигателя дается общая оценка системы по интенсивности искрообразования в сравнении с эталонной. При разнице искрового промежутка более 2 мм систему проверяют по отдельным объектам, также используя эталонные элементы.

Для контроля контрольно-измерительных приборов также используют эталонные приборы, например, манометр, амперметр, термометр и т. д.

С помощью эталонных образцов оценивают дымность отработавших газов (по отпечаткам дымности), загрязненность масла (по отпечаткам капель масла на фильтровальной бумаге).

Полученные при измерениях показатели шумности агрегатов сравниваются с эталонным образцом. Показатели двигателей (мощность и удельный расход топлива) должны быть приведены к эталонным условиям по температуре, давлению и влажности атмосферного воздуха (температура 20 °С, давление 760 мм рт. ст., относительная влажность 70%).

Градуировка специальных приборов проводится также в определенных эталонных условиях. Так дросели-расходомеры (например, КИ-1097Б) градуируются по расходу (подаче) масла при температуре его в 5 °С и давлении на выходе в 10 МПа.

3.6.2. Методы совмещения с эталоном

Этот метод распознавания технического состояния технических системы или протекающих в них процессов положен в основу многих систем эмпирического и электронного диагностирования. Распознавание образа производится путем совмещения текущих значений диагностического параметра или действующего процесса с эталонными; например, осциллограммами.

Для диагностирования **методом сравнения** в простых системах используют набор визуальных эталонов и электронных модулей. Так, метод контроля системы зажигания с помощью осциллоскопа основан на эталоне формы сигнала первичного и вторичного напряжения. Расшифровывают сигналы осциллоскопа (осциллограф и устройство для управления синхронизацией и временной разверткой генератора) путем сравнения эталонной осциллограммы с полученной в процессе замера.

По осциллограммам можно определить состояние искровых свечей зажигания, первичной цепи и прерывателя-распределителя, катушки зажигания и конденсатора. При использовании осциллоскопов надо иметь в виду, что требуется высокая квалификация диагноста (оценка не по однозначным показаниям приборов, а по искажениям формы сигнала), кроме того, при неисправности самого осциллоскопа могут быть сделаны выводы о неисправности системы зажигания.

Для диагностирования методом совмещения используют электронные модели в виде схем, матриц, фотомасок, формы сигналов и т. п.

Распознавательные системы делятся по способу сохранения эталонных наборов, сформированных при проектировании системы распознавания образов, на системы с фотомаской, системы с электронными моделями эталонов (в виде, например, схем резисторов, ферритовых стержней с катушками и т. п.) и математических систем.

Первый пример распознавания образа состоит в использовании фотомаски, в которой используется метод совмещения объекта с эталоном. Распознаваемый объект (например, дефект электронной платы или буква текста), проектируется на эталонные маски. Каждая маска – это трафаретное

отверстие в непрозрачном металле. Луч света освещает объект (который обычно имеет темный цвет на белом фоне) и через оптическую систему направляется через маску на фотоумножитель, расположенный за эталонной маской. Чем больше темный объект совпадает с эталоном, тем меньше освещается фотоумножитель. В идеале при полном совпадении изображения объекта с эталоном освещение фотоумножителя минимальное, и выходной сигнал равен нулю, что и является признаком распознавания образа. Эталонные маски подаются для сравнения по порядку, и поэтому известно, с каким объектом совпал объект.

Недостатки такой системы распознавания образа: загрязнение объекта приведет к неверной классификации; объект должен быть строго определенных размеров и на определенном расстоянии от оптической системы; необходима очень точная центровка схемы.

Другим примером распознавания образа технического состояния является использование опорного спектра процесса. Распознавание образа осуществляется при наложении маски нормативных значений на текущий (контролируемый) процесс.

В системах распознавания образов с электронными моделями распознавания «взвешиваются» сумма сигналов от рецепторного поля объекта с эталонами в виде матриц сопротивлений или ферритовых стержней с катушками. Это сравнение определяет степень схожести объекта и эталона.

Математическая модель системы распознавания образов, которая использует принцип совмещения с эталоном, делит изображение на много элементарных прямоугольных ячеек, которые в совокупности создают общий прямоугольник изображения. В каждой ячейке измеряется яркость или другая оптическая величина, которая характеризует освещенность. Соответственно для каждой ячейки вырабатывается цифра кода: например, в двоичной системе исчисления «1» отвечает осветленную ячейку, а «0» - неосветленную. Результирующий код выглядит как ряд, составленный из результатов измерения всех рядов рецепторного поля.

Набор результатов таких измерений рецепторного поля создает вектор, который в двоичной системе исчисления имеет, например, следующий вид:

$$P = \{0011010.....111100010\}.$$

Соответствующий математический эталон тоже имеет вид вектора

$$M_j = \{0011010.....111100010\},$$

который может отличаться от изображения рецепторного поля P . Скалярное произведение

$$C_j = P \cdot M_j^T$$

характеризует их схожесть и называется «коэффициент корреляции» (по аналогии с аналогичными расчетами в теории вероятностей).

Задача состоит в нахождении эталона, который имеет наибольший коэффициент корреляции с изображением. Сравнение производится многократно поскольку точное размещение изображения неизвестно, а центровка (определение точного положения любым простым методом) не всегда происходит точно без помех.

Недостатки математической модели: метод может использоваться, когда изображения одного и того же класса имеют одно и то же начертание и общие размеры; метод является чувствительным к толщине и контрасту линий, и на результат классификации влияет смещение изображения по отношению к точному положению. В связи с этим математические модели могут совершенствоваться: строят по несколько эталонов одного класса; буквы рассматриваются как сложные изображения свободного начертания, которые состоят из элементов в виде отрезков, дуг и т. п.

3.6.3. Методы контроля по нормативным значениям диагностических параметров

Выбор диагностических параметров и критерии оценки технического состояния машин рассмотрены в пятом разделе.

Диагностический параметр выходных процессов характеризует функциональные свойства двигателя автомобиля, агрегата, системы. Примеры: мощность двигателя, частота вращения коленчатого вала, расход топлива, цикловая подача топлива.

Диагностический параметр сопутствующих процессов сопровождает работу двигателя, агрегата, системы. Примеры: температура агрегата, уровень шума или вибрации; содержание продуктов износа в масле; содержание вредных веществ отработавших газов.

Диагностические нормативы – это количественная мера диагностического параметра.

Параметры технического состояния узла, агрегата, детали (элемента) подразделяют по важности на две группы. К первой, группе относятся параметры, связанные с безопасностью эксплуатации двигателя автомобиля, а также параметры, от которых зависят экологические и эргономические показатели – шум, вибрация, токсичность отработавших газов, электромагнитные поля. Как правило, диагностические параметры этих механизмов хорошо отражают выходные (рабочие) показатели (например, содержание вредных веществ в отработавших газах) и могут быть измерены непосредственно. Ко второй группе относятся параметры, связанные с технико-экономическими показателями, - это, например, расход топлива.

Важнейший этап разработки системы технической диагностики – определение нормативных значений структурных и диагностических параметров технического состояния элементов двигателя, обеспечивающих постановку диагноза технического состояния.

К нормативным значениям параметров оценки технического состояния двигателя, отдельных узлов и систем относятся номинальные P_H , пре-

дельные P_D и допускаемые P_D значения. Значения диагностических нормативов устанавливаются:

а) государственным стандартом – такие значения, которые определяют безопасную эксплуатацию автомобиля, содержание вредных веществ в отработавших газах и т. п.;

б) другими руководящими техническими материалами (инструкциями, техническими условиями и т. п.) – все остальные значения диагностических нормативов (например, плотность электролита, тепловой зазор в клапанах двигателя и т. д.).

Критерием нормирования параметров двигателя, вредно воздействующих на человека, является степень санитарно-гигиенических и (или) психофизической допустимости воздействий (шума, вибрации, магнитных полей и отработавших газов) на человека. Критерием нормирования параметров двигателя, воздействующих на окружающую среду, являются экологические последствия их воздействия.

Номинальное и предельное значения структурных параметров составных частей агрегатов двигателя должны устанавливаться проектной организацией в эксплуатационной и ремонтной технической документации.

Изменение структурных параметров составных частей по мере наработки в постоянных эксплуатационных условиях обычно имеет плавный монотонный характер (см. рис. 3.18, а), отличающихся друг от друга скоростью изменения параметра. В этом случае оптимальное допустимое значение структурного параметрам (например, зазоры в сопряжениях ЦПГ, КШМ, ГРМ и др.) рассчитывается по технико-экономическим и вероятностным критериям. Кроме качественных показателей проектирования, на характер изменения диагностического или структурного параметров влияет большое число эксплуатационных (переменных, нагрузочных, температурных и др. факторов). При переходе от структурных параметров к диагностическим и от уровня технического состояния отдельных элементов и сопряжений к оценке технического состояния агрегатов двигателя в целом характер изменения диагностических параметров перестает быть монотонным. Но отклонение функциональных параметров обычно происходит по монотонно возрастающей кривой.

Когда понятие неисправности задается эксплуатационной технической документацией (например, в виде ограничений на выходные показатели), условное предельное значение диагностического параметра может быть определено путем пересчета на основе аналитической или регрессионной модели. Однако в большинстве случаев понятие неисправности количественно не задается, а определяется из опыта эксплуатации. Поэтому далее описаны три метода определения нормативных значений диагностических параметров [28].

1. Метод назначения предельного значения на основе толерантных границ.

2. Метод определения допускаемого значения по матрице переходных вероятностей.

3. Метод определения допустимого значения диагностического параметра по его связи со структурным параметром.

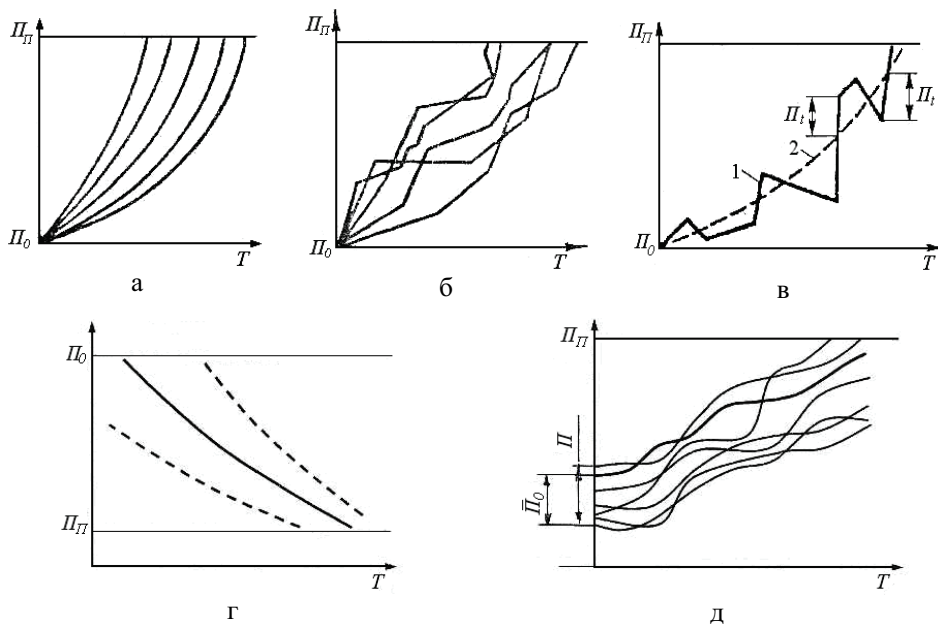


Рис. 3.18. Характер кривых отклонений параметров состояния элементов двигателя:

а – плавные монотонно возрастающие кривые; б, в – ломаные немонотонно возрастающие кривые; 1 – фактическое отклонение параметра; 2 – усредненное отклонение; г – снижение функциональных характеристик двигателя; д – вариации процесса старения как случайные функции; $P_{П}$ – предельное значение диагностических параметров; P_0 – исходное состояние; T – наработка; P_i – стационарная случайная функция отклонения параметра; \bar{P}_0 – случайная величина исходного параметра прогнозирования процесса; P – разброс исходных значений параметров качества изготовления

Применение каждого из этих методов обуславливается информацией о реализациях диагностических параметров и о характере его связи с показателем работоспособности узла двигателя.

Первый метод позволяет находить предельное значение диагностического параметра при малой статистической информации, а также в случаях, когда невозможно установить экономические зависимости, например, для параметров, связанных с безопасностью движения. В качестве статистических данных используется разовая выборка значений диагностических параметров для объектов контрольной группы двигателей.

Во втором методе оптимизация проводится по критерию суммарных затрат на ремонт и регулировку (полное и частичное восстановление двигателя) в предположении, что поведение диагностического параметра по мере наработки описывается так называемой «марковской моделью». Для таких параметров реализации отдельных объектов характеризуются резкими изменениями скорости нарастания на соседних участках наработки (циклах

контроля), причем наблюдается сильное «переплетение» реализаций параметра для различных объектов (ЦПГ, КШМ, ГРМ). В результате этого совокупность реализации уже не может быть удовлетворительно описана в виде веера плавных кривых (рис. 3.18, а).

Отклонение структурного или ресурсного параметра элемента под влиянием группы эксплуатационных факторов происходит уже не по гладкой, а по ломаной возрастающей кривой с изломами (рис. 3.18, б, в). Резкое увеличение скорости изменения параметра P_i в отдельные моменты обусловлено случайными неблагоприятными эксплуатационными условиями (большие нагрузки, скорости, запыленность воздуха, нарушение регулировок, недостаточная смазка и т. п.).

Анализ двух схем поведения диагностических параметров (см. рис. 3.18, а, б) показывает, что по физической сущности они отличаются степенью влияния «предыстории», то есть ретроспекции данного двигателя на последующее изменение его технического состояния.

В первом случае (см. рис. 3.18, а) скорость изменения параметра для каждого элемента и агрегата двигателя в основном зависит от его «начального» (проектного и производственного) качества, случайные же эксплуатационные факторы оказывают второстепенное влияние. Наблюдение такого параметра на некотором интервале наработки в прошлом дает возможность достаточно хорошо экстраполировать его поведение в будущее. Приращенные параметры на соседних межконтрольных циклах характеризуются при этом тесной корреляционной связью. Наличие, кроме этого, фиксированного предельного значения параметра (или по крайней мере достаточно узкого диапазона предельных значений) позволяет в результате прогнозировать для каждого отдельного агрегата процесс приближения его к отказу.

Во втором случае (см. рис. 3.18, б, д) картина иная – на процессы изменения технического состояния деталей двигателя оказывает влияние не исходное качество, а в основном резко переменные эксплуатационные факторы. Корреляционная функция быстро убывает, в результате чего приращения параметра на отдельных циклах межконтрольной наработки оказываются слабо зависящими друг от друга. Иначе говоря, наблюдение параметра в прошлом дает недостаточно информации о его поведении в будущем. Единственное, что можно прогнозировать в таких условиях, – это вероятности тех или иных приращений параметра за цикл межконтрольной наработки. Поскольку во втором случае диагностический параметр имеет только стохастическую связь с работоспособностью двигателя (либо соответствующий структурный параметр является не прямой, а лишь косвенной причиной отказа), то приходится ограничиться вероятностями отказа элементов двигателя на предстоящей межконтрольной наработке при различных значениях параметра.

В качестве простого критерия для приближения реального процесса изменения диагностического параметра к марковскому можно использовать средний коэффициент корреляции между приращениями параметра на соседних циклах контроля:

$$r = \frac{D_1}{D_1 + D_2},$$

где D_1 – дисперсия средних скоростей изменения параметра по отдельным агрегатам двигателя, обусловленная различным «начальным качеством»; D_2 – дисперсия скоростей изменения параметра по циклам контроля относительно средней скорости для конкретного агрегата, обусловленная влиянием переменных условий эксплуатации.

Если $D_2 > D_1$ (соответственно $r < 0,5$), то данный процесс считается марковским.

Третий метод предполагает определение допустимого значения диагностического параметра по известной связи его со структурным при минимизации удельных издержек на эксплуатацию, ТО и ремонт с учетом точности измерения параметра.

Контроль технического состояния объекта диагностирования по нормативным параметрам. Разработка метода распознавания образов технического состояния требует детального изучения состояния (изображений) образа: выбирают наиболее характерные особенности изображения образов технического состояния; производят их классификацию; рассматривают особенности преобразования диагностических параметров или признаков образа в коды и классы технического состояния; принимается система распознавания образов, которая оперирует признаками образа технического состояния или неисправностей. Указанные параметры системы могут задаваться жестко при проектировании по статистическим данным или с возможностями адаптации (в пределах допустимого изменения образа) в интеллектуальных системах.

В связи с различной скоростью изменения ресурсных (рис. 3.18, а, б) и функциональных параметров (рис. 3.18, г) их динамика в одноименной совокупности элементов двигателя характеризуется пучком кривых. При этом кривые, расположенные слева (рис. 3.18, а и рис. 3.19), отражают изменение параметров с относительно небольшим ресурсом, а расположенные справа отражают изменение параметров элементов с гораздо большим ресурсом. В случае реализации изменений параметров конкретного элемента в виде ломаной кривой пучок будет состоять из переплетающихся в большей или меньшей степени линий (рис. 3.18, б, рис. 3.19).

В практике ТЭА в большинстве случаев приходится иметь дело с вероятностными процессами. Например, диаметр цилиндров двигателя вследствие износа увеличивается неодинаково по мере наработки, тем более для разных двигателей той же модели (рис. 3.19).

Во многих случаях достаточно знать не функцию (регрессию) $y = f(x)$, а числовые характеристики совокупности случайных величин x_1, x_2, x_3 и т. д.

Связь между предельным изменением и отказом имеет вероятностный характер. Тем не менее, в целях упрощения принимают, что потеря работоспособности элементов двигателя – это момент пересечения кривой параметра состояния элемента линии Π_{II} , которая соответствует предельной ве-

личине параметра, установленной нормативно-технической документацией. Методы нормирования номинальных (P_0) и предельных значений (P_{II}) параметров приведены в работах [14, 27, 28].



Рис. 3.19. Возможные изменения диаметра цилиндров двигателя по мере его работы

Заводом-изготовителем в пределах от 18 до 22° поворота коленчатого вала. В процессе эксплуатации двигателей вследствие износа деталей происходит уменьшение этого угла, поэтому основной целью диагностирования и регулировочных работ является установка угла опережения впрыска в пределы, регламентируемые заводом-изготовителем. Другой пример: при чрезмерном расходе масла вследствие износа деталей цилиндропоршневой группы проводится текущий ремонт двигателя с заменой этих деталей с целью снижения расхода масла до начального норматива $G_{M0}=0,5\%$ от расхода топлива. [29]

Предельный норматив соответствует такому состоянию объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация становится нецелесообразной по технико-экономическим соображениям (высокий расход топлива, масла и т. д.) или по соображениям безопасности (возможна авария автомобиля). Предельный норматив диагностического параметра задают требования стандартов и в соответствующей технической документации.

Допустимый норматив P_D является основным диагностическим нормативом при периодическом диагностировании, проводимом при ТО автомобиля. Он представляет собой ужесточенное значение предельного норматива P_{II} , при котором обеспечивается заданный или экономически оптимальный уровень вероятности отказа на предстоящем межконтрольном пробеге автомобиля. На основе допустимого норматива ставят диагноз о состоянии объекта и принимают решение о необходимости текущего ремонта или регулировок.

В эксплуатации допустимый норматив принимается условно как граница неисправных состояний объекта для заданной периодичности его межконтрольного пробега. Состоит допустимый норматив P_D из начального значения P_0 и допустимого приращения ΔP , то есть

$$P_D = P_0 \pm \Delta P \quad (3.1)$$

Если текущее значение диагностического параметра Π_i выходит из допустимого норматива, это означает, что хотя объект и является работоспособным, его не следует выпускать на линию без регулировки или текущего ремонта из-за высокой вероятности отказа или пониженных технико-эксплуатационных свойств (рис. 3.20).

В случае линейной зависимости $\Pi=f(l)$ допустимый диагностический норматив определяется как ужесточение предельного норматива на величину $\Delta\Pi$, обеспечивающую безотказную работу объекта на предстоящем межконтрольном пробеге, то есть

$$\Pi_D = \Pi_P - \Delta\Pi. \quad (3.2)$$

При разработке электронных систем распознавания указываются требования к временным, амплитудным, частотным и другим характеристикам, к их нормализации и квантованию диагностических параметров (сигналов).

Нормализация – это приведение образа (диагностического сигнала) к нормальным условиям с целью сравнения с эталоном. При квантовании признака, который изменяется, непрерывный признак разбивается на поддиапазоны. Например, эталонное напряжение 220 В имеет поддиапазоны «нормальное напряжение 200 В $<U<233$ В», «Пониженное напряжение $U<200$ В», «Повышенное напряжение $U>233$ В». Сигнал текущих значений диагностического сигнала (параметра) получают при переходе границы поддиапазонов и микропроцессор обрабатывает сигнал.

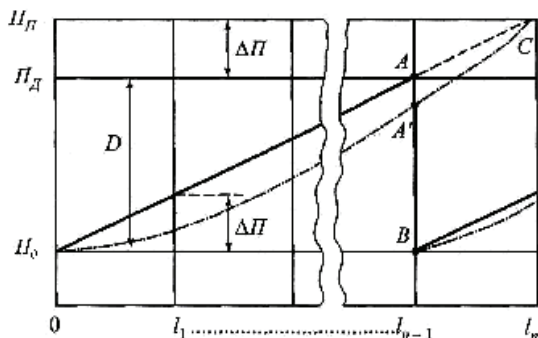


Рис. 3.20. Схема формирования диагностических нормативов при линейной зависимости параметра Π от пробега l

ния диагностического параметра (ресурсного или функционального) от исходного (номинального Π_0) до предельного (Π_P , рис. 3.20) можно разбивать на классы технического состояния, например «хорошо», «допустимо», «требует принятия мер», «недопустимо» [14]. Оценка технического состояния объекта диагностирования производится путем сравнения текущих значений параметра с нормативными классами технического состояния.

На рис. 3.20 приняты следующие обозначения: Π_D – допустимое приращение параметра; AB – профилактическое восстановление объекта; l_i – периодичность планового диагностирования; $\Delta\Pi$ – приращение параметра за межконтрольный пробег; точка C – аварийное состояние объекта; n – количество диагностических операций за $l_p \approx l_n$; $l_p \approx 1$.

Для количественной оценки технического состояния значения

Контрольные вопросы

1. Привести примеры применения эталонных образцов при диагностировании элементов топливной системы.
2. По каким эталонам оценивают исправность системы зажигания?
3. В каких случаях распознавания образов используют трафаретные маски?
4. В каких случаях распознавания образов используется опорный спектр процесса?
5. Какие используются методы определения нормативных значений диагностических параметров?
6. Как производится контроль технического состояния объекта диагностирования по нормативным параметрам?

3.7. Тепловой и оптический методы диагностирования

3.7.1. Тепловые методы

Тепловые методы основаны на анализе теплового (инфракрасного) излучения элементов, деталей или всего объекта и относятся к физическим методам. Работоспособное (исправное) изделие имеет определенную картину теплового излучения. Изменение этой картины свидетельствует об изменении режима работы или неисправностях в узлах трения и сопряжения деталей, в механической потокосодержащей, электрической и других частях машин.

Различают пассивные и активные методы теплового контроля. При пассивном контроле анализ тепловых полей производят в процессе их естественного возникновения. При активном – нагрев производят внешним источником тепловой энергии.

Контроль температурного поля осуществляют с помощью термометров, термоиндикаторов, пирометров, радиометров, инфракрасных микроскопов, тепловизоров и других средств.

Приборы неконтактного измерения температуры различают по принципу действия: яркостные, цветные, радиационные.

Основными тепловыми методами контроля и диагностирования являются: контактный, неконтактный, термографический.

Для отдельных деталей и элементов увеличение интенсивности их теплового излучения характеризует локальные тепловые перегревы, связанные с наличием дефектов или неоднородностей. Своевременное обнаружение этих дефектов позволяет принять меры по предупреждению выхода из строя деталей и устройства в целом. Тепловые методы по способу получения информации об интенсивности излучения делятся на контактные и неконтактные.

К **контактным** относятся методы с использованием термопар, температурно-чувствительных красок, жидкокристаллических соединений. Метод измерения с помощью термопар достаточно прост, хорошо отработан, благодаря малому быстродействию позволяет замерять температуру в локальных точечных участках. Метод температурно-чувствительных красок прост и удобен, но обладает необратимостью процессов и дискретностью индика-

ции значений температуры. Метод с использованием жидкокристаллической индикации основан на свойстве жидкокристаллических соединений приобретать окраску в зависимости от температуры среды. С их помощью можно измерять разность температур до 0,1 °С. При помощи ряда холестерических жидкокристаллических соединений проводится измерение температуры от +10 до +100 °С. Применяются также методы, основанные на свойстве фотографических эмульсий изменять скорость проявления в зависимости от температуры.

Неконтактные методы измерения характеристик теплового поля основаны на свойствах тел излучать электромагнитную энергию, пропорциональную их температуре. Используют методы с одновременной и последовательной регистрацией теплового излучения. Последовательный метод заключается в фиксации теплового излучения, преобразовании его в электрический сигнал с последующим его усилением и регистрацией. Развертка луча приемника-преобразователя осуществляется механической, оптико-механической или фотоэлектронной системами. Для регистрации тепловых лучей используют радиометры, микрорадиометры, болометры, тепловизоры и другие устройства.

Однако тепловая диагностика предполагает использование широкого спектра дорогостоящих средств. При визуальном контроле для параллельного съема информации используют электронно-оптические преобразователи – эвалографы, эджеографы, приборы с жидкими кристаллами и фоточувствительными пленками, тепловизоры и т. п.

К основным техническим параметрам приемных устройств относятся: порог чувствительности – минимальное значение обнаруживаемого теплового потока; значение выходного сигнала на единицу потока падающего излучения; инерционность приемника, определяемая его постоянной времени.

Порог чувствительности рассчитывается по формуле

$$P_{min} = ES_n / [(V_c / V_\omega) \Delta f] \quad (3.3)$$

где E – плотность подающего на приемник излучения, Вт/см²; S_n – площадь приемника, см²; V_c / V_ω – отношение выходного сигнала к тепловому шуму; Δf – частота излучения, Гц.

Обычно порог чувствительности измеряется при воздействии на приемник излучения черного тела с температурой +300 °С для неохлаждаемых и +100 °С для охлаждаемых приемников.

Тепловой метод используется при диагностировании узлов с трением деталей машин, электрических контактов, полупроводниковых приборов (диодов и тиристоров), электронных устройств и др.

В процессе работы механизма в подвижных соединениях возникает повышенный нагрев. К ним относятся подшипниковые узлы и зубчатые передачи, силовые электрические контакты, преобразовательные полупроводниковые установки и др. Особенно опасными являются электрические соединения в тяговых двигателях, между трансформатором и коммутирующими аппаратами. Внедрение инфракрасной термографии позволяет снизить время контроля и повысить его достоверность.

Тепловизионная аппаратура, получившая в настоящее время широкое применение в диагностике, основана на сканировании поверхности объекта лучом инфракрасного спектра, приеме, усилении и развертке отраженного луча. В технической диагностике приборы термовидения с дистанционным обследованием объекта применяют:

- при диагностике электрооборудования системы питания и управления двигателем, выявления плохого электроконтакта и т. п.;
- при обследовании вращающихся частей для обнаружения локальных перегревов из-за повышения трения, отсутствия смазки, неправильной эксплуатации (метод применяют совместно со стробоскопированием объекта);
- при диагностике работающего технологического оборудования, доступ к поверхности которого затруднен;
- при диагностике качества изоляции;
- при диагностике напряженного состояния металла.

При работе используются малогабаритные тепловизоры (матричные инфракрасные камеры) и термографы (линейные инфракрасные сканеры). Они обладают высокой точностью измерения температуры (до десятых сотых долей градуса). При этом с большой точностью определяется тепловое состояние не только силовой электронной аппаратуры, но и низковольтных электрических и электронных сборок и схем, попадающих в поле кадра ИК-камеры устройства. В устройствах термодиагностики применяют тепловизоры и термографы типа ИРТИС-2000 (фирма ИРТИС – Москва), Therma CAM™ (Германия), Therma CAM P65 и Therma CAM E45 (США).

Основной недостаток термодиагностики с помощью тепловизоров – большое время на обработку данных диагностирования, поэтому этот метод используют как дополнительный к существующим системам «Прогноз-1» и «Вектор». Стоимость тепловизионных ИК-камер сопоставима со стоимостью средств вибродиагностики.

Оптоэлектронные методы (теповизионные методы) позволяют по тепловому портрету объекта диагностирования делать выводы о техническом состоянии агрегата и узла машины, элементов герметичности и электрических систем.

Тепловизионная дефектоскопия геометрии двигателя и теплоизоляции автомобиля основана на использовании экспериментальных термограмм. Бесконтактные измерения тепловых режимов электрических устройств автомобиля позволяют выделять нагретые зоны электронных блоков и элементов.

3.7.2. Оптические методы

К оптическим методам контроля технического состояния относятся: ультрафиолетовые лучи, инфракрасные лучи, эндоскопы, оптические устройства.

Визуально-оптический контроль предназначен для обнаружения поверхностных дефектов: трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, разрывов, остаточных деформаций.

Визуальный метод контроля обеспечивает обнаружение трещин с раскрытием более 0,1 мм (ГОСТ 23479-79), а визуально-оптический при увеличении прибором в 20-30 раз – не менее 0,02 мм, точность метода в значительной степени зависит от контраста дефектов с ионом, уровня освещенности и способа освещения.

Оптический неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом. Для получения информации используют явления интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеивания света, а также изменение характеристик самого объекта исследования в результате эффектов фотопроводимости, люминесценции, фотоупругости и других.

Оптическое излучение или свет – это электромагнитное излучение с длиной волн от 10^{-5} до 103 мкм, в котором принято выделять ультрафиолетовую (от 10^{-3} до 0,38 мкм), видимую (от 0,38 до 0,78 мкм) и инфракрасную (от 0,78 до 103 мкм) области спектра.

К числу дефектов (неисправностей), обнаруживаемых оптическими методами, относятся:

- нарушения сплошности;
- расслоения;
- поры;
- трещины;
- включения инородных тел;
- изменения структуры материалов;
- коррозионные раковины;
- отклонение геометрической формы от заданной;
- внутренние напряжения в материале.

Применение переносных микроскопов дает возможность исследовать состояние и структуру поверхности материалов при увеличении. В сочетании со стробоскопом оптические методы позволяют исследовать подвижные детали.

Одним из наиболее распространенных методов обнаружения дефектов в конструкции является визуальный осмотр. Однако для осмотра труднодоступных узлов и деталей необходима полная или частичная разборка узла, а иногда и разрушение детали. Для того чтобы расширить возможности контроля технического состояния цилиндров дизеля, трубопроводов необходимо использование оптических средств. К ним относятся эндоскопы, перископические дефектоскопы. Но наибольшее распространение получают жесткие и гибкие эндоскопы.

Визуальная энтроскопия позволяет обнаружить дефекты на внутренних поверхностях объекта. Энтроскопы (видеобороскопы) для внутреннего обследования труднодоступных мест объекта включают в себя зонд из стекловолокна, с помощью которого исследователь может проникать внутрь объекта, и экран визуального наблюдения поверхности, а также могут производить видеозапись исследуемой поверхности объекта. Применение оптических квантовых генераторов (лазеров) позволяет расширить границы

традиционных оптических методов контроля и создать принципиально новые методы оптического контроля: голографические, акустооптические.

Для фиксации результата осмотра или вывода изображения на экран монитора необходимы видеокамеры или цифровые фотоаппараты. Освещение рабочего поля при осмотре осуществляется как от стационарных сетевых осветителей, так и от переносных осветителей с автономным (аккумуляторным) источником питания.

Использование технических эндоскопов для осмотра визуально недоступных частей оборудования позволяет избежать лишней разборки и замены узлов и деталей, заранее определив те участки, где это необходимо.

Введя эндоскоп во внутреннее пространство оборудования в период кратковременных остановок, целенаправленно исследуют участки, на которых, как показал опыт эксплуатации, могут быть повреждения, определяют следы вследствие радиальных и осевых перекрытий зазоров, эрозийные явления, повреждения внутренних частей инородными телами, перекосы и неправильные установки деталей, наличие посторонних предметов. Выявленные дефекты могут быть зафиксированы, записаны или занесены в память компьютера.

При диагностировании двигателей или коробок передач необходимо провести подготовительные работы, связанные с частичной разборкой некоторых деталей. Так, например, при диагностировании камеры сгорания дизеля, днища поршня или гильзы цилиндра необходимо вывернуть форсунку, а в это отверстие ввести наконечник эндоскопа. При этом недопустимо загрязнение наконечника эндоскопа смазочными материалами или продуктами сгорания топлива. Информацию о техническом состоянии объекта, полученную с помощью эндоскопа, можно наблюдать визуально и фотографировать, что позволяет контролировать развитие возникших дефектов и прогнозировать предельно допустимое состояние объекта.

Применение эндоскопов позволяет получать такие результаты, которых не давали существующие методы. Технические эндоскопы дополняют функциональную диагностику, диагностику по данным спектрального анализа масла и другие методы и повышают глубину поиска неисправностей и достоверность диагностирования.

Наиболее эффективно комплексное применение эндоскопов с другими средствами диагностирования. Это не только повышает точность диагноза, но и существенно снижает затраты на ремонт вследствие устранения работ по разборке двигателя, сокращая время простоя в ремонте.

Оптический метод определения дымности отработавших газов. При оптическом методе мерой дымности отработавших газов служит ослабление светового потока, которым просвечиваются отработавшие газы.

Во время свободного ускорения часть отработавших газов из выпускного тракта автомобиля с помощью газообратного зонда и шланга вводится в измерительную камеру (дымомера). В измерительной камере свет проходит через отработавшие газы дизеля. Мерой дымности является число по чернения.

Для измерения дымности в основном используется два метода. При оптическом методе мерой дымности отработавших газов служит ослабление светового потока, которым просвечивают отработавшие газы. Ослабление света измеряется фотоэлектрически и отражается в процентах затемнения или как коэффициент поглощения.

По методу фильтрации (измерение отражения света) определенное количество отработавших газов пропускается через плоский фильтр. Почернение фильтра затем служит мерой содержания сажи в отработавших газах.

Точно фиксированная длина камеры измерения и защита оптических окон от сажи (воздушными завесами, то есть поперечной струей продувочного воздуха) – предпосылки высокой точности и хорошей воспроизводимости результатов измерений.

Измерение дымности дизеля рационально только при его работе под нагрузкой, так как лишь в этом рабочем диапазоне образуется существенное количество твердых частиц. Здесь также общеприняты два метода:

- измерение при полной нагрузке, например, на испытательном стенде с беговыми барабанами или на аттестованном испытательном участке, с использованием торможения автомобиля;

- измерение при свободном ускорении с определенным быстрым нажатием педали газа и нагрузкой от раскручивающегося маховика двигателя.

Результаты измерения дымности дизеля зависят как от метода измерения, так и от способа нагружения, и в общем виде не могут сравниваться непосредственно.

Оптическими лазерными методами можно измерять амплитуду смещения поверхности. В простейшем случае освещают точку контролируемой поверхности и наблюдают ее через измерительный микроскоп. Светящаяся точка при колебаниях преобразуется в линию, длина которой соответствует удвоенной амплитуде колебаний. При вибрации механизмов амплитуда обычно существенно уменьшается по мере повышения частоты. Поэтому описанный метод применим только на низких частотах до 400-500 Гц. На более высоких частотах и для обеспечения большей точности применяют интерференционные методы и используют когерентные источники излучения (лазеры). В настоящее время выпускается ряд лазерных виброанализаторов. Недостатком применения оптических методов в эксплуатации объектов диагностирования являются высокие требования к условиям проведения измерений.

Оптический метод контроля качества масла. Одним из показателей, характеризующих качество работающего масла, является светопрозрачность. По мере работы двигателя масло загрязняется механическими и нерастворимыми примесями. В результате этого светопрозрачность снижается, и в определенный момент она может достигнуть предельного значения.

Для контроля качества масла разработаны приборы, в которых капля масла, взятая масляным шупом из картера двигателя, помещается между стеклами, которые вставляются в специальную обойму, где она сжимается

четырьмя пружинами до фиксаторов, обеспечивающих постоянную толщину масляного слоя между стеклами.

Прозвучиваемость лучами источника освещения определяется фотоэлементом (где возникает ЭДС) и фиксируется регистрирующим устройством. По результатам показаний в условных единицах оценивают ресурс функциональных свойств масла.

Контрольные вопросы

1. На чем основаны тепловые методы контроля исправности узлов трения?
2. Какие применяют методы для контроля температуры?
3. Привести примеры использования тепловизионной аппаратуры для распознавания технического состояния объекта диагностирования.
4. Какие неисправности можно обнаружить с помощью оптических методов?
5. Привести примеры использования эндоскопов для контроля двигателей?
6. На чем основан оптический метод определения дымности отработавших газов?
7. Как контролируют качество масла оптическим методом?

3.8. Методы контроля износа трущихся деталей и смазочной способности масел

3.8.1. Методы контроля изнашивания деталей и критерии оценки технического состояния двигателей

3.8.1.1. Классификация методов контроля изнашивания деталей

В процессе работы двигателя происходит износ узлов с трением или в местах сопряжения деталей. Пары трения ЦПГ, КШМ, ГРМ являются элементами сложной механической системы двигателя, техническое состояние которых определяет его технико-экономические показатели. Поэтому знание характеристик изношенного сопряжения всего двигателя до предельного значения для каждой пары трения является первостепенной важностью. Основные факторы, влияющие на интенсивность изнашивания пар трения двигателя приведены на рис. 3.21.

В зависимости от ведущего процесса разрушения поверхности все виды изнашивания можно разделить на три основные группы:

- механическое изнашивание, которое происходит, главным образом, в результате механического взаимодействия материалов пары;
- молекулярно-механическое изнашивание, сопровождаемое воздействием молекулярных или атомарных сил;
- коррозионно-механическое изнашивание, которое происходит при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой.

Для оценки износового состояния деталей механических систем находят применение различные методы контроля. Наиболее распространенными из них являются:

- визуальный контроль;
- микрометрирование;
- профилографирование;

- взвешивание, метод искусственных баз;
- по изменению служебного свойства или сопряжения;
- виброакустический;
- тепловой контроль;
- методы химического, активационного, спектрального и других анализов содержания продуктов изнашивания в масле;
- метод радиоактивных изотопов;
- метод поверхностной активации.



Рис. 3.21. Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания сопряжений двигателя

В исследовательских целях используются практически все перечисленные методы. Для контроля износа в процессе эксплуатации из всех методов предпочтение отдается безразборным, а из безразборных – методам, не требующим какого-либо вмешательства в контролируемую систему.

Изменение структурных параметров сопряженных деталей в процессе эксплуатации определяют методами микрометрирования (ГОСТ 14846-81), взвешивания (ГОСТ 491-55), искусственных баз (ГОСТ 17534-72), спектрального анализа, радиоактивных изотопов, профилографирования и их разновидностями. Так, например, в практике микрометрирования размеров деталей помимо традиционных мерительных инструментов (микрометров) используются оптико-механические и электронные приборы с емкостными, индуктивными, пневматическими датчиками. Разработан и успешно используется метод «реплик», основанный на снятии до и после проведения испытаний или нескольких этапов испытания отпечатков с искусственных баз, нанесенных на шейки коленчатого вала через просверленные отверстия

в шатунных или коренных крышках подшипников, которые герметизируются резьбовыми пробками. Метод позволяет определить динамику изменения интенсивности изнашивания шеек коленчатого вала в процессе эксплуатации без разборки сопряжений КШМ.

В целом, диагностирование автомобилей происходит по двум основным направлениям: стационарное и встроенный бортовой контроль. Находит применение комбинированный способ диагностирования с помощью системы встроенных датчиков контрольных точек и встроенных в конструкцию автомобилей вторичных измерительных приборов.

В общем случае для диагностики изнашивания (трибодиагностики) может быть привлечен широкий круг различных методов анализа (табл. 3.3).

Большинство из указанных в табл. 3.3 методов являются лабораторными. В последние годы определилась тенденция вести диагностирование непрерывно, для чего двигатели оснащают средствами встроенного контроля, например, датчиками, контролирующими количество и размеры частиц износа, выделяемых из потока масла.

Таблица 3.3

Методы трибодиагностики

Методы анализа	Регистрируемые характеристики			
	Со- став час- тиц	Концен- трация частиц в среде	Фрак- цион- ный со- став	Загряз- нен- ность среды
Физические:				
Эмиссионная спектрофотометрия	+	+	-	-
Атомно-абсорбционная спектрометрия	+	+*	-	-
Атомно-флуоресцентная спектрофотометрия	+	+	-	-
ИК- и УФ- спектрометрия	-	-	-	+
Абсорбционная спектрофотометрия	-	+	-	+
Прямое фотометрирование	-	-	-	+
Электрооптический метод	-	+	-	-
Микроскопия	-	+	+	-
Светорассеивание	-	+	-	-
Поточная ультрамикроскопия	-	+	+	-
Феррография	+**	+	+	-
Магнитометрия	-	+***	-	-
Метод ядерного магнитного резонанса	-	+***	-	-
Нейтронно-активационный анализ	-	+	-	-
Акустический анализ	-	-	+	-
Физико-химические:				
Седиментометрия	-	+	+	-
Полярография	+	+	-	-
Плотнометрия	-	-	-	+

Примечание:

* - для частиц размером менее 10 мкм;

** - использование бихроматического микроскопа позволяет определить наличие окислов;

*** - концентрация ферромагнитных частиц.

На рис. 3.22 приведены схема и общий вид такого датчика, разработанного в Самарском аэрокосмическом университете под руководством проф. Логвинова Л. М.

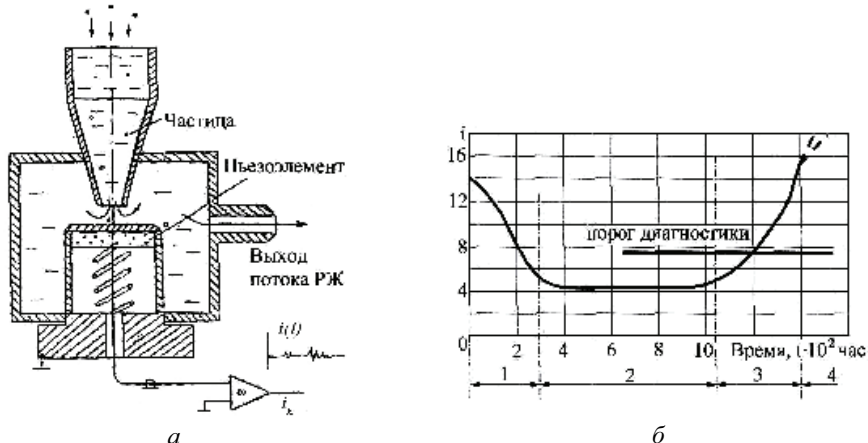


Рис. 3.22. Встроенная схема непрерывного диагностирования:

a – схема устройства пьезоэлектрического датчика (каждая частица пропорционально своей массе рождает импульс i_k ; *b* – характерные результаты диагностирования; 1 – зона приработки; 2 – зона установившегося режима изнашивания; 3 – переход к разрушению; 4 – критическая зона

Как видно из рис. 3.22, частицы в зависимости от своих размеров вызывают импульсы, генерируемые пьезоэлементом. В приборной части эти импульсы анализируются, учитываются и классифицируются по размерным группам. За интенсивность потока частиц принято $J = \varphi(m, n)$, где m, n – соответственно масса и число частиц.

Бортовые системы трибодиагностики рекомендуются как одна из составляющих внедрения комплексной системы диагностирования сложных агрегатов дизелей пассажирских автобусов и др., что позволяет применять прогрессивную систему эксплуатации оборудования по фактическому состоянию.

Приборная часть системы трибодиагностики представляет собой совокупность устройств, позволяющих по результатам дисперсионного анализа частиц износа в потоке масла оценивать все этапы жизни узлов трения, начиная от зарождения и развития неисправностей до наступления аварийно опасных ситуаций.

При исследовании зависимостей параметров технического состояния от наработки проводят стендовые (лабораторные) или эксплуатационные испытания натуральных двигателей и агрегатов машины с регистрацией износа и диагностических показателей через определенные промежутки времени или пробега. Поскольку точность подобных испытаний зависит не только от метрологических характеристик средств измерений, но и от уровня стабильности условий эксплуатации, число наблюдаемых объектов не должно быть менее 20-30.

Для сокращения времени используются укоренные виды испытаний. Этой же цели можно достичь при параллельном испытании нескольких однотипных двигателей с разными размерами (зазорами) сопряженных деталей, полученных механической обработкой трущихся поверхностей, или на одном, но с заранее спланированным введением контролируемых неисправностей.

При анализе долговечности деталей двигателей наиболее распространенным методом оценки рассеивания величин износа одноименных элементов и их ресурса является статистический анализ распределения исследуемых величин, представленных в виде полинома или гистограмм. Обычно их характеризуют параметрами нормального закона распределения.

Для уменьшения износа и удаления продуктов износа применяют различные масла и смазочные материалы. О состоянии узлов и деталей можно судить по концентрации продуктов износа, используя физико-химический анализ масел и смазочных материалов: чем больше в них концентрация продуктов износа, тем сильнее происходят износ деталей в узлах. Отбирая пробы масел через определенный промежуток времени и используя методы математической статистики, можно определить скорость накопления в смазочном материале продуктов износа, а по ним судить об износе деталей. Применяя математический метод экстраполяции, можно построить кривую износа, прогнозируя при этом момент предельного состояния деталей.

Известно несколько методов количественного определения продуктов износа в масле (смазочном материале). Наибольшее распространение получили следующие: калориметрический, полярографический, магнитоиндуктивный, радиоактивный, спектрографический, рентгенографический, атомно-абсорбционный, фотометрический. В основе всех методов количественного спектрального анализа масел лежит зависимость между интенсивностью спектральной линии излучения того или иного элемента и концентрацией этого элемента в анализируемой пробе [30, 31].

3.8.1.2. Критерии оценки технического состояния автомобильных двигателей

Предельный износ сопряжения определяется на основании следующих положений:

1. Износ сопряжения может привести к потере работоспособности самой кинематической пары.
2. Износ сопряжения лимитируется влиянием последствий изнашивания на работоспособность других систем и механизмов.
3. Износ сопряжения влияет на изменение выходных параметров двигателя (машины).

Эти три условия являются критериями для выбора предельно допустимого износа сопряжения пар трения.

Снижение и потеря работоспособности узлов, агрегатов двигателя и машины в целом может быть вызвано многими неисправностями, изменениями регулировочных размеров и предельными величинами износов. В

практике технической эксплуатации автомобильных двигателей в большинстве случаев протекают вероятностные процессы. Поэтому для определения предельных величин износов многих деталей и узлов машин руководствуются следующими критериями: техническими, функциональными, технико-экономическими и технологическими.

Технические критерии характеризуют предельное состояние составных частей, когда они не могут больше выполнять свои функции по техническим причинам (например, предельное увеличение шага цепи приводит к ее проскальзыванию на звездочках и спаданию) или когда дальнейшая эксплуатация объекта диагностирования с составными частями, достигшими предельного состояния, приводит к аварийному отказу (например, работа при предельном давлении масла в магистрали приводит к выходу дизеля из строя).

К техническим критериям относятся: срок службы элемента до предельного состояния, уровень безотказной работы, коэффициент технической готовности, информативность, точность, контролепригодность.

Согласно техническому критерию, предельным значением измерителя износа является то значение, которому соответствует:

- начало резкого возрастания интенсивности износа и вибрации;
- снижение значения функциональных параметров, что нарушает работоспособность систем (например, топливной или охлаждения);
- предельно допустимое снижение прочности изнашивающейся детали вследствие изменения ее размеров;
- выходящее за пределы допустимого влияние износа рабочего органа или детали соединения на работоспособность других деталей;
- самовыключение механизма из работы.

Изнашивание сопряженных деталей двигателя автомобиля зависит от продолжительности его работы, то есть от пробега.

На рис. 3.23 показана зависимость изменения зазора сопряженных деталей, в данном случае между шатунной шейкой коленчатого вала и вкладышами подшипника, от пробега автомобиля. На кривой зависимости имеются три области резкого изменения процесса изнашивания (от 0 до t_1 от t_1 до t_2 ; от t_2 до t_3). Это связано с тем, что в начальный период эксплуатации двигателя автомобиля происходит приработка деталей. В это время большое число микронеровностей поверхностей деталей как бы «сошлифовывается». При этом продукты изнашивания попадают в смазочный материал. Именно поэтому в период приработки предусмотрена замена масла через 3000-4000 км пробега автомобиля.

Затем наблюдается период от t_1 до t_2 нормальной работы (установившееся постоянное значение скорости изнашивания). В это время величина зазора находится в пределах допустимого. Износ увеличивается, но очень медленно. Причем износ сопряженных деталей может быть неодинаковым из-за использования различных материалов и других конструктивных особенностей. Например, вкладыши коренных и шатунных подшипников изготавливаются из более мягкого пористого материала и изнашиваются гораздо быстрее, чем шейки коленчатых валов. Поэтому для автомобилей второго

класса [14, 20] технического уровня проектирования вкладыши рекомендуется заменять через 70-80 тыс. км пробега автомобиля, что позволяет значительно продлить срок службы коленчатого вала.

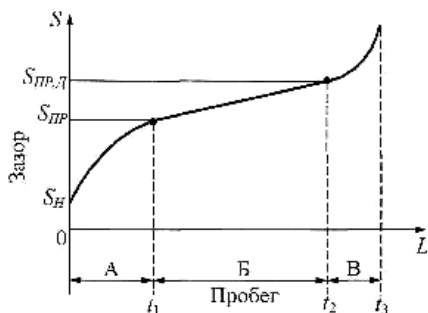


Рис. 3.23. Зависимость изменения зазора между шатунной шейкой коленчатого вала и вкладышами подшипника от пробега автомобиля:

А – зона приработки; Б – зона нормальной работы; В – зона прогрессирующего износа и аварийных поломок; S_H – нормальный (заводской) зазор, необходимый для образования масляного клина; $S_{ПР}$ – зазор в конце приработки; $S_{ПР.Д}$ – предельно допустимый зазор

износостойкость сопряженных деталей.

В отдельных случаях значительный износ может привести к нарушению кинематического взаимодействия деталей (например, КШМ, ГРМ), а в результате этого – к полному прекращению работы механизма.

Технический признак может привлекаться также для оценки допустимого изменения характера неподвижного соединения (прессовая посадка, шлицевое или шпоночное соединение) вследствие контактной коррозии, релаксации напряжений и макропластической деформации деталей. Здесь возникают трудности установления числовых характеристик показателей износа.

По техническому критерию форсированный износ элемента или соединения в конце его службы не всегда является единственным основанием для заключения о его непригодности к дальнейшей работе; выбраковка может быть произведена по другим соображениям, когда аварийной ситуации в связи с данным элементом или соединением еще нет. Это еще более проявляется при подходе к величине износа по функциональному критерию.

По функциональному критерию предельный износ соответствует предельному допустимому отклонению качества работы от нормы.

Основанием для функционального критерия служит изменение вследствие неисправностей и износа деталей качества функций, выполняемых узлом или машиной. Увеличение зазоров в рабочем сопряжении подвижного трения деталей насоса, компрессора, цилиндропоршневой группы, двигате-

Эксплуатация механизма или агрегата за пределами t_2 связана с постоянным ухудшением технического состояния и может привести к разрушению как отдельной детали, так и сопряженных с ней.

Увеличение коэффициента динамичности с ростом зазоров в шатунных подшипниках, появление ударов в реверсивной зубчатой передаче вследствие увеличения бокового зазора между зубьями, возникновение прогрессирующей концентрации нагрузки на зубья по их ширине из-за перекоса валов, вызванного износом подшипников, – таковы единичные примеры влияния износа одного соединения на прочность и

ля и топливной аппаратуры приводит не только к снижению производительности, но и к ненормальной работе системы смазки, количества подачи топлива, воздуха и т. п. Например, плунжерная пара выбраковывается при установившемся износе даже невысокой интенсивности, когда величина утечек превышает установленный предел или нарушается четкость отсечек жидкости.

По функциональным параметрам определяют мощность и крутящий момент двигателя, производительность топливного насоса, производительность насоса объемного гидропривода, частоту вращения коленчатого вала и т. п.

Технико-экономические критерии, характеризующие предельное состояние, указывают на снижение эффективности использования объекта диагностирования вследствие изменения технического состояния. Например, с ухудшением состояния топливной аппаратуры снижается мощность дизеля и увеличивается удельный расход топлива, количество вредных веществ в отработавших газах и др.

По технико-экономическому критерию оценивается заданная вероятность работы узла, агрегата для минимума затрат на техническое обслуживание при обязательном сохранении в пределах допуска качественных и экономических показателей.

По экономическому критерию оптимальный срок службы двигателя машины определяется наименьшими затратами на единицу выработки продукции при сохранении качества в заданных пределах, минимизация суммарных приведенных затрат или суммарных удельных затрат на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт двигателя, межремонтный период наибольшая эксплуатационная производительность в целом машины.

Определение предельного износа механизмов двигателя по экономическому критерию состоит в следующем. Так как с увеличением срока службы амортизационные расходы на единицу продукции уменьшаются, а эксплуатационные затраты возрастают, то существует минимум суммарных затрат. Если построить в координатах «выработка-затраты в гривнах» графики амортизационных расходов на единицу продукции в зависимости от текущей выработки, эксплуатационных расходов и суммарных затрат, то значение минимальной ординаты последнего графика определяет предельный срок службы по экономическому критерию.

Если изношенные детали повторно используют после ремонта, то при экономическом анализе учитывают и расходы на ремонт, возрастающие при большой степени износа.

Экономический анализ является наиболее общим, но им можно руководствоваться лишь тогда, когда изменение того или иного измерителя износа или их совокупности заметно влияет на экономичность работы двигателя машины. В противном случае точность экономического анализа делается весьма проблематичной, и два других критерия в достаточно полной мере удовлетворяют требованиям экономичности. Технические и функциональные признаки являются основными в тех случаях, когда не нужно считаться с рентабельностью работы машины

Для одних двигателей машин критерий качества является основным, для многих других это признак, который важен только для рабочих органов и деталей механизмов управления. Он же служит основой для оценки износа с точки зрения техники безопасности. Технический критерий характерен для ресурсных деталей передач, механизмов преобразователей движения и многих других устройств.

Срок службы детали или узла определяется не только предельными износами в соответствии с тем или иным критерием, но и другими факторами, такими как усталость, контактная усталость, коррозия, отложения на деталях (например, поршнях), прогар клапанов и др. Ресурс коленчатого вала с центробежной очисткой масла в полостях лимитируется отложениями в кривошипных шейках и износом. Переборка узла форсунки подачи топлива редуционного клапана масляного насоса вызывается накоплением отложений. Коррозия является основной причиной выбраковки подшипников качения, расположенных в труднодоступных и плохо защищенных местах.

Для ряда двигателей машин (например, дорожных или сельскохозяйственных) при оценке предельных величин износа и диагностических параметров используется экономический или технологический критерий.

Контрольные вопросы

1. Какие основные методы контроля изнашивания деталей двигателя?
2. Привести примеры влияния отдельных видов изнашивания деталей на снижение технико-экономических показателей двигателя.
3. Какие эксплуатационные факторы влияют на интенсивность изнашивания деталей двигателя?
4. Какая необходима выборка объектов диагностирования при нестабильных условиях эксплуатации двигателя?
5. Какие технические критерии характеризуют предельное состояние составных частей двигателя?
6. Привести типовую зависимость изменения зазора подшипника скольжения коленчатого вала от пробега и охарактеризовать его влияние на работоспособность двигателя.
7. Привести примеры влияния функциональных параметров на качество работы двигателя.

3.8.2. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов двигателя на ресурс моторных масел

3.8.2.1. Критерии прогнозирования ресурса масел

Цель прогнозирования – предсказать значение остаточного ресурса моторного масла, применяемого в двигателе, установить зависимость ресурса от исходных данных и указать рациональные сроки замены масла.

Основой для прогнозирования остаточного ресурса масла служит информация, которую условно можно разделить на три части [32].

1. Данные диагностирования и анализа показателей качества масла. Диагностирование проводится при плановых профилактических воздейст-

виях. Для оценки значений показателей качества масел нужны диагностические приборы, системы обработки диагностической информации.

2. Данные о нагрузочно-скоростном режиме работы моторного масла транспортной машины при взаимодействии с внешней средой. Данные о режиме нагружения служат основным источником установления скорости поступления продуктов износа в масло на будущий период эксплуатации транспортной машины. Сопоставляя результаты скорости поступления продуктов изнашивания в масло и изменение показателей качества масла можно оценить остаточный ресурс применяемого масла.

3. Обобщение информации о скорости поступления продуктов износа в масло с оперативными данными диагностирования показателей качества масла и действующем нагрузочно-скоростном режиме работы силового агрегата позволяет оценить остаточный ресурс масла.

Внедрение контроля качества масла в практику диагностирования, несомненно, оказывает существенное влияние, во-первых, на повышение надежности двигателя, в том числе безопасности применения и, во-вторых, будет способствовать увеличению ресурса двигателя и ресурса моторного масла за счет снижения возможной преждевременной замены. Применение объективного контроля без демонтажа и разборки объекта облегчает переход от эксплуатации двигателя по выработке ресурса к более перспективной эксплуатации по состоянию.

Установлено [32], что на момент замены масел в силовых агрегатах транспортных машин у 25-30% необходима замена, 15-20% замену необходимо провести раньше установленного срока и 50-50% сохраняют свою работоспособность и пригодны к дальнейшей эксплуатации.

Производители транспортных машин, после ввода машины в эксплуатацию, обязательно указывают режимы эксплуатации в период обкатки, а в карте сервисного обслуживания – периодичность технического обслуживания и замену масла в двигателе на период гарантийного обслуживания.

Диагностирование моторного масла при замене после обкатки дает возможность получить объективную информацию о процессе изменения основных показателей качества масла, интенсивности изнашивания сопряжений силового агрегата и работе его систем в дальнейшей эксплуатации. Производители автомобилей дают свои рекомендации по нагрузочно-скоростному режиму движения в начальный период эксплуатации двигателя автомобиля и устанавливают предельные скорости (80-90 км/ч), которые не рекомендуется превышать на указанном интервале пробега.

Но случайный разброс значений диагностических параметров износа деталей (рис. 3.18, 3.19) может привести к снижению достоверности прогноза остаточного ресурса масла (своевременной замены масла). Уменьшение разброса значений диагностических параметров достигается постоянным измерением структурных параметров.

3.8.2.2. Факторы, влияющие на скорость и зависимость изнашивания трущихся деталей

Определение количества продуктов износа в масле является комплексным параметром технического состояния двигателя и не всегда позволяет оценить скорость изнашивания его отдельных элементов (рис. 3.18, 3.19). Так, при сохранении смазывающей способности масла износ отдельных элементов ЦПГ, КШМ, ГРМ и др. может быть предельным.

Для прогнозирования замены масла необходимо знать закономерности изнашивания и потери маслом смазывающей способности в условиях загрязнения его продуктами износа, сгорания топлива и атмосферной пылью.

Если за основу изменения диагностического параметра зазора между шатунной шейкой коленчатого вала и вкладышем подшипника принять известную зависимость, приведенную на рис. 3.23, тогда скорость поступления продуктов износа в масло на участке Б можно принять близкой к линейной. Первая замена масла должна проводиться после окончания приработки (участок А). Дальнейшая периодичность замены масла на участке Б определяется прежде всего качеством масла и условиями эксплуатации. Влияние условий эксплуатации на скорость изнашивания и ресурс масла можно оценить по расходу топлива. Так, скорость поступления железа в моторное масло после обкатки силовых агрегатов транспортных машин изменяется в пределах 0,28-0,75 мг/л израсходованного топлива. При дальнейшей нормальной эксплуатации (участок Б на рис. 3.23) наблюдается снижение скорости поступления продуктов износа в масло и находится в пределах 0,04-2,1 мг/л израсходованного топлива [32].

На нестабильность процессов изнашивания детали одного двигателя и между двигателями разных машин могут оказывать неисправности систем питания, зажигания, неравномерности индикаторного давления в цилиндрах и скорости нарастания давления по цилиндрам, вызванными неэффективным процессом сгорания топлива в связи с ранними или поздними углами опережения начала подачи топлива, неудовлетворительным качеством его распыления или нарушенной герметичностью камер сгорания, неодинакового количества впрыскиваемого топлива из-за загрязнения отверстий форсунок и разных длительностей подачи топлива форсункой и др. Эти неисправности могут приводить к форсированному износу элементов ЦПГ, КШМ, ГРМ.

На интенсивность, неравномерность, скорость и характер изнашивания (рис. 3.19) оказывает влияние комплексное нарушение регулировочных параметров и функционирования систем управления рабочими процессами. При этом надо обратить внимание на то, что приведенные зависимости изнашивания получены для двигателей с электромеханическими системами управления. В конструкциях двигателей с микропроцессорным управлением топливной системой работа двигателя обеспечивается «мягкой», «безударной», поскольку рассогласования в системе подачи и сгорания топлива по сравнению с механической системой управления топливной системой значительно снижаются. Это подтверждается результатами анализа отобран-

ных проб моторного масла, слитого после периода обкатки автомобилей с пробегом, рекомендуемым заводом-изготовителем (2,5 тыс. км для автомобилей Hyundai, Toyota Land Cruiser, 5 тыс. км для автомобилей Mitsubishi Lancer, Šcoda Octavia) и выполненных расчетов скорости поступления продуктов изнашивания представлены в табл. 3.4 [32].

Анализ значений скорости поступления железа в моторное масло (табл. 3.4) показывает, что минимальное значение 0,34 мг/л топлива в двигателе автомобиля Mitsubishi Lancer, а максимальное 0,75 мг/л в двигателе автомобиля Toyota Land Cruiser, что свидетельствует о более совершенной конструкции первого двигателя по сравнению со вторым.

Дальнейшая эксплуатация автомобилей (моторных масел) при очередной замене показала снижение скорости поступления продуктов изнашивания (железа) в моторное масло – Hyundai Accent – 0,25 мг/л топлива и Mitsubishi Lancer – 0,1 мг/л топлива, - что свидетельствует о достаточно хорошей приработке деталей и нормальной эксплуатации двигателей. Результаты анализа моторных масел приведены в табл. 3.5.

Суммарная допустимая концентрация продуктов износа в масле для дизельных двигателей 30-150, бензиновых – 150-600 г/т [32]. На рис. 3.24 показано изменение срока службы масла в двигателе в зависимости от скорости автомобиля, среднего эффективного давления и выбранной передачи. Наибольший срок службы моторного масла наблюдается при движении на прямой передаче с использованием делителя коробки передач со скоростью 50-70 км/ч.

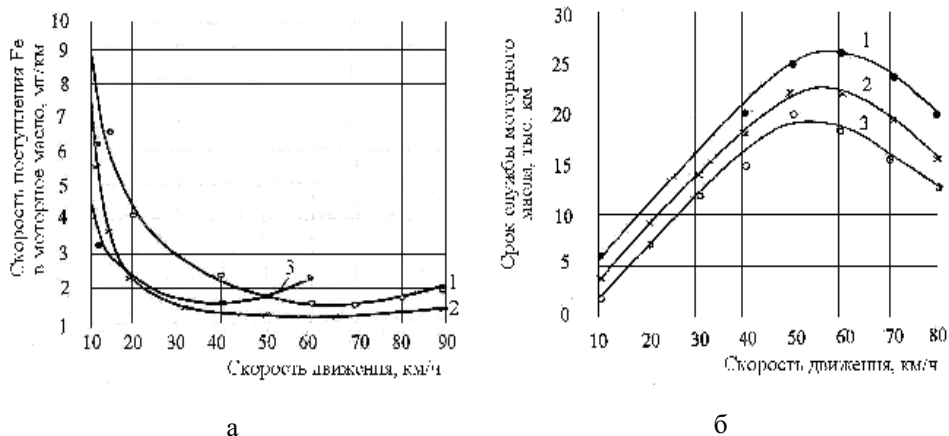


Рис. 3.24. Изменение скорости поступления Fe в моторное масло (а) и изменение срока службы моторного масла (б) от скорости движения автомобиля:

а: 1 – масло М-8В (ЗИЛ-431410); 2 – масло М-10Г₂К (КамАЗ-5320); 3 – масло М-8В (ГАЗ-3307);

б: 1 – масло М-10Г₂К (КамАЗ-5320); 2 – масло М-8В (ЗИЛ-431410); 3 – масло М-8В (ГАЗ-3307)

**Значения скорости поступления продуктов изнашивания
в моторное масло при обкатке легковых автомобилей**

Наименование показателей		В двигатели автомобилей залито масло завода-изготовителя				
Марка автомобиля		Hyundai Accent	Šcoda Octavia	Hyundai I-30	Toyota Land Cruiser	Mitsubishi Lancer
Пробег автомобиля, км		2685	5150	2510	2498	5915
Срок службы масла, км		2685	5150	2510	2498	5915
Концентрация Fe, г/т		27	67	31	48	52
Скорость поступления железа в масло	мг/км	0,03	0,059	0,037	0,12	0,024
	мг/л	0,48	0,65	0,47	0,75	0,34
алюминия	мг/км	0,007	0,92	0,008	0,024	0,006
	мг/л	0,1	0,22	0,11	0,15	0,08
меди	мг/км	0,011	0,045	0,047	0,05	0,008
	мг/л	0,17	0,5	0,59	0,3	0,12
свинца	мг/км	0,002	0,009	0,006	0,007	0,002
	мг/л	0,025	0,097	0,069	0,042	0,03

Таблица 3.5

**Результаты анализа моторного масла и скорости поступления
продуктов изнашивания при эксплуатации легковых автомобилей**

Наименование показателей	Shell Helix SAE 5W-40 API SJ/CF	Shell Helix SAE 5W-40 API SJ/CF	Shell Helix SAE 5W-40 API SM/CF	Castrol SAE 5W-30 API SL/CF	Mobil 1 SAE 0W-40 API SM, SL/SF
Марка автомобиля	Hyundai Accent	Hyundai Accent	Hyundai I-30	Hyundai I-30	Mitsubishi Lancer
Пробег автомобиля, км	13600	20400	13166	25162	25780
Срок службы масла, км	10915	6800	10656	9662	10006
Щелочное число, мг КОН/г масла	1,91	4	2,9	2,5	2,7
Кислотное число, мг КОН/г масла	2,86	5,1	2,4	3,1	2,3

Наименование показателей		Shell Helix SAE 5W-40 API SJ/CF	Shell Helix SAE 5W-40 API SJ/CF	Shell Helix SAE 5W-40 API SM/CF	Castrol SAE 5W-30 API SL/CF	Mobil 1 SAE 0W-40 API SM, SL/SF
Марка автомобиля		Hyundai Accent	Hyundai Accent	Hyundai I-30	Hyundai I-30	Mitsubishi Lancer
Концентрация Fe, г/т		71	67	121	138	23
Скорость поступления железа в масло	мг/км	0,018	0,029	0,034	0,043	0,01
	мг/л	0,25	0,42	0,43	0,54	0,1

Результаты значений скорости поступления продуктов изнашивания (железа) в моторное масло различных автомобилей и автобусов на момент замены приведены в табл. 3.6 [32].

Срок службы масла в двигателе изменяется в зависимости от скорости движения и веса автомобиля в 1,2-3 раза [32].

Таким образом, скорость поступления продуктов износа в моторное масло служит показателем технического уровня проектирования механических и электронных систем управления (табл. 6.3), технологии изготовления, эксплуатации и качества применяемых масел. Наибольшее влияние на изменение ресурса моторных масел оказывают скоростные и нагрузочные режимы работы двигателя.

Таблица 3.6

**Скорости поступления продуктов изнашивания (железа)
в моторное масло при эксплуатации автомобилей и автобусов**

Марка автомобиля, автобуса	Марка моторного масла	Объем системы смазки двигателя, л	Скорость поступления железа в моторное масло, мг/км	Скорость поступления железа в моторное масло, мг/л топлива
ЗАЗ-1102	M-5 ₃ /10Г ₁	3,45	0,053	0,66
ЗАЗ-110307-42	ХАДО Atomic oil SAE 10W-40 API SL/CI-4	3,45	0,12	1,51
Москвич-2140	AVIA MULTI HDC EXTRA SAE 15W-40 API CF-4/SG	5,2	0,035	0,32
Москвич-412	Super Motor Oil SAE 20W-50 API SJ	5,2	0,16	1,47
ВАЗ-2101	Азмол Турбо 1 SAE 15W-40 API SG/CF-4	3,75	0,13	1,5

Продолжение табл. 3.6

Марка автомобиля, автобуса	Марка моторного масла	Объем системы смазки двигателя, л	Скорость поступления железа в моторное масло, мг/км	Скорость поступления железа в моторное масло, мг/л топлива
ВАЗ-2107 (на газе)	AVIA Turbo CFE SAE 15W-40 API SJ/CF	3,75	0,047	-
ВАЗ-2109	Mobil SAE 10W-30 API SG/CC	3,5	0,045	0,5
ВАЗ-2115	Pure Syntet SAE 5W-40 FPI SJ/CF	3,5	0,11	0,99
ВАЗ-21104	Galaxis Extra 2 SAE 10W-40 API SL/CF/EC	3,5	0,022	0,31
ВАЗ-21124	Castrol Magnatec SAE 5W-40 API SM/CF	3,5	0,014	0,17
ГАЗ-24	AVIA MULTI HDC SAE 15W-40 API CF-4/SG	6	0,15	1,27
ГАЗ-3302	ХАДО Atomic oil SAE 15W-40 API SL/CI-4	6	0,11	0,58
ГАЗ-31105	ОПТИМАЛ Классик SAE 10W-40 API SG/CF-4	6	0,16	1,6
Hyundai Pony	Castrol Magnatec SAE 10W-40 API SJ/CF	3,3	0,044	0,63
Hyundai Getz	Shell Helix SAE 5W-30 API SL/CF	3,3	0,01	0,12
Hyundai I-30	Shell Helix SAE 5W-30 API SM/CF	3,3	0,034	0,43
Hyundai Accent	Shell Helix SAE 5W-30 API SM/CF	3,3	0,03	0,48
Toyota Land Cruiser	Shell Helix SAE 10W-40 API SM/CF	7,4	0,12	0,75
BMW-520	Castrol TXT SAE 5W-40 API SJ/CF	4,25	0,023	0,21
Renault 25	Elf TXI SPORT SAE 15W-40 API SL/CF	6	0,19	2,1
ПАЗ-4234	M-10ДМ	15	0,093	0,37
Богдан-А091	Essolube XT-3 SAE 15W-40 API CF-4/SG	10,5	0,076	0,39

Марка автомобиля, автобуса	Марка моторного масла	Объем системы смазки двигателя, л	Скорость поступления железа в моторное масло, мг/км	Скорость поступления железа в моторное масло, мг/л топлива
Икарус-256	Shell Rimula TX SAE 15W-40 API CF-4/SG	22	0,12	0,41
VANHOLL	Shell Rimula TX SAE 15W-40 API CF-4/SG	25	0,068	0,27
КамАЗ-5320	М-10Г ₂ К	26	0,054	0,17
КамАЗ-5410	М-10Г ₂ К	26	0,048	0,1
КамАЗ-55102	М-10Г ₂ К	26	0,079	0,12
ЗИЛ-431410	М-8В	8,5	0,089	0,23
Renault Magnum	ХАДО Atomic oil SAE 10W-40 API SL/CI-4	34	0,029	0,08
Komatsu HD 1200	Mobil Delvac MX 15W-40 API CI-4/SL	135	0,29	0,043
БелАЗ-75121	Крол Альфа SAE 10W-40 API CF-4/SH	260	0,91	0,15

Существенное влияние на интенсивность, скорость и характер изнашивания оказывает качество производства, микрогеометрические отклонения формы деталей (овальности, конусности и т. п.) и междоосевых расстояний шеек коленчатого и распределительного валов, элементов ЦПГ, КШМ, ГРМ, зубчатых передач, а также качество ТО, состояние фильтров, качество топлива, условия эксплуатации, характер вождения автомобиля. Кроме того, снижению смазочных способностей масел способствуют загрязнения при транспортировке и хранении, загрязнение атмосферной пылью, газообразными, жидкими и твердыми продуктами сгорания топлива, включая сажу. Количество сажи, попадающее в масло, например, в двигателе типа ЯМЗ-238 за 200 часов работы может составлять от 60 до 600 г. Чем хуже техническое состояние двигателя, тем больше сажи содержится в отработавших газах и тем больше попадает ее в масло. Фильтрующие элементы, вентиляция картера замедляют, но не предотвращают старение масла. Часть масла, попадающего в камеру сгорания двигателя и подвергающегося воздействию высоких температур, образует зольные отложения. Это ухудшает отведение тепла от деталей и ведет к еще более интенсивному их нагреванию и увеличению изнашивания.

3.8.2.3. Факторы, влияющие на периодичность замены масла

Все факторы, оказывающие влияние на старение и периодичность замены масла в агрегатах автомобиля, можно разбить на четыре основные группы:

- условия работы масла двигателя: нагрузочно-скоростные и кинематические режимы работы двигателя, коробки передач, температура смазываемых деталей, расход масла на угар, полнота сгорания топлива, степень очистки воздуха и т. п.;

- качество масла, к которому предъявляются комплексные требования: противокоррозионные, вязкостно-температурные, антиокислительные, моющие-диспергирующие и другие эксплуатационные свойства;

- характеристика системы смазки: количество масла в двигателе, эффективность работы системы подачи и очистки масла (масляного насоса, масляного фильтра, центрифуги, принцип подключения их в системе смазки - последовательное или параллельное);

- внешние условия: исходное техническое состояние двигателя, условия эксплуатации и использования транспортной машины, квалификация водителя и т. п.

При эксплуатации автомобиля на коротких расстояниях возможны частые пуски и остановки двигателя, продолжительная работа на холостом ходу, отрицательно влияющие на тепловой режим двигателя. Условия работы масел при этом могут быть не менее жесткими, чем на высокотемпературном режиме, когда ухудшается процесс сгорания топлива, увеличивается попадание в картер углистых частиц. При работе двигателей на форсированном нагрузочном и температурном режимах попадание воды в масло увеличивает до 5 раз вероятность задиров деталей ЦПГ, и в 1,4-1,6 раза износ вкладышей подшипников коленчатого вала [32].

Поэтому учесть влияние на ресурс моторного масла всех факторов весьма сложно, и разброс ресурса масла сохраняется даже в том случае, если условия эксплуатации будут одинаковыми. Замена моторного масла по фактическому состоянию на основании результатов индивидуальной диагностики и прогнозирования его остаточного ресурса – один из наиболее эффективных способов использования дополнительных резервов обеспечения надежной работы двигателя даже в условиях фактического разброса ресурса масла по парам трения.

Увеличение ресурса моторных требует увеличения текущих затрат на рост периодичности диагностирования показателей качества масла. Планирование сокращения ресурса масла двигателя с его заменой при техническом обслуживании может оказаться с экономической точки зрения более целесообразным, чем увеличение срока использования применяемого масла с сопутствующим снижением ресурса самого силового агрегата. С другой стороны, преждевременная смена масла экономически нецелесообразна, так как увеличивается его расход, увеличиваются затраты на стоимость технического обслуживания, простой автомобиля на замену масла. Необоснованное увеличение сроков службы масел приводит к повышенному износу де-

талей двигателя автомобиля, что снижает его надежность. Поэтому в практике технической эксплуатации автомобилей выработаны браковочные показатели качества масла, не требующие больших затрат.

3.8.2.4. Браковочные показатели качества масла

При нормальном техническом состоянии и нормальной эксплуатации двигателя главным фактором, определяющим протекание процесса старения масла, является нагрузочно-скоростной режим. Он обуславливает температуру на поверхности трения, в результате чего ускоряются процессы старения масла, что приводит к интенсивному образованию нагаров и лаков, росту коррозионного износа поверхностей. При граничном режиме трения в этих условиях возможны нарушения целостности адсорбционной масляной пленки и задиры деталей ЦПГ, КШМ, ГРМ.

В руководствах по эксплуатации транспортных машин указываются сроки службы масел до замены либо в километрах пробега (автомобильные, тепловозные и другие двигатели транспортных машин), либо в машино-часах или моточасах (двигатели тракторов, строительных, дорожных машин). Обычно для автомобильных двигателей срок службы масел находится в пределах 10-40 тыс. км пробега, тепловозных дизелей – 100 тыс. км, двигателей тракторов, строительных, дорожных машин – 240-480 моточасов [32].

Приведенные в инструкциях данные по периодичности замены масел справедливы при нормальных условиях эксплуатации и при исправном техническом состоянии двигателя и машины. При легких условиях эксплуатации двигателей, работающих на малосернистом топливе, скорость старения моторных масел уменьшается и сроки службы их могут быть продлены. При тяжелых условиях эксплуатации и использовании высокосернистых топлив процесс старения интенсифицируется, что резко снижает сроки службы масел до замены. Использование двигателей после текущего и капитального ремонта повышает процессы старения масел и приводит к необходимости их замены в сроки, не укладывающиеся в нормативные. Поэтому целесообразность замены масел на свежие следует определять не по пробегу или часам наработки, а по фактическому состоянию качества масла, что позволит снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт машин, а также более экономно расходовать дорогостоящие масла.

В настоящее время еще нет стандартизованных значений показателей предельного состояния работавших масел, по которым можно определить необходимость своевременной замены масла. Существуют лишь некоторые усредненные показатели предельного состояния масел различного назначения, которые можно использовать в эксплуатации, как ориентировочные, так как эти показатели в какой-то мере обобщают опыт применения масел в различных условиях.

Осуществление постоянного контроля качества масла путем проведения физико-химического анализа его проб связано со значительными трудностями, обусловленными необходимостью иметь специальные химические

лаборатории, постоянный штат сотрудников, соответствующее оборудование, реактивы и т. п. Кроме того, выполнение каждого из видов анализа занимает значительное время, что не всегда приемлемо, особенно для мобильных, землеройно-транспортных, путевых и других машин, которые в ожидании результатов анализа вынуждены простаивать. Поэтому необходим интегральный браковочный параметр масла, который характеризовал бы его состояние в целом и определение, которого не занимало бы много времени.

В табл. 3.7 приведены рекомендации, когда необходимо производить замену масла. использование этих рекомендаций связано с выбором критических параметров состояния масла, налаживанием своевременного отбора проб и инструментального контроля их состояния.

При использовании перечисленных показателей (табл. 3.7) [32] рекомендуется вести непрерывный учет их по пробегу, причем по всем одновременно (включая общее кислотное и щелочное число) и для группы автомобилей. Резкое изменение одного из параметров и приближение его к критической отметке свидетельствует о необходимости замены масла. Характерно, что для различных двигателей и условий работы критическими оказываются различные показатели качества работавших масел.

Таблица 3.7

Браковочные показатели работавших масел

Показатели	Значения показателей	
	бензиновых двигателей	дизельных двигателей
Изменение вязкости, %: - прирост - снижение	25 20	35 20
Содержание примесей, нерастворимых в бензине, %, не более	1,0	3,0
Щелочное число, мг КОН/г, не менее	0,5-2,0	1,0-3,0
Снижение температуры вспышки, °С, не более	20	20
Содержание воды, %, не более	0,5	0,3
Содержание топлива, %, не более	0,8	0,8
Диспергирующие свойства по методу: - лабораторных центрифуг, А/Б не менее (А-Б)/А не менее; - масляного пятна, усл. ед., не менее	2 0,7 0,3-0,35	2 0,7 0,3-0,35
Стабильность по индукционному периоду осадкообразования в приборе ДК-НАМИ, ч	3-5	7-10

В табл. 3.8 приведены значения физико-химических показателей работавших моторных масел, при достижении которых необходима замена масла. Эти значения установлены для четырехтактных дизелей фирм Detroit Diesel, Caterpillar, Cummings [32].

Значения физико-химических показателей работавших моторных масел, при достижении которых необходима замена масла

Показатели	Detroit Diesel	Caterpillar	Cummings
Вязкость при 100 °С, мм ² /с	-	±3	±4
Вязкость при 40 °С, мм ² /с:			
- увеличение, %, макс.;	40	-	-
- снижение, %, макс.	15	-	-
Разбавление топливом, %, макс.	2,5	4,0	5,0
Температура вспышки, °С, мин	Снижение на 20 °С, макс.	204	-
Содержание воды, %, макс.	0,3	0,5	0,2
Нерастворимые включения, растворитель-пентан, % мас.	1,0	-	-
Сажа, термогравиметрия, % мас., макс.	1,5	-	1,5
Содержание металлов, ppm, млн ⁻¹ , макс.:			
- железо	150	100	-
- хром	-	25	-
- свинец	-	40	-
- медь	30	50	-
- олово	-	25	-
- алюминий	-	20	-
- кремний	-	20	15
- бор	-	20	25
- натрий	-	75	20
- калий	-	-	20

Некоторые фирмы для определения срока службы масла рекомендуют ориентироваться на удельный расход топлива. Чем выше расход топлива на единицу пробега, тем «жестче» условия эксплуатации и, соответственно, меньше пробег до замены масла.

Предельные значения элементов-индикаторов продуктов изнашивания для отработавших дизельных масел, для масел бензиновых двигателей (табл. 3.9) имеют различные значения и носят рекомендательный характер. Приведенные значения не являются абсолютными и при принятии окончательного решения необходимо учитывать техническое состояние транспортной машины и силового агрегата, количество и вид выполненных ремонтов, наличие особых сплавов (из которых изготавливаются детали) и присадок в маслах, а также режимы и тип системы смазки.

Индивидуальное диагностирование состояния масел является основным условием прогнозирования остаточного ресурса и срока смены масла эффективной эксплуатации и технического обслуживания по фактическому состоянию. Достоверность прогноза остаточного ресурса масла в силовом агрегате определяется качеством диагностических методов и средств. Наиболее достоверными методами диагностики качества масел в целях оценки и прогнозирования срока смены и остаточного ресурса масла являются спектральный анализ продуктов изнашивания и присадок в маслах, а также

изменение физико-химических и электрофизических показателей качества масла. Степень изменения основных свойств и показателей качества масел характеризуется однозначными непрерывными функциями нагрузочно-скоростного режима, конструкции, технологии производства, эксплуатационных факторов и качества применяемого масла. Оперативное управление ресурсом двигателя машины при своевременном обнаружении увеличения скорости поступления продуктов износа на литр израсходованного топлива, ухудшения свойств работающего масла и определении диэлектрической проницаемости. Измерение относительной диэлектрической проницаемости моторных масел характеризуется высокой чувствительностью, объективностью и небольшой погрешностью измерений не превышающей 0,2%. Диэлектрическая проницаемость современных минеральных, полусинтетических и синтетических не работавших моторных масел зависит как от природы базового масла, так и от пакета вводимых присадок и может изменяться для моторных масел в пределах 2,3-2,6.

Таблица 3.9

Значения предельных концентраций продуктов изнашивания для отработавших моторных масел

Показатели	Бензиновые двигатели	Дизельные двигатели
Содержание металлов, ppm, млн ⁻¹ , макс.:		
- железо	600	100
- хром	50	25
- свинец	100	40
- медь	75	50
- олово	40	25
- алюминий	75	30
- никель	-	20
- сурьма	-	5
- марганец	-	5
- кремний	60	20
- бор	75	20
- натрий	100	75

3.8.2.5. Средства контроля качества масла

Более доступными являются экспресс-методы с использованием портативных средств анализа масел [30, 31, 32]. Наиболее известны портативные комплекты производства Украины (диагностический комплект ДКАМ) и России:

- портативный комплект Непогодьева (Главмосавтотранс), КДМП-3;
- переносные комплекты контроля качества бензинов, дизельного топлива и масел КИ-28085, КИ-28090, КИ-28105 (ГОСНИТИ);
- портативный индикатор ПЭК-М;
- экспресс-лаборатории ВИИТиН;

- лаборатории ЛАМА-5, ЛАМА-7 (НПП «Диполь»), ПЛАМ ЦНИИ МФ, ПЛ-2М, РЛ, ЭЛАН.

Для контроля качества нефтепродуктов используют стационарные лаборатории, оснащенные необходимым оборудованием, полевую лабораторию ПЛ-2М, ручную лабораторию РЛ и экспресс-лабораторию. Лаборатория ПЛ-2М позволяет проводить около двадцати видов анализов, ее развертывание занимает 1,5 часа, а свертывание 45 мин. Масса лаборатории составляет 111 кг. Ручная лаборатория позволяет проводить одиннадцать анализов, масса лаборатории 10 кг. Время развертывания ручной лаборатории и экспресс-лаборатории не превышает пяти минут; такое же время затрачивается на свертывание. Габаритные размеры лаборатории в миллиметрах: ПЛ-2М – 726×560×760; РЛ – 625×240×265; ЭЛАН – 500×300×200. Перечень анализов, выполняемых лабораториями ПЛ-2М, РЛ, ЭЛАН, приведен в табл. 3.10 [32].

Таблица 3.10

Перечень анализов, выполняемых с помощью лабораторий

Показатели	ПЛ-2М	РЛ	ЭЛАН
1. Плотность (определяется нефтенсиметром)	+/-	+/-	+/-
2. Содержание водорастворимых кислот и щелочей (ВРКЩ) (качественно)	+/-	+/-	+/-
3. Кислотное число (кислотность)	+/-	-/-	+/-
4. Температура застывания и помутнения	+/-	-/-	-/-
5. Кинематическая вязкость	+/-	+/-	+/-
6. Температура вспышки в открытом тигле	+/-	-/-	-/-
7. Содержание воды	+/+	+/+	+/+
8. Содержание механических примесей (качественно)	+/+	+/+	+/+
9. Температура каплепадения	-/+	-/-	-/-

Примечание:

1. «+» – анализ можно выполнить; «-» – анализ выполнить нельзя;
2. Числитель – жидкий смазочный материал; знаменатель – пластичная смазка.

В последние годы за рубежом для определения качества нефтепродуктов разработано ряд приборов фирмы KOMATSU (Япония); фирмы MTU (Германия); экспресс-лаборатория KITTIWAKE, Chevron Lubricants, анализатор качества Lubri Sensor (США).

Встречается много приборов и датчиков нового поколения, в основе принципа действия которых лежит измерение электрофизического параметра электропроводности или относительной диэлектрической проницаемости.

В табл. 3.11 приведены марки приборов используемых при определении качества нефтепродуктов, а также их технические характеристики.

Указанные приборы предназначены для определения качества масел в диагностических лабораториях и станциях технического обслуживания. Что же касается датчиков, то они устанавливаются непосредственно на автомобиле в маслопроводную систему или в ее переходник между датчиком дав-

ления масла и корпусом двигателя. В зависимости от назначения приборы и датчики бывают нескольких типов:

1. Влагомеры, предназначенные для измерения и контроля объемной доли влагосодержания в моторном масле. Принцип действия влагомеров основан на корреляционной зависимости влагосодержания от диэлектрической проницаемости испытуемых масел.

2. Анализаторы качества масла – более универсальные приборы по сравнению с влагомерами. Некоторые из анализаторов качества предназначены для определения влажности и степени загрязненности моторных масел (марки QLT80 и марки СВП 2.00.000 Shatox), другие могут применяться также и для их идентификации (марки Shatox SX-300 и марки АК-3).

3. Переносной прибор SKF Oilchek ТМЕН-1 замеряет степень загрязнения и электрохимические изменения моторных, трансмиссионных и других смазочных масел. Он определяет и измеряет диэлектрическую постоянную масла.

Таблица 3.11

Марки и технические характеристики влагомеров и анализаторов качества

Марка прибора	Страна производитель	Диапазон измерения ϵ , ед.	Погрешность измерения ϵ , не более ед.
Влагомеры			
ВАД-40М	Россия	1-80	0,003
ВТМ-2	Россия	1-80	0,003
Hydro Control	Англия	1-60	0,003
АК-4 (СИМ-4)	Россия	1-10	0,005
Анализаторы качества			
Октанометр SX-300	Германия	1-5	0,001
Shatox SX-200	Германия	1-5	0,001
Shatox SX-300	Германия	1-5	0,001
Датчик QLT80	Германия	1-5	0,001
АК-3 (СИМ-3)	Россия	1-10	0,005

Принцип действия анализаторов качества, определяющих степень загрязненности, основан на корреляционной зависимости между диэлектрической проницаемостью масла и степенью его загрязнения. Идентификация марки моторного масла происходит по принципу измерения его диэлектрической проницаемости с последующим сравнением с параметрами стандартных образцов масел.

Контрольные вопросы

1. Какая информация может быть использована для прогнозирования остаточного ресурса масла?

2. Какая существует типовая зависимость изменения скорости изнашивания подшипника скольжения коленчатого вала двигателя? Объяснить связь этой зависимости с ресурсом масла.

3. Как может влиять несовершенство или разрегулирование системы питания на ресурс масла?
4. Как может влиять качество топливной системы на ресурс масла (на примере электромеханической и электронной систем управления двигателем)?
5. Как влияет техническое состояние двигателя на образование сажи?
6. Какие факторы влияют на старение и периодичность замены масла?
7. Почему сроки периодичности замены масла влияют на текущие материальные и финансовые затраты?
8. Как устанавливают браковочные признаки качества масел?
9. Для каких условий эксплуатации устанавливаются нормы периодичности замены масла?
10. В чем заключаются недостатки определения сроков замены масла по показателям удельного расхода топлива?
11. Привести виды средств контроля качества масел при использовании лабораторных методов.
12. Какие существуют виды средств экспресс-контроля качества масел «ручными способами»?

3.8.3. Диагностирование износов деталей механизмов методами спектрального анализа смазочных масел

3.8.3.1. Область применения методов спектрального анализа масел

Сущность эмиссионного спектрального анализа описана во многих работах, например, [32]. Этот метод позволяет определить концентрацию практически всех элементов, которые используются в деталях двигателей, редукторов, коробок передач. Время анализа одной пробы на современных спектральных установках исчисляется всего несколькими минутами при реально достижимой чувствительности 10^{-4} - $10^{-5}\%$ и точности до 5%.

Масла, омывающие трущиеся детали, являются своего рода носителем технической информации об их техническом состоянии с точки зрения их износа.

Методы спектрального анализа масел позволяют выявлять неисправности деталей и прогнозировать в ряде случаев остаточный ресурс на ранней стадии. Объектами диагностирования износов по параметрам масел являются двигатели внутреннего сгорания, коробки передач, редукторы и подшипниковые узлы, омываемые маслом.

Теоретический анализ загрязнения картерного масла продуктами износа и удаления примесей системой фильтрации дает следующую зависимость изменения концентрации загрязнений K по времени t :

$$K = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{q_\phi - q_y}{Q} t\right) + \frac{q}{q_\phi - q_y} \left[1 - \exp\left(\frac{q_\phi - q_y}{Q} \cdot t\right)\right], \quad (3.4)$$

где K_0 – исходная концентрация примесей; q – интенсивность поступления продуктов износа в масло; q_ϕ – интенсивность удаления продуктов износа маслоочистителем; q_y – интенсивность убыли продуктов износа вследствие угара масла; Q – объем картерного масла двигателя.

Согласно выражению (3.4), независимо от исходной концентрации примесей K_0 и объема картерного масла Q содержание продуктов износа через 3 ± 1 час для автомобильных двигателей стабилизируется на уровне:

$$K = \frac{q}{q_{\phi} - q_y} . \quad (3.5)$$

В результате изнашивания цилиндров, шеек коленчатого вала, вкладышей, поршней, поршневых колец и бронзовых втулок двигателя в картерном масле содержатся продукты износа железа, олова, алюминия, хрома, меди и никеля. Кроме продуктов износа, в масло поступает кремний при нарушении фильтрации воздуха, поступающего в цилиндры двигателя (как правило, при нарушении герметичности впускного тракта).

Содержание указанных элементов в масле будет пропорционально скорости изнашивания сопряжений двигателя и коэффициенту пропуска пыли системой воздухоочистки. Поскольку интенсивность изнашивания зависит от скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя, то содержание продуктов износа в эксплуатации при удовлетворительной фильтрации воздуха и масла будет колебаться около некоторого значения, отражающего средний процесс изнашивания данного двигателя (рис. 3.25).

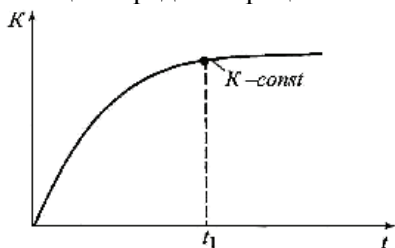


Рис. 3.25. Зависимость концентрации продуктов износа K в масле от продолжительности его работы в двигателе t :

t_1 – время начала стабилизации концентрации продуктов износа

При возникновении в двигателе неисправностей увеличивается скорость изнашивания его деталей и происходит увеличение концентрации продуктов износа в масле от их средних значений, характерных для исправного состояния двигателя.

Таким образом, по уровню концентрации можно выявить скрытые и прогнозируемые (назревающие) отказы. Для диагностического заключения результаты определения концентрации элементов сравнивают с предельными значениями элементов.

В табл. 3.12 приведены значения концентрации продуктов износа двигателей ЯМЗ, характерные для их исправного и неисправного состояний (предельные значения).

Калориметрическим методом можно определять техническое состояние дизелей по параметрам картерного масла. При этом пробу масла анализируют в лаборатории на содержание железа, меди и алюминия, а затем сравнивают с предельно допустимыми параметрами.

Радиоактивный метод заключается в том, что на дизеле устанавливаются детали, активированные радиоактивными изотопами. По мере износа деталей радиоактивные частицы попадают в масло картера, откуда их отбирают, анализируют и по ним определяют интенсивность износа узлов трения.

Значения концентрации продуктов износа двигателей ЯМЗ

Элемент	Массовая доля элемента ($10^{-4}\%$) для модели двигателя			
	ЯМЗ-240Н		ЯМЗ-8401	
	Исправное состояние	Неисправное состояние	Исправное состояние	Неисправное состояние
Fe	10	30	8	25
Al	20	30	15	25
Cr	2,5	3,8	2,0	3,5
Cu	15	20	15	20
Pb	15	20	15	20
Si	13	20	10	20

Рентгенографический метод позволяет проводить не только анализ масла, но и структуру поверхностного состояния деталей трения. В основе использования этого метода лежит способность рентгеновских лучей проникать в поверхностные слои металла, анализируя их. Пучок рентгеновских лучей скользит по поверхности изношенной детали, анализируя послойно ее техническое состояние. Таким образом, с помощью рентгеновских лучей можно более достоверно и объективно оценивать состояние масла и его влияние на процесс износа в узлах с деталями трения. Это позволяет прогнозировать остаточный ресурс, а также дает возможность правильно подбирать масла.

Атомно-абсорбционный спектральный анализ с дуговой автоматизацией обладает более высокой чувствительностью по сравнению с другими методами в 1000 раз. Этот метод является одним из наиболее совершенных аналитических методов решения задач по определению содержания малых концентраций металлов и других химических элементов в нефтепродуктах, выявлять износ трущихся деталей омываемых маслом на ранней стадии. В качестве атомизатора в применяемой за рубежом аппаратуре в основном используется пламя. Эмиссионные или атомно-абсорбционные спектры можно получить, используя атомизатор – высокотемпературный источник света, в который вводится исследуемая проба масла для разрушения молекулы до атомарного состояния. В качестве источника тепла можно использовать любой горючий газ. Для получения атомно-абсорбционного спектра применяют эмиссионные квантометры МФС-3 МФС-5 или спектрофотометр С-302, который имеет небольшие размеры и проба масла подается в него в распыленном состоянии.

Атомно-абсорбционный метод анализа основан на изучении атомных спектров резонансного поглощения. Атомы способны не только излучать волны определенной длины, но и поглощать их. Особенно эффективно поглощаются волны той длины, которая соответствует переходу атома в возбужденное состояние с основного нижнего энергетического уровня (так называемое резонансное поглощение). Атомно-резонансное поглощение связано со строением атома, является его характеристикой, что и положено в основу анализа.

Для того чтобы добиться атомно-резонансного поглощения, необходимо задать резонансное излучение, соответствующее спектру искомого элемента, и пропустить его через атомизированную пробу. При сравнении измеренного исходного излучения до прохождения пробы и после нее можно определить, что при наличии искомого атома в пробе первоначальное излучение уменьшится из-за поглощения данного элемента в тем большей степени, чем больше искомого элемента в пробе. По уменьшению интенсивности заданного излучения можно судить о количестве искомого элемента. Так как природа происхождения процессов поглощения и излучения (при эмиссионном анализе) различна, то и возможности основанных на этих явлениях спектральных методов также неодинаковы.

Значения предельных концентраций продуктов изнашивания моторных масел в бензиновых и дизельных двигателях приведены в табл. 3.12.

В табл. 3.13 приведены основные неисправности двигателей типа ЯМЗ и определяющие их элементы (продукты износа), позволяющие диагностировать техническое состояние двигателей по результатам спектрального анализа картерного масла.

По результатам спектрального анализа смазочного материала определяют износ деталей и сопряжений. Иногда в смазочном материале можно найти и продукты неполного сгорания топлива, что позволяет с помощью спектрального анализа определять состояние таких узлов, как поршни дизеля, кольца и др.

Таблица 3.13

Основные неисправности двигателей ЯМЗ и определяющие их элементы

Неисправности	Элемент					
	Pb	Si	Fe	Cu	Al	Cr
Негерметичность впускного тракта (износ деталей ЦПГ)		▲	▲		▲	▲
Задир деталей ЦПГ (поршней, гильз, колец)			▲		▲	▲
Неисправности деталей КШМ (износ, задиры вкладышей и коленчатого вала)	▲		▲	▲		
Примечание: ▲ – рост концентраций при неисправности; ▲ – основной диагностический элемент						

Нарушение плотности системы охлаждения дизеля, приводящее к обводнению картерного масла, можно диагностировать по накоплению в масле продуктов, содержащихся в присадках к охлаждающей жидкости. Методом спектрального анализа можно определить техническое состояние масляных фильтров, если в масле окажутся продукты неочищенного воздуха; аналогично можно судить о техническом состоянии моторно-осевых подшипников, буксовых подшипников и других узлов с деталями трения [30].

Основными элементами-индикаторами, которые характеризуют изменение технического состояния двигателей, служат железо (при износе гильз цилиндров, шеек коленчатого вала, зубьев шестерен), свинец (при износе вкладышей подшипников), хром (при износе хромированных поршневых колец), кремний (при попадании пыли), никель (при износе нирезистовых вставок в гильзах цилиндров).

При диагностировании методами спектрального анализа, чтобы получить достоверные данные, необходимо иметь большой набор эталонных параметров для контроля трущихся пар подшипников и дизельного масла. Попадание охлаждающей воды в дизельное масло можно обнаружить при его анализе по содержанию элементов, которые входят в состав воды в виде присадок: натрий, бор, хром и другие составляющие, выявляются в процессе спектрального анализа на специализированных установках МФС-5, ФПЛ-1, СТ-7 или БАРС-ЗМ, МФС-7, инфракрасные Фурье-спектрометры.

Несмотря на высокую точность диагностирования по результатам спектрального анализа масла, его широкое применение для автомобилей затруднено из-за достаточно высокой стоимости квантометров, их технического обслуживания и др.

Спектральный анализ не может давать всестороннюю оценку технического состояния двигателя и поэтому его следует считать вспомогательным методом.

Спектральный анализ масел пока остается основным методом диагностирования двигателей транспортных машин, в авиации, железнодорожном и водном транспорте.

3.8.3.2. Спектральный анализ масел двигателей установками МФС

Для диагностирования двигателей по параметрам работавшего масла применяются современные спектрометрические приборы МФС с вращающимися электродами. В этих спектрометрах ввод пробы масла осуществляется дисковым электродом, который, вращаясь, захватывает слой анализируемого масла из ванночки и подает его в зону разряда, где происходит сгорание продуктов износа. При высокой температуре плазмы дуги распадаются молекулы на атомы. Атомы продуктов износа переходят в возбужденное состояние и испускают излучения различной длины волн аналитических линий контролируемых элементов. Эти излучения разлагаются в спектр, из которого затем выделяются чувствительные спектральные линии определяемых элементов и направляются зеркалами на фотоэлементы. Каждый элемент излучает строго определенный спектр. Сила фототока пропорциональна интенсивности спектральной линии и концентрации элемента в пробе.

Методика эмиссионного спектрального анализа картерных масел позволяет за 3-5 мин определить концентрацию железа, свинца, меди, никеля, алюминия и других элементов с относительной ошибкой 5-20%.

В выпускаемых многоканальных фотоэлектрических установках МФС-7 рис. 3.26 [26] использован метод эмиссионного спектрального анализа газа

или пара исследуемого вещества при нагревании его до температуры более 1000 °С. Нагретый и частично ионизированный и проводящий электрический ток газ (плазма) излучает электромагнитные колебания в оптическом диапазоне спектра. Каждый элемент имеет свой определенный линейчатый спектр излучения. По спектру излучения газа можно определить химический состав образующего газа и состав анализируемой пробы.

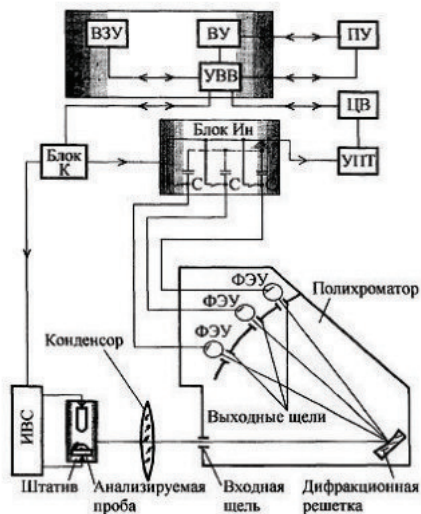


Рис. 3.26. Компьютерная фотоэлектрическая установка МФС-7

ний с помощью фотоэлектронных приемников излучения и регистрирующего и вычислительного устройств. Входная щель, дифракционная решетка (радиус кривизны и число штрихов 1800 на 1 мм) и выходные щели расположены на круге Роуланда.

Интенсивности аналитических спектральных линий и мощность излучения единицы объема плазмы связаны с концентрацией соответствующих элементов в пробе, поэтому установка заставляет определять не только качественный состав проб, но и количественный.

Проба анализируемого масла подается вращающимся угольным диском, погруженным в ванночку с маслом. Подставным электродом также служит угольный стержень, установленный в штативе. Излучение разряда поступает через конденсатор на входную щель полихроматора с вогнутой дифракционной решеткой, которая разлагает излучения в спектр. Выходные щели полихроматора выделяют из спектра аналитические линии.

Далее выделенные потоки излучения направляются на фотокатод соответствующего ФЭУ, в анодной цепи которого протекает ток

$$i = M \cdot \gamma(\lambda) \tau(\lambda) I(\lambda),$$

где M – коэффициент усиления ФЭУ; $\gamma(\lambda)$ – чувствительность фотокатода ФЭУ на длине волны λ ; $\tau(\lambda)$ – коэффициент пропорциональности, постоян-

На рис. 3.26 использованы следующие сокращения: ИВС - источник возбуждения спектра; Блок К - блок контроллера; ВЗУ - внешнее запоминающее устройство; ВУ - вычислительное устройство; УВВ - устройство ввода-вывода; ПУ - печатающее устройство; ЦВ - цифровой вольтметр; УПТ - усилитель постоянного тока; ФЭУ - фотоэлектронный умножитель; С - емкость интегрирующего конденсатора; Блок Ин - блок интегратора.

Специальные полихроматоры (спектральный прибор с девятнадцатью выходными щелями) выделяют аналитические спектральные линии, регистрируют и автоматически обрабатывают сигналы этих ли-

ный для данной длины волны λ ; $I(\lambda)$ – интенсивность излучения спектральной линии с длиной волны λ .

Для усреднения спектроаналитических сигналов за определенный промежуток времени предусмотрено накопление (интегрирование) зарядов на конденсаторах емкостью C , которые включаются в анодные цепи ФЭУ. Напряжение заряжаемых конденсаторов пропорционально усредненным значениям интенсивностей аналитических линий

$$V(\lambda) = \frac{1}{C} \int_0^T i dt = \frac{i \cdot T}{C} = \gamma(\lambda) \cdot M \cdot \tau(\lambda) \cdot \frac{I(\lambda)}{C}, \quad (3.7)$$

где C – величина емкости интегрирующего конденсатора.

По истечении заданного времени интегрирования T по специальной программе управления производится последовательный опрос конденсаторов путем подключения их к усилителю УПТ. Цифровой вольтметр преобразует аналоговый сигнал в цифровой, который затем в двоично-десятичном коде подается в устройство ввода-вывода, а затем после соответствующего преобразования подается в вычислительное устройство ВУ. В этом устройстве по заданной программе ведется обработка сигналов и распечатка результатов с помощью печатающего устройства (ПУ). На ПУ выводятся результаты статистической обработки сигналов (среднее значение, абсолютное и относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерений).

Оператор в режиме диалога с вычислительным устройством (ВУ) с помощью клавиатуры печатающего устройства ПУ может задавать режим работы установки, автоматически включать источник возбуждения спектра ИВС, выбирать программу включения и выключения каналов анализируемых элементов, вид регистрации и объем выборки единичных измерений. Время «объяснения» пробы определяется программным способом с помощью тактового генератора ВУ.

Управляющий вычислительный комплекс (УВК) «Спектр-2-2» включает УВВ, ВЗУ, ВУ и ПУ и состоит из двух ЭВМ. Одна из ЭВМ может использоваться для выполнения различных расчетов и хранения нормативно-справочной информации.

Примерная технология диагностирования технического состояния двигателя по параметрам работавшего масла приведена на рис. 3.27. Одна такая установка позволяет за смену производить анализ 50-60 проб и обслуживать несколько автотранспортных предприятий с общей численностью 1200 автомобилей. Периодичность диагностирования масла соответствует периодичности Д-2.

Очень важно для экспрессного количественного спектрального анализа масла правильно установить точку отбора проб масла. На двигателе ЗИЛ-431410, например, отбор проб можно производить из картера через трубку маслоизмерительного стержня, из фильтра грубой очистки в месте установки датчика давления масла.

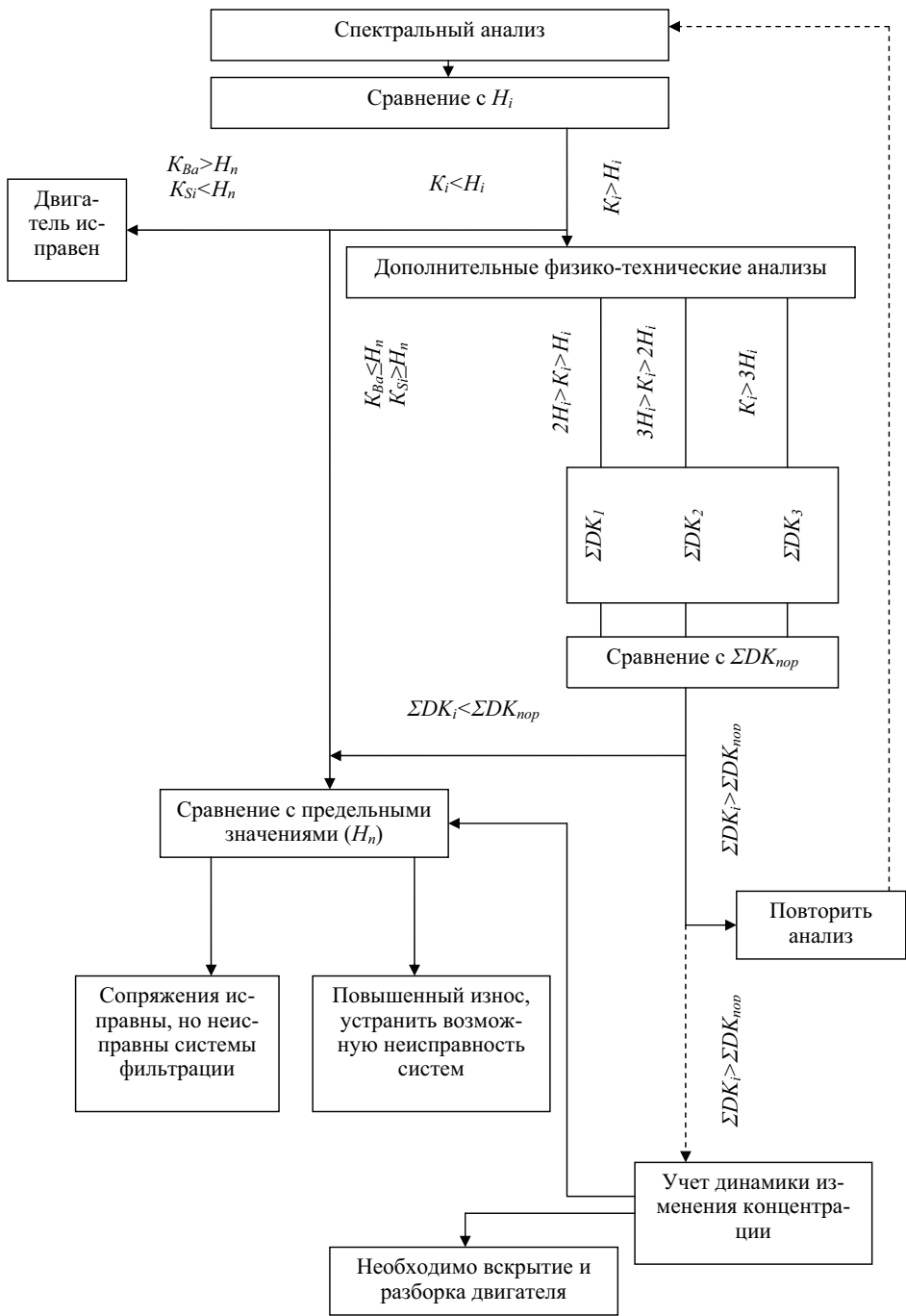


Рис. 3.27. Технологическая схема диагностики двигателей

На рис. 3.27 приняты следующие обозначения: K_i – концентрация продуктов износа; H_i – контрольное содержание в масле продуктов износа; K_{Si} – концентрация кремния; K_{Ba} – концентрация бария; $\Sigma DK_{пор}$ – пороговая сумма диагностических коэффициентов для установленного порога значимости; H_n – контрольные и предельные значения отдельных параметров состояния масла и систем движения; ΣDK_i – сумма соответствующих диагностических коэффициентов для определенного повышения нормы содержания продуктов износа.

Допустимый уровень концентрации элементов-индикаторов износа в масле зависит от конструкции двигателей и свойств применяемого масла. По экспериментальным данным предельное содержание отдельных элементов в картерном масле карбюраторного двигателя изменяется в пределах 5-30 мг/кг. Экономический эффект от применения диагностирования автомобилей по параметрам работавшего масла составляет около 20 грн на один автомобиль.

Перечень основных диагностических параметров состояния автомобильного двигателя, неисправностей и предельных значений параметров продуктов износа приведен в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Неисправности и диагностические параметры по двигателю

Диагностический параметр	Неисправность	Предельное значение параметра
Железо	Повышенный и аварийный износ гильз цилиндров, шеек коленчатого вала, подшипников качения, зубьев шестерен	0,005
Алюминий	Повышенный и аварийный износ поршней (задиры ЦПГ) и сталеалюминиевых вкладышей	0,002
Свинец, медь, олово	Повышенный и аварийный износ подшипников скольжения (вкладыш коленчатого вала, втулки шатунов и др.)	0,0015
Хром, молибден	Повышенный и аварийный износ поршневых колец	0,0005
Повышенное содержание кремния	Неисправность (негерметичность) системы фильтрации воздуха, негерметичность воздушных трактов, системы вентиляции картера	0,002

Диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса методом спектрального анализа масла осуществляется в соответствии с ГОСТ 20759-75 и руководящими документами РД 37.001.002-82 - «Метод спектрального определения продуктов износа автомобильных двигателей и некоторых элементов присадок к маслам в отложениях на деталях и фильтрах», РД 37.001.004-82 - «Метод спектрального определения продуктов износа деталей автомобильных двигателей в работающих маслах» и РД 37.001.019-84 - «Методика диагностирования технического состояния автомобильных дизельных двигателей по показателям работающего масла».

При определении концентраций отдельных элементов износа в масле в соответствии с государственным стандартом применяется специальный вы-

числительный алгоритм, учитывающий данные анализа и фактическое состояние деталей. Диагностический коэффициент вычисляется по формуле

$$M = \frac{\sum_{k=1}^m a_{ik}^{j1}}{\sum_{k=1}^m a_{ik}^{j2}} \prod_{i=1}^n \frac{a_{ik}^{j1} \sum_{k=1}^m a_{ik}^{j2}}{a_{ik}^{j2} \sum_{k=1}^m a_{ik}^{j1}}, \quad (3.8)$$

где a_{ik}^{j1} - количество случаев, когда j -й узел (или деталь) дизеля находится в состоянии нормы ($j1$) при нахождении i -го параметра в k -м диапазоне значений; a_{ik}^{j2} - то же, когда j -й узел находится в состоянии отказа ($j2$); j - контролируемая неисправность узла (или детали) дизеля; i - диагностический параметр; n - количество диагностических параметров; m - количество диапазонов значений i -го параметра.

Средняя величина концентрации (K_{CP}) в момент прогнозирования вычисляется по формуле

$$K_{CP} = \sum_{r=1}^N \frac{K_r}{N}, \quad (3.9)$$

где K_r - концентрация элемента в масле при r -ом отборе пробы; N - количество отборов пробы от последнего ремонта двигателя.

Остаточный ресурс (L_{ocm}) определяется по формуле

$$L_{ocm} = \frac{G}{(\alpha_{cp} \cdot K_{cpN})} - L, \quad (3.10)$$

где G - допустимый износ, г; α_{cp} - коэффициент массообмена, равный среднему значению по прогнозируемым элементам износа для двигателей одной марки, т/тыс. км; K_{cpN} - средняя концентрация на момент прогнозирования, г/т; L - пробег на момент прогнозирования, тыс. км.

3.8.3.3. Достоверность диагностирования двигателя по спектральному анализу масла

На объективность результатов спектрального анализа масел влияет множество различных факторов. Так, на объективность данных влияет способ подачи пробы в аналитический промежуток и ее состав, условия испарения пробы, характеристики приемников света, область аналитического промежутка, из которой производится отбор излучения и др. От способа подачи пробы в аналитический промежуток, ее состава и физико-химических свойств зависит избирательность поступления продуктов износа в зону разряда.

На условия испарения пробы при методе вращающегося электрода, в свою очередь, влияют такие факторы, как токовые режимы обжига, длительность экспозиции, расстояние между электродами, непостоянство формы и размеров электродов, нестабильность процесса разряда, скорость вра-

щения электрода, глубина погружения электрода в масло, конструкция ванночки, внешние условия вокруг разрядного промежутка (давление, температура, влажность, газовый состав и т. п.). В качестве приемников света используются фотографические и электрические регистраторы (фотоэлементы и фотоумножители). Стабильность характеристик фотографических приемников света зависит от совершенства технологии, старения, качества обработки реактивами, качества самих реактивов и т. п.

Характеристики фотоэлектрических приемников света, в свою очередь, изменяются в зависимости от внешних условий, времени, условий экспозиции и т. п.

На достоверность диагностирования механических систем по результатам спектрального анализа содержания продуктов износа в масле оказывает:

- фактический состав материала, из которого изготавливается конкретная деталь;
- метод отбора проб для анализа.

Они определяют недостаточную контролепригодность метода диагностирования продуктов износа в масле.

На практике для оценки технического состояния механических систем на первом этапе выделяются группы деталей, в составе которых имеется характерный элемент-индикатор. Для выделения контролируемых групп используются данные о составе материалов, из которых детали изготовлены. Так, по методике ГОСТ 20759-75 применительно к дизельным двигателям тепловозов в качестве индикаторов рекомендуется использовать Ca, Pb, Sn, Cr, Al, Fe и Si. Для других механических систем совокупность элементов-индикаторов может быть другой. Практически количество таких элементов, а значит и число контролируемых групп деталей, для подавляющего большинства механических систем не превышает десяти. После выделения контролируемых групп, пользуясь спектральным анализом, определяют концентрацию примесей в пробах масла, взятых согласно принятым методикам из большого количества однотипных двигателей, которые работают в течение длительного времени в различных условиях эксплуатации. Все двигатели при этом должны находиться под тщательным наблюдением. На основании полученных статистических данных устанавливается предельная концентрация того или иного элемента-индикатора в масле двигателя, которая и свидетельствует об интенсивном изнашивании его деталей.

Таким образом, по изменению концентрации примесей в масле можно указать, какие именно из выделенных групп повреждены. Однако оценить количественно износ отдельных деталей в пределах выделенных групп на основе известных методик практически невозможно из-за трудностей в учете множества действующих факторов. Поэтому по концентрации примесей в масле нельзя с достаточной достоверностью определить износ сразу нескольких десятков групп деталей одного и того же двигателя. В большинстве случаев удастся лишь дать хотя и ценную, но только качественную оценку интенсивности изнашивания.

Контролепригодность двигателей по результатам анализа масел можно повысить за счет использования материалов деталей с возможно большим ассортиментом характерных химических элементов в своем составе или за счет искусственного введения таких характерных элементов в уже используемые материалы в виде вставок и т. п. Эта мера позволяет увеличить число отдельных распознаваемых групп деталей. Увеличению количества полученной информации будет способствовать отбор проб из отдельных контуров системы смазки. Это требует встраивания пробоотборных приспособлений (запорной арматуры, кранов и т. п.).

Дальнейшее повышение контролепригодности двигателей, совершенствование методики отбора и сохранения проб, а также совершенствование метода анализа масел при существующих методиках обработки результатов к существенному повышению информативности без разборного контроля все же не приведет. Причиной этого заключается в том, что предложенные исследователями для обработки результатов анализа зависимости отображают только динамику поэлементного накопления продуктов изнашивания в масле и не содержат четко выраженных связей между концентрацией химических элементов и параметрами, характеризующими износ

$$C_{ji}=f(X_i, K_{ij}), \quad (3.11)$$

где C_{ji} – концентрация j -го элемента в масле в момент времени t ; X_i – степень износа i -ой группы деталей; K_{ij} – концентрация j -го химического элемента в i -ой группе деталей.

Без такой зависимости затруднительно получение объективной информации об износе конкретных групп деталей. Другими словами, нужна такая математическая модель накопления продуктов изнашивания в масле, которая бы позволяла на основе данных о значениях концентрации химических элементов в масле путем их обработки получить количественную информацию об износе конкретных групп деталей в единицах измерения, удобных для эксплуатационников и исследователей. В связи с этим основной задачей дальнейшего совершенствования метода является разработка более совершенной математической модели накопления продуктов изнашивания в системе смазки двигателей как кибернетической системы. Такая математическая модель должна обеспечивать снижение отрицательного влияния на результаты контроля таких факторов, как потери и разбавление масла, застой и осаждение продуктов изнашивания в контурах системы смазки и т. п.

В качестве такой системы можно рассматривать двухконтурную систему смазки двигателя. Один контур в такой системе начинается со входа подкачивающего насоса, включает все последующие элементы с трубопроводами и заканчивается фильтрами. Другой контур образуется ветвью, которая начинается после фильтра, включает нагнетательный насос и все последующие за ним элементы до фильтра включительно. Для оценки процессов изнашивания целесообразно включить в систему все существенные группы элементов, находящиеся в контурах смазки. Под термином «существенная группа элементов» подразумевается всякая совокупность элемен-

тов из одного и того же материала, которая может в процессе работы объекта внести изменение в процентное содержание химических элементов продуктов изнашивания. Связи между элементами – потоки рабочего вещества (масла), увлекающие продукты изнашивания. Передаваемая по ним информация – это содержание химических элементов в рабочем веществе.

Для исследования выделенной системы методами кибернетики необходимо ее математическое описание, то есть математическая модель. Построение математической модели является едва ли не наиболее сложной и трудоемкой частью подготовительной работы. Для удобства разработки математической модели процесса изнашивания двигатель целесообразно представить в виде отдельной развернутой подробной кибернетической системы, в которую по входным связям будет передаваться информация о первоначальном содержании химических элементов в заливаемом масле, а по выходным – информация о содержании химических элементов в масле и фильтрующем элементе после определенной наработки. Несущественные связи и элементы из системы можно исключить.

На объективность определения концентрации продуктов износа весьма существенное влияние оказывает методика отбора проб для анализа и способы введения пробы в аналитический промежуток. Масло в системе должно быть перемешано, а отбор проб производится из одних и тех же мест при соблюдении одной и той же технологической последовательности. Действие многих факторов взаимно накладывается, так, например, изменение способа возбуждения спектра отражается не только на абсолютной величине интенсивности линии элементов, но также и на их относительной интенсивности. Это особенно заметно в тех случаях, когда линии принадлежат атомам с различной степенью ионизации. Изменение состава анализируемой пробы часто приводит к изменению условий возбуждения паров. При этом изменяются как абсолютная, так и относительная интенсивности линий элементов, содержащихся в пробе в неизменных относительных концентрациях.

Возможности описанного метода определения степени износа во многом зависят от чувствительности и точности определения концентрации элементов в масле. Поскольку чувствительность и объективность спектрального анализа в большой степени зависит от способа введения пробы в разрядный промежуток, такие как способ озоления пробы и набивки лунки в электроде, капельный способ, способ вращающегося электрода. Каждому из них, помимо достоинств, присущи и серьезные недостатки как в отношении точности, так и в отношении чувствительности. Из названных способов наиболее удобным считается метод вращающегося электрода. Но, как показала практика, возможности его ограничены тем, что в среднем через 40 секунд с момента начала прожига вращающийся электрод перестает смачиваться веществом пробы. Это происходит потому, что при соприкосновении разогретой поверхности вращающегося электрода с жидкостью, последняя в зоне соприкосновения начинает вскипать. В результате этого по всей зоне соприкосновения вскоре образуется сплошная газовая прослойка, которая изолирует электрод от продуктов изнашивания. Эта прослойка, обладая

плохой теплопроводностью, способствует еще более быстрому разогреву электрода. Такое явление в теплотехнике называют сверхкризисным режимом кипения. С другой стороны, повысить чувствительность анализа затруднительно еще и потому, что масло в ванночке при длительном прожиге имеет склонность к возгоранию. Спектр излучения горящего масла накладывается на спектр излучения возбужденных атомов и «забивает» его. Кроме этого, довольно существенным является факт избирательного поступления частиц износа в зону прожига из-за их оседания в разжиженном масле.

Способ озоления, обладая высокой чувствительностью, является весьма трудоемким и недостаточно объективным из-за низкой представимости пробы. Эффективность капельного метода во многом ограничивается нестабильностью поступления пробы в зону разряда.

От многих из указанных недостатков свободен способ введения пробы в разрядный промежуток, который можно назвать капельно-инжекционным, а также метод возбуждения пробы способом взрывающего проводника. Сущность метода возбуждения пробы взрывающим проводником заключается в том, что проводник помещают в специальную ванночку с исследуемой пробой. Далее, через проводник пропускают мощный импульс тока силой до нескольких сотен ампер.

Под действием этого импульса проводник мгновенно испаряется. Температура в зоне взрыва может достигать десятков тысяч градусов. Под действием столь высокой температуры возбуждаются самые трудно возбудимые элементы, находящиеся в пробе в виде различных соединений. Следует отметить, что эталонный спектр железа при таком способе возбуждения получается несколько отличным от дугового и искрового. Поэтому к применению стандартных спектров для расшифровки спектрограмм пробы следует подходить осторожно.

3.8.3.4. Определение качественных и количественных параметров смазочных масел и присадок методом инфракрасной Фурье-спектроскопии

Инфракрасная спектроскопия является в настоящее время одним из наиболее мощных инструментов анализа органических соединений и дает возможность получить большинство, если не все характеристики нефтепродуктов, топлив, свежих и рабочих смазочных масел и присадок. В прошлом успешно, хотя и поверхностно, эта техника использовалась для контроля качества смазочного масла в процессе эксплуатации различных механизмов. Однако использование всех возможностей, заключающихся в этом методе, ограничивалось неспособностью извлечь всю информацию, содержащуюся в инфракрасном спектре. Современные инфракрасные Фурье-спектрометры, оснащенные новейшими компьютерными программами обработки спектров, имеющие высокую чувствительность и стабильный сигнал, позволяют зафиксировать очень малые изменения в инфракрасных спектрах и обеспечивают возможность извлечь огромное количество информации о процессах старения и деградации смазочных масел в результате их эксплуатации.

В рабочих моторных, промышленных и других видах смазочных масел в процессе их эксплуатации происходят химические реакции, и масла обогащаются нежелательными компонентами вследствие неисправности тех или иных механизмов. Поэтому смазочное масло непременно должно систематически контролироваться, что гарантирует работу механизма с максимальной долей эффективности.

Измеряемые по инфракрасным Фурье-спектрам параметры определяются как химической деградацией масла и присущего ему пакета присадок, так и его загрязнением, причем оба фактора могут приводить к нежелательным функциональным изменениям и отказу механических узлов.

Изменения в рабочем масле прекрасно обнаруживаются по дифференциальному инфракрасному Фурье-спектру поглощения в области 400-5000 см⁻¹, представляющего собой разницу спектров поглощения 5000 см⁻¹ рабочего и свежего масел. Чувствительность применяемого [33] ИК Фурье-спектрометра ФСМ 1201 на линии 100% пропускания составляет 0,025% в единицах пропускания, отношение сигнал/шум линии 100% пропускания (2000-2200 см⁻¹, разрешение 4,0 см⁻¹, 20 сканов) не менее 2000, стабильность линии 100% пропускания (5 мин) не более ±0,5%. К этому комплексу методик подходит любой другой ИК Фурье-спектрометр с аналогичными или лучшими характеристиками. Анализ одного образца требует максимум 0,5 грамма представительной пробы рабочего и свежего масел и занимает 2 минуты.

ИК-спектр смазочного масла представляет собой сложную картину накладывающихся, порой трудноразрешимых полос, обусловленных большим разнообразием составляющих его компонентов. Комплекс методик [68] позволяет определять следующие количественные и качественные параметры в отработанных смазочных маслах: содержание воды, сажи, антифриза, топлива, карбонильного, нитратного и сульфатного окисления, деградацию присадок различного назначения, степень ароматичности и парафинированности продукта, долю синтетики и минеральную составляющую представленного для анализа масла.

3.8.3.5. Методы определения продолжительности работы моторного масла

«Моторные» методы оценки качества масла. Схема загрязнения моторного масла приведена на рис. 3.28. Существует много методов очистки масел от загрязнения. При испытаниях масел на двигателях устанавливается соответствие результатов, полученных при моторной оценке качества масел в стендовых и эксплуатационных условиях, пересматриваются универсальные методики, предназначенные для одновременной оценки всех важнейших эксплуатационных свойств масел, разрабатываются комплексы функциональных методов испытаний моторных масел на двигателях, позволяющие установить пригодность испытанного масла к применению в двигателях определенного типа (рис. 3.29). Такие комплексы существуют в России и в Украине, для автомобильных масел (США, Англия), для масел,

предназначенных для судовых дизелей (Англия) и поршневых авиационных двигателей (США) [31].

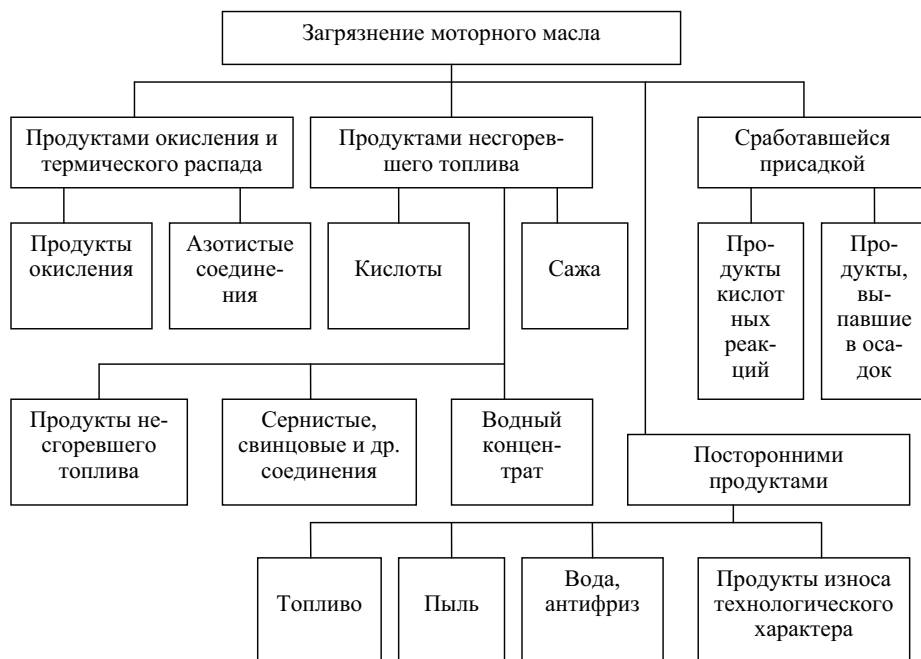


Рис. 3.28. Схема старения моторного масла

Испытания автотракторных масел в стендовых условиях проводятся с 30-х годов. Наибольшее распространение получила оценка качества масла на специальных моторных установках (табл. 3.15). Наиболее полную оценку функциональных свойств моторных масел путем определения моющих и противоизносных свойств, а также лаковых, низко- и высокотемпературных отклонений получают на установках по методам УИМ-НАТИ и ЯАЗ-204. Особая роль в решении вопросов моторной оценки качества масел принадлежит таким ведущим институтам как ВНИИНП, ЦНИДИ, НИИАТ, НАТИ, ЦНИТЭнефтехим [31] и др.

За рубежом (особенно в США) к настоящему времени накоплен большой опыт как по разработке конструкций специальных двигателей и стендов для испытания моторных масел, так и по системам оценки качества масел на основе результатов стендовых и моторных испытаний (табл. 3.16). Большая роль в этом направлении принадлежит таким организациям, как Американское общество автомоторных инженеров (SAE), Американское общество испытания материалов (ASTM), Американский нефтяной институт (API), Английский нефтяной институт и др., а также специальным комитетам и комиссиям этих организаций, созданными для подготовки конкретных решений в этой области.

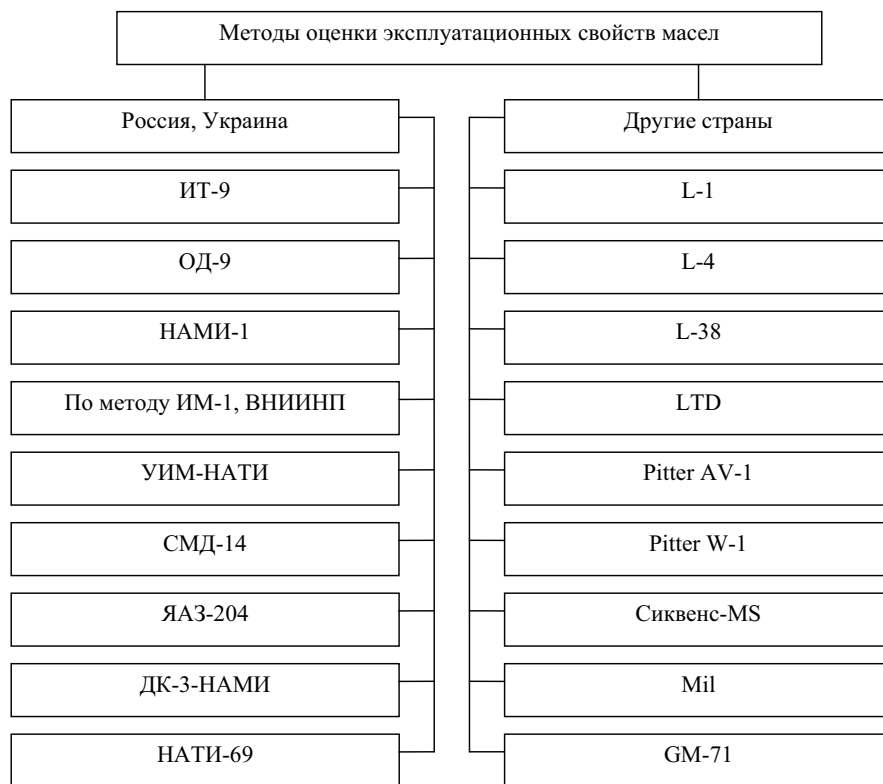


Рис. 3.29. Моторные методы оценки качества масла

Таблица 3.15

Зарубежные методы оценки качества масла

Метод испытаний	Критерии оценки
L-1	Моющие свойства масел. Противоизносные свойства. Высоко- и низкотемпературные отложения
L-4	Антиокислительная стабильность, коррозия вкладышей. Высокотемпературные отложения
L-38	Антиокислительные и противоизносные свойства. Высоко- и низкотемпературные отложения
LTD	Антиокислительные и противоизносные свойства. Высоко- и низкотемпературные отложения
Pitter AV-1	Лакообразующие свойства
Pitter W-1	Антиокислительная стабильность. Коррозионность. Лаковые отложения
Сиквенс-MS	Низко- и высокотемпературные отложения. Противоизносные, антикоррозийные свойства
Mil	Антиокислительные и противоизносные свойства, противокоррозийные свойства
GM-71	Эксплуатационные свойства

Методы диагностирования

Название	Диагностический параметр	Средства диагностирования
Метод диагностирования по основным показателям работы двигателя	Мощность двигателя. Часовой расход топлива. Удельный расход топлива. Частота вращения коленчатого вала	Установки и стенды. Электронные весы
Метод диагностирования по параметрам отработавших газов	Температура отработавших газов. Токсичность отработавших газов (СО, СН)	Измеритель двухканальный 2ТРМО (ХА). Газоанализатор «INFRALIT»
Метод диагностирования по рабочему процессу двигателя	Среднее индикаторное давление. Индикаторный КПД	ПК+АЦП+пьезоэлектрический датчик типа Orion
Метод диагностирования по параметрам смазочной системы	Давление в см.с. Температура в картере двигателя. Температура в главной масляной магистрали	Манометр МПЗ-У. Измеритель двухканальный 2ТРМО (ХК)
Метод диагностирования по параметрам системы охлаждения	Давление в рубашке охлаждения. Температура и количество теплоты, отводимое в систему охлаждения	Измеритель двухканальный 2ТРМО, расходомер жидкости СВ-15Г

Фирма General Motors широко применяет две системы оценки эксплуатационных свойств моторных масел: методы «Сиквенс-MS» и методы Mil, которые периодически обновляются ввиду повышающихся требований к маслам. Большинство зарубежных методов, при помощи которых характеризуется образование углеродистых отложений в двигателе, основано на оценке состояния двигателей в баллах. Необходимо отметить, что за рубежом большое значение придается статистическому анализу результатов стендовых и эксплуатационных испытаний на двигателях.

Кроме моторных методов, позволяющих определить эксплуатационные свойства масел, имеются безмоторные методы, основанные на определении физических и химических показателей качества масла.

Моторные комплексы по показанным в табл. 3.16 параметрам и методам позволяют проводить полномасштабные стендовые испытания различных видов ТСМ, оценивать влияние как новых видов ТСМ, так и присадок и добавок к ним на технико-экономические и экологические показатели работы двигателей. Кроме того, позволяют подобрать соответствующие марки топлив и масел к вновь разрабатываемым моделям бензиновых двигателей.

Безмоторные методы оценки качества масла. Для оценки состояния рабочего картерного масла определяют его физико-химические показатели, такие как вязкость, кислотное число, температуру вспышки, содержание загрязняющих примесей, коксуемость, щелочность и др. Важно иметь представление об эксплуатационных свойствах масла, его работоспособности, эффективности присадок, содержащихся в нем. Для этой цели применяются методы оценки качества масел, приведенные в табл. 3.17 [31].

Кроме того моторное масло представляет собой полидисперсную систему. для оценки степени дисперсности таких систем применяются всевозможные методы, определяющие дисперсный состав частиц загрязнения в масле.

Таблица 3.17

Отечественные методы оценки качества масла

Метод испытаний	Критерии оценки
ИТ-9	Лакообразующие и коррозионные свойства, срабатываемость присадки
ОД-9	Высокотемпературные отложения на поршне. Антиокислительная стабильность. Моющие свойства
НАМИ-1	Низкотемпературные отложения
ИМ-1 по методу ВНИИ НП ЯМЗ-238 НБ	Моющие и антиокислительные свойства
УИМ-НАТИ УИМ-6-НАТИ	Склонность дизельных масел к образованию отложений на поршне. Противоизносные свойства. Моющие и антиокислительные свойства
НАТИ-69	Моющие и диспергирующие свойства
СМД-14	Моющие и противоизносные свойства. Лаковые отложения. Низко- и высокотемпературные отложения
ЯАЗ-204	Антикоррозийные и противоизносные свойства. Низко- и высокотемпературные отложения
ДК-НАМИ ДК-2-НАМИ ДК-3-НАМИ	Коррозионные свойства масел. Высокотемпературные отложения на поршне

На рис. 3.30 [31] приведены границы применения различных методов дисперсного анализа в гетерогенных системах.



Рис. 3.30. Разрешающая способность методов дисперсного анализа

ном измерения размеров частиц.

Ультразвуковые методы позволяют исследовать дисперсные системы как в статическом, так и в динамическом состоянии. Большое распространение при определении состава загрязнений масел получили седимен-

Определение дисперсности частиц при ситовом анализе возможно лишь для грубодисперсных систем. Кондуктометрические методы для анализа нефтепродуктов применяются редко в связи с конструктивными и методическими трудностями при реализации метода в концентрированных суспензиях и относительно небольшим диапазо-

тометрические методы анализа. Перспективным методом дисперсного анализа является голография. Однако применение этого метода для анализа нефтепродуктов пока ограничено из-за отсутствия надежных голографических установок.

Большое внимание для оценки качества нефтепродуктов уделяется методам анализа, основанным на оптических свойствах: поглощении, отражении и рассеивании света. Эти методы позволяют исследовать труднодоступные объекты, не нарушая их исходного состояния. Оценка рассеивания света дисперсной системы производится методами малых углов и статической регуляризации.

Для изменения светорассеивания применяются приборы в сочетании с лазерными установками типа ЛГ или ОКГ. По измеренной величине индикатрисы рассеяния определяют функцию распределения частиц по размерам.

Таким образом, для определения качества картерного масла имеется значительное количество методов, соответственно которым разрабатываются показатели оценки продолжительности работы масла (табл. 3.18).

Таблица 3.18

Некоторые физико-химические методы оценки качества работающих масел

Группа	Показатель	Метод оценки
1	Вязкостно-температурные свойства	
	Кинематическая вязкость; дополнительные свойства	1. Метод определения времени прохождения масла в вискозиметрах и специальных устройствах ГОСТ 33-66
2	Срабатываемость присадок	
	Кислотное число	1. Метод потенциометрического титрования на лабораторном рН-метре типа ЛП-58 или другом потенциометре с ценой деления шкалы ГОСТ 11362-65, ГОСТ 5985-59 напряжения 5 мВ. 2. Метод ASTM D 974048 (США)
	Щелочное число	1. Метод определения концентрации ионов водорода на ЛПМ-60 мм. 2. Метод ASTM D 664 -58 (США)
	Диспергирующая способность	1. Метод хроматографии на фильтровальной бумаге при 20 °С и 200 °С (метод пятна)
3	Загрязнение масла	
	Содержание суммарных и нерастворимых осадков	1. Метод центрифугирования на центрифугах АЧИМСХ, УМТ-22, LSZ-40 (q=2500...7000)
	Структура и состав продуктов износа	1. Метод определения загрязнения масла с помощью оптического МБИ-5 и электрического ЭМ-3 микроскопов. 2. Метод эмиссионного спектрального анализа с автоматической расшифровкой спектра

Группа	Показатель	Метод оценки
3		Загрязнение масла
	«Железо в масле»	1. Метод радиоактивных изотопов. 2. Непосредственное спектрометрирование. 3. Колориметрический метод на фотоэлектроколориметре
	Содержание воды	1. Дизелькометрический метод измерения диэлектрической постоянной
	Оптическая плотность	1. Метод изучения концентрации химических элементов в растворах
	Угар масла	1. Метод замера уровня масла посредством мерной трубки, сообщающейся с картером двигателя. 2. Метод взвешивания доливаемого масла до и после опыта с применением трубки, вставляемой вместо сливной пробки

Контрольные вопросы

1. Какие продукты износа можно определить методом спектрального анализа масла?
2. В чем заключается радиоактивный и рентгеновский метод анализа масла?
3. Какие возможности по анализу продуктов износа в масле имеет установка МФС-7?
4. Какая достоверность диагностирования технического состояния двигателя по спектральному анализу масла?
5. Какие возможности определения качественных и количественных параметров масел и присадок методом Фурье-спектроскопии?
6. Какие существуют методы определения продолжительности работы моторного масла?
7. Какая разрешающая способность методов дисперсного анализа?

3.8.4. Диагностические показатели состояния масла

3.8.4.1. Оценка показателей качества масла

Качество производства масел контролируется по 20 параметрам, а товарные масла, используемые в эксплуатации транспортных машин, оцениваются только по 10 показателям.

Многолетний практический опыт применения дизельных моторных масел позволил установить ряд показателей, в совокупности достаточно полно характеризующих работоспособность масел.

Идентичными и комплексными показателями, которые характеризуют качество масла являются:

- кинематическая вязкость ДСТУ ГОСТ 33 (ISO 3104);
- щелочное и кислотное число ГОСТ 11362;
- температура вспышки ГОСТ 26378;
- коксуемость ГОСТ 19932;

- содержание воды ГОСТ 2477;
- массовая часть механических добавок (ГОСТ 6370);
- водородный показатель pH (ГОСТ 11362);
- коксуемость по Конрадсону (ГОСТ 19932) (ISO 3104993);
- дисперсная способность (метод капельной пробы).

В каждый момент работы моторное масло находится в определенном состоянии. Его изменение обусловлено тремя основными факторами:

- поступление в масло продуктов износа двигателя;
- постоянное накопление в масле продуктов окислительной полимеризации;
- проникновение вредных примесей из внешней среды.

В общем случае система оценки технического состояния (качества) моторного масла должна включать в себя контроль вязкостно-температурных, противоизносных, противокоррозионных и противонагарных свойств (рис. 3.31).



Рис. 3.31. Показатели оценки качества моторного масла

Технический анализ показателей оценки свойств и качества масла приведен в работах [30, 31] (табл. 3.19). Изучение функциональной зависимости между содержанием тех или иных компонентов в масле, продолжительностью работы двигателя и некоторыми параметрами масляной системы позволяет установить основные математические зависимости состояния масла. Получаемые формулы позволяют рассчитать содержание интересующих компонентов в масле для любой продолжительности работы двигателя или, наоборот, вычислить время, необходимое для того, чтобы содержание компонентов в масле достигло заданной величины и т. д.

Некоторые показатели оценки состояния масла

Группа	Наименование показателя	Расчетное уравнение
1	Вязкостно-температурные свойства	
	1. Кинематическая вязкость. 2. Динамическая вязкость	$\Pi_V = \frac{V - V_0}{V_0}; \quad V_t = V_0 \cdot \alpha(1 - e^{\beta t});$ $\mu = 0,6\pi \cdot \frac{h_{\min} \Delta C \cdot K_{cp}}{d^2 \cdot \omega}; \quad \eta = \frac{F \Delta l}{S \Delta V}$
2	Срабатываемость присадки	
	1. Расход нейтрализующего компонента присадки.	$K_{II}'' = \alpha \left(V + \frac{\sigma}{100} \sum_{i=1}^{n-1} G_m^2 \cdot \Delta t_i \right) - \frac{\beta}{100} \sum_{i=1}^{n-1} \eta \cdot i \cdot \Delta t \cdot i \cdot m$
2	Срабатываемость присадки	
	2. Срабатываемость присадки. 3. Щелочность. 4. Кислотность. 5. Диспергирующие свойства	$C = K \cdot \frac{g - Q_y}{Q_y} \cdot \left(1 - e^{\frac{Q_y \cdot \tau}{G}} \right); \quad C = C_0 - \frac{K}{Q} \cdot \left(1 - e^{\frac{Q_y \cdot \tau}{G}} \right);$ $K_{II} = \frac{35B \cdot m \cdot (S + a)}{G_{yz} \cdot C_k}; \quad D = D_{\max} \cdot (-\exp[-d_i \cdot t]);$ $DC = 1 - \frac{d^2}{D^2}$
3	Загрязнение масла	
	1. Содержание механических примесей. 2. Содержание железа в масле. 3. Оптическая плотность. 4. Загрязнение масла водой	$X = \frac{100}{Q_y} \left(1 - e^{\frac{Q_y \cdot \tau}{G}} \right) + X_0 e^{\frac{Q_y \cdot \tau}{G}}; \quad F = \frac{M}{g} \log \frac{1 - \frac{gT}{nV_0}}{\frac{gT}{nV_0}}$ $\tau = 2,303 \frac{i}{\delta} \cdot \lg \frac{J_0}{J}; \quad \alpha = 0,006 + 100 \cdot 4,8 \cdot W_2$
4	Комплексные показатели	
	1. Качественный состав. 2. Коэффициент качества масла. 3. Срок службы масла	$\alpha = \frac{G_0}{G_H}; \quad \varepsilon_u = \varepsilon \frac{1 - S_u}{S}; \quad K = 1 + 9 \cdot \frac{\Phi + Q_{II}}{\Pi_p + Q_{II}}$ $Q_{\min} = \frac{q - q_x}{X_{gp} - X_u}$

Для определения скорости процессов старения масла предложено приведенное далее дифференциальное уравнение, описывающее изменение содержания какого-либо вещества в масле:

$$\frac{dx}{d\tau} = \alpha - \frac{x}{y} \cdot g - \frac{x}{V} \cdot Q \cdot \varphi + C_0 \cdot d, \quad (3.12)$$

где d – скорость поступления, образования или разложения вещества; τ – время; g – скорость расходования масла.

Расчетные уравнения для некоторых показателей качества масла приведены в табл. 3.19.

Приведенные показатели позволяют оценивать изменение качества масла и принимать их за бракованные при достижении ими предельного значения.

На практике в качестве браковочных при достижении неисправности применяются следующие показатели: изменение кинематической вязкости, содержание механических примесей, температура вспышки, кислотное число и содержание воды, В табл. 3.20 приводятся применяемые браковочные показатели, а в табл. 3.21 – числовые значения браковочных показателей для некоторых марок масел и топлив двигателей [31].

Таблица 3.20

Применяемые браковочные показатели

Марка масла	Тип двигателя	Группа показателей
ДС-11, М-10Б, В, Г, М-6Б, В, Г	Тракторные и комбайновые	1 – изменение кинематической вязкости; 2 – содержание механических примесей; 3 – температура вспышки; 4 – кислотное число; 5 – содержание воды
М-12В Альфа-11	Судовые 48,5/11 2410,5/13	1 – щелочность; 2 – нерастворимые примеси; 3 – коррозионность; 4 – термоокислительная стабильность
SAE-10	Автотракторные	1 – коксуемость по Конрадсону; 2 – нерастворимые примеси; 3 – асфальт; 4 – содержание топлива; 5 – содержание воды; 6 – прирост вязкости
МС-20, МК-22	Авиационные	1 – вязкость; 2 – температура вспышки; 3 – температура застывания; 4 – содержание водорастворимых кислот и щелочей

Таблица 3.21

Браковочные значения показателей масел

Группа	Показатель	Марка масла	Тип двигателя	Браковочное значение
1	Вязкостно-температурные свойства			
	1. Кинематическая вязкость, мм ² /с	ДС-11 М-10Б моторные ДС _П -П	Автотракторные Автотракторные Тепловозные 2Д-100	Выше 25 Выше 35 Выше 14,5 Ниже 9,0
2	Срабатываемость присадки			
	1. Кислотное число, мг·КОН/г	ДС-11	Тепловозные 10Д-100 2Д-100 судовые	Более 0,5 Более 2,5
	2. Щелочное число, мг·КОН/г	М-10В, ДС-11	ЯМЗ-238НБ Судовые Автотракторные	Ниже 2,5-3 Ниже 1,0 Ниже 0,5

Группа	Показатель	Марка масла	Тип двигателя	Браковочное значение
2	Срабатываемость присадки			
	3. Концентрация ионов водорода, г-КОН/г	М-8В, АС-8, АС-10	Автотракторные	Ниже рН=5
3	Загрязнение масла			
	1. Содержание механических примесей, %	ДС-11, М-8Б, М-10Б	2Д-100/50 Автотракторные Дизельные	Более 0,08 0,4-0,6 1,0-1,2
	2. Нерастворимые примеси, %	М-12В, М-10В	Автотракторные	Выше 3,0-3,5
4	Показатели использования			
	1. Угар масла, %		Автотракторные	3,0-3,5
	2. Коэф. качества		Судовые	Выше 1,5

Приведенные показатели оценки продолжительности работы масел отражают действительное состояние моторного масла на определенный промежуток времени, но не у всех марок имеются нормативы на некоторые значения показателей качества.

Показатели качества масла должны отвечать следующим требованиям:

- характеризовать основные факторы, влияющие на старение масла;
- выражаться в аналитическом виде и быть связанными функциональной зависимостью;
- величины показателей состояния масла и связь между ними должны служить для определения соотношения между качеством масла, характеристикой системы смазки и условиями работы масла в двигателе.

Для исследования основных зависимостей количественного изменения исходного состояния масла (А) и в особенности предельных величин (В) все процессы, происходящие в масле, можно разделить на более простые, отображающие наиболее характерные режимы работы масла в двигателе (рис. 3.32).

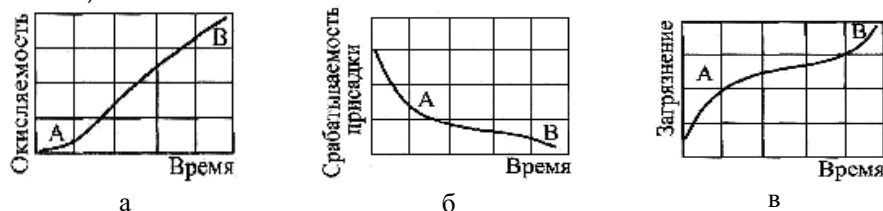


Рис. 3.32. Характер изменения окисления железа (а), срабатываемости присадки (б) и загрязнения масла (в)

Комплексы и величины показателей, которые характеризуют основные режимы, определяющие продолжительность работы моторного масла в зависимости от условий эксплуатации, могут определяться как моторными, так и безмоторными методами оценки качества масла.

Масло считается неработоспособным, если его вязкость изменилась по сравнению с исходным значением на 25-30%, произошло снижение темпе-

ратуры вспышки более чем на 20 °С, снизилось щелочное число до 2,0 мг·КОН/г, содержание воды превышает 0,3%, величина водородного показателя рН снизилась до 5-6 [34].

В качестве браковочного значения показателя коксуемости, для смены масла эксплуатируемого двигателя принято 4%.

В качестве интегрального диагностического параметра может быть принята диэлектрическая проницаемость ϵ [35].

Для дизельных масел SAEISW-40 и М-10ДМ, работающих в двигателях автобусов «Богдан» - А091 и «ПАЗ» - 4234 можно принять браковочное значение изменения диагностического параметра $\Delta\epsilon=0,3$ при достижении которого эксплуатацию масел в двигателях целесообразно прекратить [35, 36].

Величина параметра $\Delta\epsilon$ масла существенным образом зависит от технического состояния двигателя, в котором оно эксплуатируется. Поэтому параметр $\Delta\epsilon$ может быть использован при проведении периодического контроля качества масла, что в значительной мере позволит упростить и сократить время контроля.

Применение показателя диэлектрической проницаемости моторного масла обусловлено его диэлектрическими свойствами, которые зависят от химического состава. Для определения диэлектрической проницаемости используется резонансный метод, который основан на измерении параметров колебательного контура при присоединении к нему конденсатора, заполненного маслом.

Параметры диэлектрической проницаемости для неработающих моторных масел колеблются в пределах 2,30-2,60 и зависят как от природы базового масла, так и от состава вводимых присадок. В табл. 3.22 [37] приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых минеральных и синтетических моторных масел.

Таблица 3.22

Значения диэлектрической проницаемости моторных масел

Природа базового масла	Значения показателя ϵ			
Синтетические (α -полиолефиновые)	2,3010	2,3126	2,3240	2,3280
Синтетические (полиэфирные)	2,400	2,4035	2,4350	2,4421
Минеральные (иностраные)	2,3427	2,3616	2,4470	2,4513
Минеральные (отечественные)	2,5038	2,5435	2,5450	2,5520

Во всех рассмотренных случаях $\Delta\epsilon$ моторного масла возрастает пропорционально времени его эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания (табл. 3.23) [35, 36]. Это свидетельствует о том, что масло постепенно утрачивает свойства диэлектрика. В некоторых случаях наблюдается корреляция между величиной $\Delta\epsilon$ и изменением нормированных физико-химических показателей, определенных по стандартным методикам. Но есть случаи, когда величина $\Delta\epsilon$ в отличие от нормированных физико-химических показателей более точно описывает не только закономерности изменения в составе масла при его эксплуатации, но и характер этих изменений

В табл. 3.23 приведены данные изменений значений ε и некоторых нормируемых физико-химических показателей от времени эксплуатации моторных масел.

Таблица 3.23

Изменение ε и физико-химических показателей масла от времени эксплуатации

1	Масло SAE 10W-40 (№ 1)				
	Наработка, ч				
Показатели	0	74	267	448	508
Температура вспышки, t °С	210	210	208	208	207
Щелочное число, X мг·КОН/г	11,2	9,6	9,0	8,8	8,7
Диэлектрическая проницаемость, ε	2,3525	2,3525	2,3724	2,3856	2,3989
2	Масло SAE 10W-40 (№ 2)				
Показатели	Наработка, ч				
	0	163	254	360	503
Температура вспышки, t °С	210	208	208	208	205
Щелочное число, X мг·КОН/г	11,0	9,2	8,7	8,4	8,0
Диэлектрическая проницаемость, ε	2,3392	2,3790	2,3923	2,4320	2,4586
3	Масло SAE 10W-40 (№ 3)				
Показатели	Наработка, ч				
	0	66	130	257	345
Температура вспышки, t °С	213	213	208	204	204
Щелочное число, X мг·КОН/г	15,0	13,7	12,8	11,5	10,9
Диэлектрическая проницаемость, ε	2,3616	2,3889	2,4254	2,4320	2,4453
4	Масло SAE 10W-40 (№ 4)				
Показатели	Наработка, ч				
	0	130	242	348	460
Температура вспышки, t °С	205	205	205	205	205
Щелочное число, X мг·КОН/г	15,3	13,9	12,5	11,9	11,3
Диэлектрическая проницаемость, ε	2,3427	2,3691	2,3956	2,4155	2,4486

3.8.4.2. Оценочные показатели изнашивания моторных масел

В последнее время большое внимание уделяется определению качества работающих дизельных масел, но до сих пор еще нет четко сформулированных показателей, по которым можно было бы определить пригодность масла к работе и наработку его до отказа. Для оценки состояния масла необходимо разработать и правильно выбрать систему показателей, в основу образования которых должен быть положен принцип сравнения. Система оценочных показателей должна быть единой для всех сортов картерных масел. При построении системы оценочных показателей необходимо знать их структуру и содержание. Все это позволит исключить субъективизм в оценке качества работающих картерных масел.

Уровень качества работающего масла можно оценивать двумя способами: совокупностью отдельных показателей и обобщающим показателем. Оценка по отдельным показателям необходима для выявления положительных и отрицательных сторон методов оценки качества масла, в данном слу-

чае суммарный оценочный показатель равен $\Pi_C = \sum \Pi_i$. Каждый из оценочных показателей должен иметь фактическое значение при выполнении процесса и эталонную величину, устанавливаемую соответствующими нормативами. Эталонная величина оценочного показателя – это тот уровень, с которым следует сравнивать фактическую величину показателя, на основании чего можно судить о качестве работающего масла.

Оценочные показатели работающего масла должны отображать степень изношенности его к моменту выбраковки. Нормативная величина – это такое значение того или иного показателя, при достижении которого масло считается непригодным для дальнейшего применения в двигателе и подлежит замене на свежее. При этом предполагается, что при достижении данной нормативной величины происходит заметное увеличение скорости изнашивания, образование нагароотложений или какое-либо другое изменение, влекущее за собой отказ масла.

Зная характер изменения оценочных показателей и их величины, можно произвести расчет коэффициентов качества масла (рис. 3.33) [31].

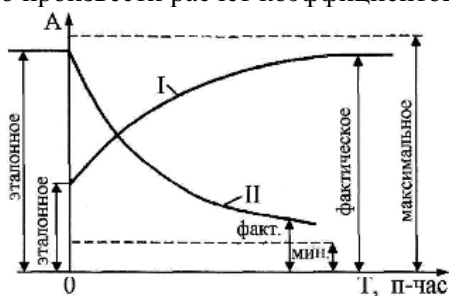


Рис. 3.33. Расчет коэффициентов качества масла

качества масла будет иметь следующий вид:

$$\eta_I = \frac{A_\phi}{A_\phi}, \quad (3.13)$$

где A_ϕ и A_ϕ – соответственно эталонное и фактическое значения показателей качества масла.

При изменении показателей по кривой II необходимо брать отношение фактических значений параметров к эталонным. Тогда уравнение коэффициентов качества масла имеет вид

$$\eta_{II} = \frac{A_\phi}{A_\phi}. \quad (3.14)$$

Оценка и контроль состояния масла в двигателе есть не что иное, как сохранение технического состояния и ресурса машины. Масло в двигателе несет очень важную функцию, выполняя роль одной из главных его деталей, и, как всякая деталь, имеет свои параметры, по которым в процессе работы производится оценка его внутреннего и внешнего износа. Поэтому изменение состояния масла можно представить в виде классической кривой

описывающей характер износа практически любой детали и отражающей промежутки времени (рис. 3.34) [31]. В то же время, в общем случае кривую изменения показателей качества масла можно представить в виде прямолинейных участков I, II, III (рис. 3.34). Это обстоятельство позволяет облегчить задачу расчета и оценки свойств и качества моторного масла. Для определения его состояния, а также наработки до отказа необходимо произвести расчет оценочных показателей качества продолжительности работы масла.

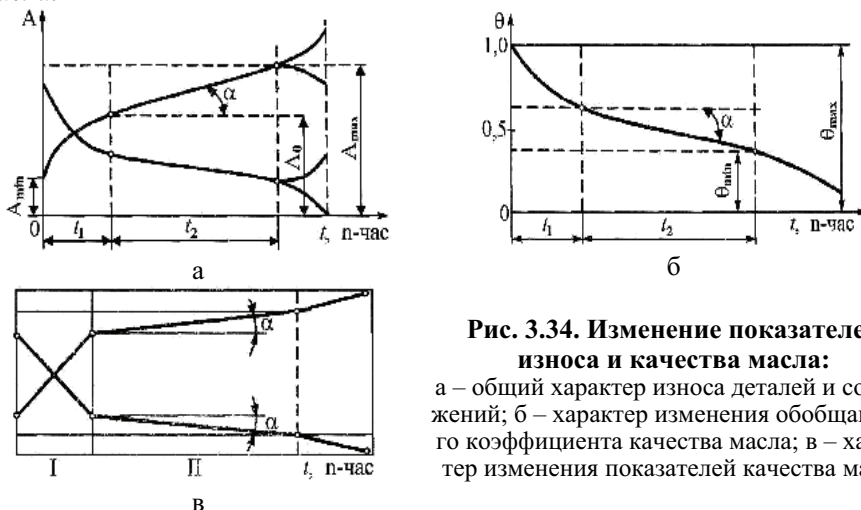


Рис. 3.34. Изменение показателей износа и качества масла:

а – общий характер износа деталей и сопряжений; б – характер изменения обобщающего коэффициента качества масла; в – характер изменения показателей качества масла

По мере изнашивания масла все показатели его качества ухудшаются, и значения коэффициентов стремятся к нулю, чем больше значение коэффициентов ближе к единице, тем лучше масло, тем дольше оно сохраняет свои функциональные свойства и дольше может использоваться в работе. Чем ближе значения коэффициентов к нулю, тем хуже масло, тем скорее оно будет подвергаться выбраковке и замене. Кроме того, исходя из величин относительных коэффициентов, необходимо найти такой обобщающий показатель, который реагировал бы на изменение всех факторов и давал наиболее полную комплексную оценку состояния моторного масла.

Таким образом, из указанного следует, что свойства качества моторного масла можно характеризовать коэффициентами, определяемыми из соотношения фактического и эталонного уровней.

Для нахождения обобщающего коэффициента рассмотрим вопросы оценки качества масла.

3.8.4.3. Расчет оценочных показателей продолжительности работы масла

Уровень качества масла можно оценивать совокупностью показателей, которые определяют его состояние в соответствующий промежуток времени. Для осуществления оценки работоспособности масла все показатели качества сводятся в группы, которые характеризуют основные свойства мо-

торного масла такие, как вязкостно-температурные, противоизносные, противокоррозионные и противонагарные.

В каждой группе один показатель наиболее точно отображает состояние масла по его свойствам. Группа I характеризуется показателями, непосредственно влияющими на состояние масла и износ трущихся поверхностей деталей, группа II – показателями, косвенно отображающими состояние масла. Подгруппа 1 характеризует вязкостно-температурные свойства, 2-3 – противоизносные свойства, 4 – противокоррозионные свойства, 5 – противонагарные свойства. На основании этого получим систему показателей для оценки свойств и качества моторных масел. Система показателей должна базироваться на трех основных принципах: количественном, качественном и экономическом, а также быть в своей основе общей для всех применяемых марок масел. Уравнения коэффициентов, характеризующих качество работающего масла, показаны в табл. 3.24 [31].

Таблица 3.24

Система показателей для оценки качества масла

Группа	Наименование коэффициента	Расчетное уравнение	Обозначение
I	1. Коэффициент вязкости	$\eta_v = \frac{v_s}{v_\phi}$	v_s и v_ϕ – эталонное и фактическое значение вязкости, мм ² /с
	2. Коэффициент содержания железа	$\eta_{Fe} = \frac{Fe_s}{Fe_\phi}$	Fe_s и Fe_ϕ – эталонное и фактическое содержание железа в масле, %
	3. Коэффициент светопропускаемости	$\eta_{СП} = \frac{СП_s}{СП_\phi}$	$СП_s$ и $СП_\phi$ – эталонная и фактическая светопропускаемость, усл. ед.
	4. Коэффициент коррозионной агрессивности	$\eta_{КА} = \frac{КА_s}{КА_\phi}$	$КА_s$ и $КА_\phi$ – эталонная и фактическая коррозионная агрессивность, усл. ед.
	5. Коэффициент концентрации ионов водорода	$\eta_{рН} = \frac{рН_s}{рН_\phi}$	$рН_s$ и $рН_\phi$ – эталонная и фактическая концентрация водородных ионов, ИОН/л
II	1. Коэффициент долговечности	$\eta_\tau = \frac{\tau_s}{\tau_\phi}$	τ_s и τ_ϕ – эталонная и фактическая долговечность масла, п-час

Конечной целью всех исследований моторных масел является обеспечение надежности и безотказной их работы с минимальным износом двигателя при длительном использовании масла без замены. Отсутствие в характеристике качества масел прямых эксплуатационных показателей значительно затрудняет решение вопроса об оптимальных сроках замены масла. Еще большие трудности возникают в связи с многообразием эксплуатационных факторов и влиянием индивидуальных качеств двигателей. На качество моторных масел при работе двигателей большое влияние оказывают многие факторы, которые не всегда можно учесть. Поэтому основой для оценки пригодности картерных масел к дальнейшей работе наиболее пра-

вильно, с технической точки зрения, будет являться смена масла в зависимости от величины значения обобщающего коэффициента качества.

Обобщающий коэффициент качества масла равен

$$\theta = \frac{\sum P_i \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (3.15)$$

где P_i – величина i -го коэффициента; n_i – количество i -ых коэффициентов.

Таким образом, рассмотренная система оценки является наиболее простой и общей для определения качества масла и совершенствования метода оценки продолжительности работы моторных масел.

3.8.5. Восстановление свойств моторного масла

3.8.5.1. Метод регенерации

Современная система смазки двигателей в процессе эксплуатации предусматривает по крайней мере две ступени очистки. Первой ступенью служит фильтр грубой очистки, устанавливаемый последовательно и очищающий все масла, циркулирующие в системе. В качестве второй ступени применяют обычно фильтры тонкой очистки или центрифуги.

Исследования показали, что глубокого изменения углеводородного состава в отработанных маслах не происходит, когда восстанавливают их свойства с помощью физико-химических методов регенерации (рис. 3.35) [31].



Рис. 3.35. Схема восстановления свойств масла

Регенерацию отработавших масел в промышленных, условиях осуществляют на установках, которые описаны далее.

Одним из наиболее широко распространенных методов очистки является сепарация. Метод основан на том, что под влиянием центробежных сил наиболее тяжелые загрязняющие примеси оттесняются к стенкам сосуда, образуя кольцевой слой. Метод сепарации предусматривает два способа очистки: способ центрифугирования и метод сепарации. Центрифугирование осуществляется в специальных масляных центрифугах.

Сепарирование масла производят в масляных сепараторах с отводом двух или трех фракций, образующихся при очистке масла.

На основании проведенного анализа технических средств для регенерации отработавших моторных масел было установлено, что все они отличаются сложностью и громоздкостью в конструктивном исполнении. Это в

свою очередь влечет за собой повышение затрат денежных средств и времени при восстановлении свойств регенерируемых моторных масел.

Выбирать направление регенерации и аппаратуры для этого необходимо с учетом состояния двигателя, условий его эксплуатации, качества применяемого моторного масла и т. п. Вопрос о выборе той или иной системы очистки масла должен рассматриваться, исходя прежде всего из технико-экономической целесообразности. Масло можно восстанавливать на регенерационной установке, оснащенной необходимым оборудованием. Тем более процесс очистки различных моторных масел каждым из существующих методов подчиняется общим закономерностям. С целью эффективного отделения продуктов старения масла и воды при минимальном отделении от масла присадок, минимальном объеме работ по обслуживанию (быстрое, не требующее сложных операций восстановление очистительных свойств) должна обеспечиваться постоянная пропускная способность и минимальное гидравлическое сопротивление оборудования в течение времени регенерации. По групповому углеводородному составу к физико-химическим свойствам регенерированные масла должны быть близки к соответствующим свежим.

Все агрегаты очистки должны удовлетворять следующим требованиям: невысокая стоимость, технологичность конструкции, малые габариты и вес, безотказность работы без обслуживания, высокая степень очистки.

В условиях предприятия с учетом условий работы масла в двигателях, предлагается следующий процесс регенерации:

- обработка масла, предварительно отстоянного от воды и крупных частиц загрязнений, коагулятором;
- удаление загрязняющих примесей, эмульсированной воды и шламов;
- смешивание регенерированного масла с присадками, свежими маслами.

При наличии в моторном масле одновременно большого количества воды и механических примесей приходится пользоваться простым комбинированным способом регенерации, обеспечивающим восстановление его эксплуатационных свойств. Было найдено, что путем обработки отработавшего масла поверхностно-активными веществами можно добиться укрупнения и уплотнения мелкодисперсных частиц, после чего происходит их интенсивный отстой. Центробежный метод очистки основан на принципе разделения жидкостей различной плотности и отделения нерастворимых примесей с большой плотностью под действием центробежных сил.

Принципиальным недостатком всех центрифуг является резкое ухудшение эффективности очистки при понижении температуры масла. Центробежная очистка моторного масла гидроциклоном имеет преимущества: избирательная способность, простота конструкции и обслуживания.

Для регенерации масел применяются коагулянты, приведенные в табл. 3.25 [31].

Коагулянты для регенерации моторных масел

Коагулянты	Концентрация, %	Расходное сырье, %	Зольность, %	Кислотность, мг·КОН/г
Серная кислота	96-98	0,5	0,003	0,14
Соляная кислота	38	0,5	0,035	0,12
Кальцинированная сода	10	0,5	0,006	0,08
Тринатрийфосфат	10	0,5	0,009	0,06
Жидкое стекло	плотность - 13	3,0	0,007	0,04
Окислительный нитролатум	10	2,0	0,025	0,30
Мыло хозяйственное	10	1,0	0,017	0,32
Стиральный порошок	10	1,0	0,10	0,30

Восстановление или регенерация различными способами свойств отработавших свой ресурс моторных масел создает большие возможности для экономии базовых смазочных масел.

3.8.5.2. Восстановление смазывающих свойств масел добавлением присадок

В настоящее время ряд научно-технических центров [66] активно разрабатывают новые направления в восстановлении условий смазывания пар трения путем применения специальных добавок в топливо и смазочные материалы на базе металлокерамических соединений. Такие добавки способны вступать во взаимодействие с контактирующими участками деталей и формировать на них покрытие, которое восстанавливает поверхности трения и обладает высокими антифрикционными и противизносными свойствами.

Разработчики препаратов рекомендуют обрабатывать двигатели автомобилей с пробега более 50 тыс. км и обычно в такой последовательности:

- 1) слить старое масло, промыть двигатель;
- 2) залить новое масло и прогреть двигатель до температуры охлаждающей жидкости 70-80°;
- 3) исключить подачу топлива в карбюратор и выработать из него весь бензин;
- 4) вывернуть свечи и через каждое свечное отверстие ввести в каждый цилиндр по 5-10 мл состава;
- 5) не вворачивая свечи, стартером 5-6 раз прокрутить двигатель в течение 10 с, каждый раз с интервалом между прокрутками 30-40 с;
- 6) ввернуть свечи, подать топливо в карбюратор и запустить двигатель;
- 7) оставшийся состав влить в заливную масляную горловину. Поднять обороты двигателя до 3500 мин⁻¹ и подержать их в течение 10-15 мин (по данным производителя это очень важный момент);

8) произвести замену масляного фильтра после пробега 1500-2000 км. Моторное масло можно не менять до 50 тыс. км, чем обеспечиваются наилучшие показатели обработки.

Некоторые производители рекомендуют более простую процедуру: просто доливать присадку в масло прогретого двигателя при его непрерывной работе в течение 10 мин.

Металлокерамический защитный слой, который образуется на поверхностях трения, может обладать уникальными триботехническими характеристиками:

- микротвердость 65-75 HRC;
- шероховатость 0,1-0,3 мкм;
- коэффициент трения 0,003-0,007;
- температура разрушения 1700-2000°.

Торгово-промышленная группа «Wagner», рекламируя смазочный материал с микрокерамикой, в присутствии клиента на специальной установке проводит опыт истирания ролика подшипника, который прижимается к вращающемуся валу с усилием 400 Н и смазываемого обычным маслом SAE30. В этих условиях при шестикратном увеличении нагрузки задиры в трущемся контакте не происходит.

По данным разработчиков применение присадки в двигателе и коробке передач дает экономию топлива до 15%, длительность защиты до 60 тыс. км, износ деталей уменьшается в два раза, сокращается расход масла, снижается шум в коробке передач и обеспечивается плавное переключение передач.

В отдельную и специфическую группу ремонтно-восстановительных препаратов могут быть выделены вещества, содержащие в своем составе наночастицы. Наибольшего успеха в этом направлении достигли японские ученые, создавшие микроскопический «подшипник», в котором потери на трение близки к нулю. Они настолько незначительны, что даже самые точные приборы не способны их зарегистрировать.

До недавнего времени было известно, что углерод образует три формы: графит, алмаз и карбин. В настоящее время стала известна и четвертая форма углерода, так называемый фуллерен алмаза. Его молекула содержит фрагменты с пятикратной симметрией (пентагоны), которые запрещены природой для неорганических соединений. Поэтому следует признать, что молекула фуллерена является органической молекулой, а кристалл, образованный такими молекулами, есть связующее звено между органическим и неорганическим веществом.

Алмазные наночастицы, в зависимости от условий применения, могут выступать либо в виде тончайшего абразива, либо эффективного модификатора трения. Оказалось, что алмазная шихта (промежуточный продукт получения наноалмазов) чрезвычайно эффективна в виде добавок к моторным и трансмиссионным маслам, консистентным смазкам и смазочно-охлаждающим технологическим жидкостям. Различный набор наночастиц оказывает сильное структурирующее действие как на поверхности трения, так и на смазочный материал, изменяя его реологические характеристики.

Добавление присадок с наночастицами в двигатели автомобилей после их пробега 100 тыс. км позволяет существенно продлить срок службы и ресурс агрегата.

Выпускаются ремонтно-восстановительные препараты комплексного действия: например, в одном флаконе реметаллизант и кондиционер металла или полимеросодержащий препарат и слоистая добавка. Однако следует иметь в виду, что применение разных препаратов одновременно, и даже поочередно в одном и том же агрегате может привести к нежелательным последствиям, исключая положительный эффект или даже снижающим ресурс деталей.

3.8.5.3. Взаимозаменяемость моторных масел

Моторные масла могут быть минеральными, синтетическими и полусинтетическими.

Минеральные моторные масла получают из масляных фракций нефти, **синтетические масла** – синтезом из органических соединений, обладающих низкой температурой застывания.

По сравнению с минеральными маслами, синтетические масла обладают стойкостью к окислению и малой испаряемостью, лучшими вязкостно-температурными свойствами и высокой экологичностью.

Преимущества синтетических масел особенно очевидны в высокофорсированных двигателях при эксплуатации автомобилей в экстремальных условиях. Однако синтетические масла дороже минеральных, хуже совмещаются с резиновыми изделиями, в них труднее растворяются присадки, некоторые их компоненты быстро распадаются при попадании воды.

Полусинтетические масла изготавливают на основе высококачественных минеральных масел с добавлением синтетических компонентов.

Полусинтетические масла существенно дешевле синтетических и имеют ряд преимуществ по сравнению с минеральными маслами. Они предпочтительнее при холодном пуске двигателя, отличаются меньшим расходом и большим сроком службы.

При выборе масла следует учитывать, что не всегда применение масла более высокого класса по сравнению с указанным в инструкции по эксплуатации автомобиля будет полезно для двигателя, так как конструкция двигателя, в частности его маслоочистительная система, рассчитана на определенный уровень диспергирующих свойств масла. Поэтому масла более высоких классов могут быть не совместимы с конструкцией данного двигателя.

В табл. 3.26 показано соответствие моторных масел по ГОСТ 17479.1-85 и масел по SAE J-300.

**Примерное соответствие классов вязкости моторных масел
по ГОСТ 17479.1-85 и масел по SAE J-300**

Класс вязкости		Класс вязкости	
по ГОСТ 17479.1-85	по SAE J-300	по ГОСТ 17479.1-85	по SAE J-300
33	5W	24	60
43	10W	33/8	5W-20
53	15W	43/6	10W-20
65	20W	43/8	10W-20
6	20	43/10	10W-30
8	20	53/10	15W-30
10	30	53/12	15W-30
12	30	63/10	20W-30
14	40	63/14	20W-40
16	40	63/16	20W-40
20	50		

**3.8.6. Расчетные методы определения структурных
и диагностических параметров**

По известным закономерностям изменения структурных и диагностических параметров можно прогнозировать ресурс работы механизма. Применительно к автомобилю как объекту диагностирования наибольшее распространение получили экспоненциальная и степенная зависимости изменения структурных (диагностических) параметров S от пробега l [58]:

$$S = S_0 \cdot e^{bl}; \quad (3.16)$$

$$S = S_0 + V l^n, \quad (3.17)$$

где S_0 – начальные (номинальные) значения параметра после приработки; b – коэффициент интенсификации изнашивания; v – скорость изменения параметра при $l=1$, уменьшенная в n раз; n – показатель степени.

В формулах (3.16), (3.17) значения b , v и n определяются методами математической статистики по экспериментальным данным величин износа исследуемых элементов в процессе эксплуатации. Например, изменение зазора в подшипниках коленчатого вала и сопряжениях клапан-коромысло двигателя подчиняется закономерности (3.17) при $n=1,4$ и $n=1,1$ соответственно.

Закономерность (3.16) более полно отражает физические основы процессов, происходящих в сопряжениях автомобиля с увеличением пробега. Интенсивность изнашивания α взаимодействующих деталей после приработки прямо пропорциональна давлению P на поверхности трения

$$\alpha = c \cdot P, \quad (3.18)$$

где c – коэффициент.

Если давление P в зоне контакта неизменно на всем периоде эксплуатации, то износ сопряженных деталей, нагруженных стационарно (статически), увеличивается линейно (рис. 3.36, зависимость 2), пропорционально пробегу

$$S = \alpha \cdot l \quad (3.19)$$

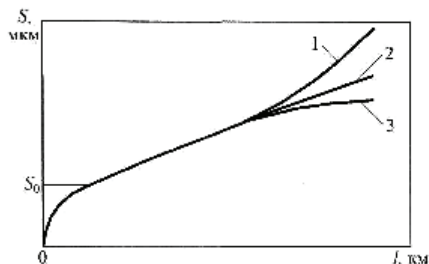


Рис. 3.36. Закономерности износа S сопряжений от пробега l :

1 – динамически нагруженных; 2 – статических; 3 – саморазгружающихся

- увеличением силового воздействия инерционно-динамических нагрузок вследствие износа, деформации деталей и нарушения пространственной ориентации кинематических связей между ними;

- ухудшением режима смазки, вызванного увеличенными зазорами, интенсификацией выделения тепла, деформацией условий образования масляного клина гидродинамического эффекта, большей насыщенностью смазочными продуктами износа и другими примесями.

Такие сопряжения называют динамически нагруженными. К ним относятся: втулка верхней головки шатуна-поршневой палец, подшипники скольжения коленчатого вала, зубчатые передачи, шлицевые и карданные сочленения агрегатов трансмиссии и многие другие.

Для третьей группы – саморазгружающихся, подпружиненных сопряжений типа поршневое кольцо-гильза цилиндра, давление на поверхности трения и после этапа приработки продолжает уменьшаться. Следовательно, их износ в зависимости от пробега экспоненциально убывает (рис. 3.36, кривая 3)

$$\Delta S = \frac{\alpha_0}{b} \cdot (1 - e^{bl}), \quad (3.20)$$

где α_0 – интенсивность изнашивания сопряжения в конце приработки.

На условия взаимодействия сопряженных деталей, а следовательно, на интенсивность изменения технического состояния влияют скорость относительного перемещения их трущихся поверхностей, нестационарность (переменность) режима, давление и температура в зоне трения. Поскольку первыми тремя параметрами в процессе эксплуатации управлять практически нельзя, то можно отметить лишь степень их влияния на износ пар трения.

Интенсивность изнашивания основных сопряжений двигателя и трансмиссии зависит от давления P в зоне трения и скорости v их относи-

тельного перемещения и возрастает по экспоненциально-убывающей зависимости

$$\alpha_p = \alpha + bp \cdot (1 - e^{CpP}); \quad (3.21)$$

$$\alpha_v = \alpha_v + b_v \cdot (1 - e^{CvV}), \quad (3.22)$$

где α , b и c – экспериментально полученные параметры (по величине больше нуля).

Для отдельно взятых деталей одноименных сопряжений в достаточной мере изучена динамика их изнашивания в процессе эксплуатации, представленная, например, зависимостями (3.16, 3.19, 3.20), а также методика определения технического состояния по известным структурным или диагностическим параметрам. Механизм достижения предельного технического состояния объектом, состоящим из кинематически соединенных одноименных звеньев, детали которых изнашиваются неравномерно, изучен недостаточно.

Интенсивность изнашивания сопряжений увеличивается из-за макрогеометрических отклонений формы деталей от оптимальной. Искажения геометрической формы и межосевых расстояний способствуют увеличению неравномерности работы трения на участках взаимодействия деталей и более частому разрушению сплошности масляного слоя. Особенно высокие требования по макрогеометрии предъявляются к подшипникам, шейкам коленчатого и распределительного валов, элементам ЦПГ, зубчатым передачам, которые испытывают переменные нагрузки по углу поворота коленчатого вала. Если, например, большая ось овала цилиндра, приобретенная в процессе изготовления и сборки двигателя, совпадает с осью плоскости качания шатуна, то интенсивность изнашивания и овализация цилиндра существенно возрастают. Из-за увеличивающейся овальности шеек и цилиндров в процессе эксплуатации средний ресурс вторых комплектов вкладышей и поршневых колец составляет менее 40 и 60% соответственно от ресурса первых.

Считается, что величина овальности шеек коленчатого вала прямо пропорциональна интенсивности изнашивания подшипников и в зависимости от пробега возрастает экспоненциально по 3.16 (рис. 3.37, а).

Зависимость овализации гильз цилиндров от пробега обычно аппроксимируют линейной функцией (рис. 3.37, б). По мере приближения к предельно допустимым значениям зазоров в сопряжениях ЦПГ наблюдается некоторая стабилизация нарастания износа и овализации гильз.

Влияние других видов макрогеометрических отклонений (конусности, корсетообразности) на интенсивность изменения технического состояния различных типов сопряжений аналогично действию овальности, но проявляется в меньшей мере, так как обусловлено в основном технологическими погрешностями изготовления (рис. 3.37, 3.38) [58].

Интенсификация использования переменных режимов ДВС увеличивает интенсивность изнашивания элементов автомобиля в 1,3-3 раза из-за воздействия пульсирующих тепловых потоков, вибрации, более частых нарушения сплошности масляной пленки между деталями при росте сил

инерции, возникновении гидравлических ударов при ускоренном сближении поверхностей, что усиливает расклинивающее действие в микротрещинах сопряжений, а также при несоответствии теплового режима деталей ЦПГ изменению скорости и нагрузки. Влияние нестационарности скоростного и нагрузочных режимов на износ деталей двигателя ЗИЛ-130 видно на рис. 3.38, в. Характер кривых изменения изнашивания деталей КШМ от частоты и амплитуды колебаний скоростного и нагрузочного режимов двигателя достаточно точно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью [58].

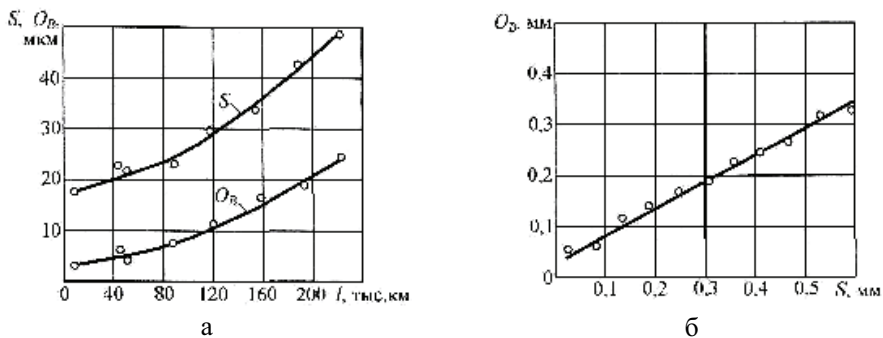


Рис. 3.37. Зависимости износа:

а – зависимость износа S и овалности O_B шатунных шеек от пробега l двигателя КамАЗ-740; б – зависимость овальности цилиндра дизеля Д60 от его диаметрального износа S

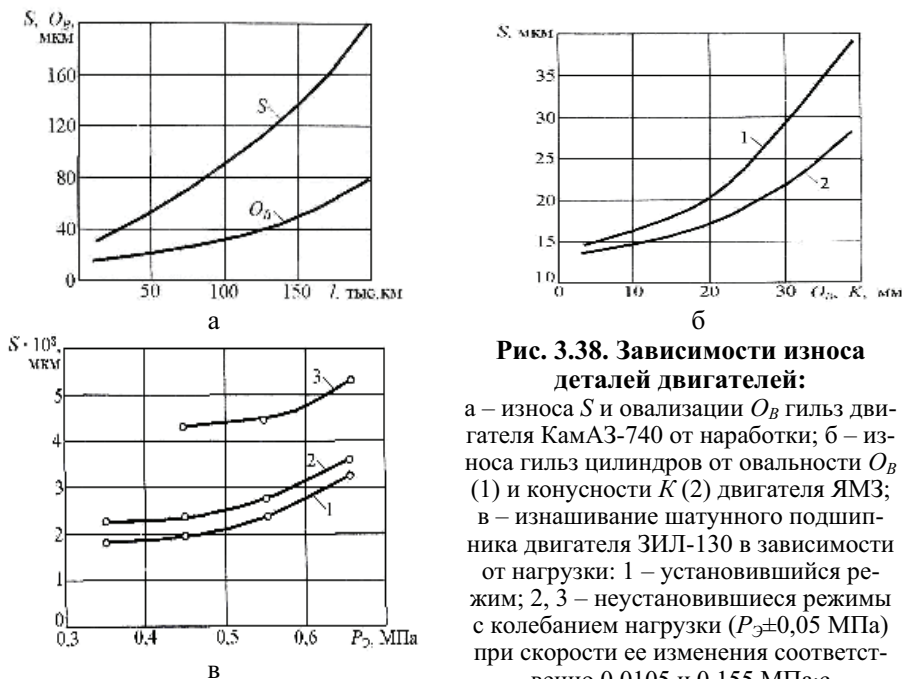


Рис. 3.38. Зависимости износа деталей двигателей:

а – износа S и овалности O_B гильз двигателя КамАЗ-740 от наработки; б – износа гильз цилиндров от овалности O_B (1) и конусности K (2) двигателя ЯМЗ; в – изнашивание шатунного подшипника двигателя ЗИЛ-130 в зависимости от нагрузки: 1 – установившийся режим; 2, 3 – неустановившиеся режимы с колебанием нагрузки ($P_2 \pm 0,05$ МПа) при скорости ее изменения соответственно 0,0105 и 0,155 МПа·с

Одним из определяющих факторов изменения технического состояния автомобиля является тепловой режим работы агрегатов, оцениваемый по температуре масла в картере и охлаждающей жидкости в двигателе. В зависимости от температуры масла в картере интенсивность изнашивания сопряжений изменяется нелинейно и имеет минимум. Неоднозначность параметра обусловлена особенностями вязкостно-температурной характеристики масла и различным его расходом через пары трения при изменении температуры.

Зависимость интенсивности изнашивания от температуры масла (охлаждающей жидкости) весьма сложная. Оценивают ее только на основе экспериментальных данных. Для практических целей рекомендована зависимость

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha \cdot t_M + c \cdot e^{-b \cdot t_M}, \quad (3.23)$$

где α_0 – интенсивность изнашивания поверхности трения при $t_M=0$; α , b и c – экспериментально полученные параметры, характеризующие свойства масла, состояния узла трения, скоростной и нагрузочный режим. Для определения зоны оптимальной температуры масла необходимо продифференцировать (3.23), тогда

$$t_M^{opt} = \frac{1}{b} \ln \frac{a}{b \cdot c}, \quad (3.24)$$

Обычно для автотракторных агрегатов t_M^{opt} колеблется в пределах 75–95°C.

Тепловой режим ДВС и других агрегатов в процессе эксплуатации может изменяться в широких пределах, реагируя главным образом на изменение технического состояния их элементов, температуру окружающей среды и неисправности системы охлаждения.

Поддержание оптимального теплового режима существенно снижает интенсивность изнашивания, мощность механических потерь и расход топлива в системе «ДВС-трансмиссия». Автоматические системы стабилизации теплового режима обычно ориентированы на поддержание оптимальной температуры охлаждающей жидкости, при этом считаются идентичными температура охлаждающей жидкости и масла. Поэтому у большинства двигателей датчики контроля температуры масла t_M отсутствуют. Экспериментальные исследования теплового состояния ДВС большой группы автомобилей с помощью датчика ТМ-100, вмонтированного на место сливной пробки масляного картера, показали, что в реальных условиях эксплуатации разность значений температуры $t_{охл}$ и t_M достигает 20 °С и более. Поэтому контроль и учет температуры масла в картере ДВС является необходимым, особенно при проведении диагностических работ.

Таким образом, процесс изнашивания сопряжений представляет собой сложную функцию многих взаимозависимых факторов, основными из которых являются значения исходного зазора S и макрогеометрических отклонений формы их поверхностей Φ , свойства смазочного слоя μ и наличие в нем абразивных частиц z , средние значения температуры t , давления и ско-

рости относительного перемещения деталей в зоне контакта v и их нестационарность (переменность) изменения во времени по амплитуде A и частоте f [58]

$$\alpha = f(S, \Phi, \mu, z, t, p, v, A, f) \quad (3.25)$$

Многогранную их связь и влияние на изменение технического состояния сопряжений в процессе эксплуатации можно отобразить стохастической моделью динамики процессов изнашивания в виде постоянной S_0 , систематической $\Delta S(l)$ и случайной $\Delta \dot{S}(l)$ составляющих

$$S(l) = S_0 + \Delta S(l) + \Delta \dot{S}(l), \quad (3.26)$$

где $S(l)$ – значения износа (зазора) сопряжения при пробеге l ; S_0 – значения зазора в сопряжении после приработки; $\Delta S(l)$ – приращение износа от наиболее существенных, доминирующих и поддающихся учету факторов, характеризующиеся среднестатистическими данными для конкретных условий эксплуатации; $\Delta \dot{S}(l)$ – стохастическая составляющая приращения износа от причин, определяющих индивидуальные особенности условий работы сопряжения. Первые две составляющие (3.26) по сути являются детерминированной компонентой, для которой можно построить адекватную математическую модель по идентификации ее на основе целенаправленно полученных экспериментальных данных. Детерминированная модель определяет тенденции изменения технического состояния объекта в будущем. Окончательную оценку технического состояния дают после конкретизации стохастической составляющей $\Delta \dot{S}(l)$ по результатам последовательно выполненных (через определенный пробег) диагностирований.

Поэтому управление процессом изнашивания и поиски путей снижения его интенсивности возможно осуществить только при наличии фактических экспериментальных данных.

Трудности возрастают, когда речь идет об агрегатах и прежде всего ДВС, имеющих в своем составе одноименные элементы, техническое состояние которых взаимозависимо, а внутренняя эволюция их трибосистемы трансформируется в процессе эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Какие комплексные показатели достаточно точно характеризуют работоспособность масел?
2. Какие значения изменения исходной кинематической вязкости являются браковочными?
3. Какие значения механических примесей (загрязнения) являются браковочными?
4. Какой угар масла (%) является браковочным признаком?
5. Какой показатель коксуемости (%) масла принят для его замены свежим?
6. Какими способами оценивают качество масел?
7. Какая конечная цель оценки (исследований) качества масла?

8. Какие существуют способы восстановления моторных масел?
9. Какая последовательность замены масла в двигателе при использовании при-
садок является оптимальной?
10. Какие основные принципы взаимозаменяемости моторного масла?

3.9. Программные, логические и автоматизированные методы контроля и диагностирования

3.9.1. Алгоритмы и программы диагностирования электромеханических систем

Алгоритмы диагностирования представляют собой последовательность действий по оценке выбранных прямых и косвенных диагностических показателей. Они позволяют определять последовательность выполнения контроля отдельных конструктивных частей (блоков) объекта при поиске диагностических признаков дефектов и неисправностей, характеризующих работоспособность всего объекта или его отдельного блока при обнаружении в нем неисправностей; операции при обработке полученной информации. Принцип построения алгоритмов во многом зависит от вида диагностической модели. Они могут строиться на основе статистических данных, характеризующих надежность объекта и стоимость выполнения отдельных операций, или исходя из анализа структуры и особенностей функционирования объектов диагностирования.

Программа диагностирования представляет собой совокупность алгоритмов по определенному принципу. К основным принципам объединения алгоритмов относятся: последовательный, параллельный и смешанный. При построении программы диагностирования по одному из указанных принципов ставится задача – определить минимальное число N_{min} ветвей программы, исходя из следующих условий: время ее выполнения не должно превышать допустимого, показатель готовности объекта не должен быть ниже требуемого.

Чаще всего построение программ диагностирования осуществляют двумя способами: на основе **теории расписаний** либо **комбинаторного подхода**.

В первом случае программу диагностирования рассматривают как оценку множества признаков, характеризующих состояние объекта. Для каждого из них организуется определенная последовательность операций, которые характеризуются временем выполнения. Программа диагностирования представляется в виде расписания, определяющего эту последовательность. Во втором случае задачу построения программы диагностирования рассматривают как выполнение комплекса операций с помощью определенного ограниченного объема технических средств диагностирования. Каждое из них может выполнять соответствующий набор операций. Программа диагностирования представляется в виде **маршрута**, определяющего последовательность использования технических средств диагностирования.

Сложные технические объекты автотракторной техники состоят из разнородных частей (структурных единиц, блоков), которые следует диагностировать через различные промежутки времени. В подобных случаях программа диагностирования должна учитывать различные периоды контроля структурных единиц.

Программу составляют в два этапа. На первом группируют отдельные блоки по периодам их контроля, а на втором определяют последовательность этапов контроля. Если в качестве показателей, характеризующих безотказность отдельных частей технического объекта, использовать интенсивность отказов, а для характеристики их контролепригодности – длительность диагностирования, то можно построить программу для всего объекта, ориентируясь на обеспечение требуемой величины отсутствия в нем дефекта (неисправности) в заданный момент времени.

3.9.2. Системы автоматического контроля и диагностирования

Технический контроль и диагностика двигателя осуществляется органами чувств и мышления человека, ручными, автоматизированными и автоматическими, механическими и электронными средствами. Все эти операции оценки технического состояния можно разделить на два основных метода технического контроля и диагностирования.

Общий процесс технического диагностирования включает в себя: обеспечение функционирования объекта на заданных режимах или тестовое воздействие на объект; улавливание и преобразование с помощью датчиков сигналов, выражающих значения диагностических параметров; их измерение; постановку диагноза на основании логической обработки полученной информации путем сопоставления с нормативами.

Диагностирование осуществляется либо в процессе работы отдельного двигателя или самой машины на заданных нагрузочных, скоростных и тепловых режимах (функциональное диагностирование), либо при использовании внешних приводных устройств (стендов с беговыми барабанами, передвижных и переносных устройств и приспособлений), с помощью которых подаются тестовые воздействия (тестовое диагностирование). Эти воздействия должны обеспечивать получение максимальной информации о техническом состоянии двигателя машины при оптимальных трудовых и материальных затратах.

Например, мощностные показатели проверяются на режиме максимального крутящего момента, экономические показатели – на режиме, соответствующем реализации контрольного расхода топлива и т. д.

Системы автоконтроля (бортовые или внешние механические или электронные) устанавливают соответствие между состоянием объекта контроля и заданной нормой без непосредственного участия человека. Необходимым условием осуществления автоконтроля в любом его применении является знание установленной нормы. Норма может быть выражена в количественной и качественной форме.

Системы автоконтроля представляют собой комплекс устройств, осуществляющих автоматический контроль одной величины или большого их количества, которые требуют значительной обработки информации для оценки отклонений от установленной нормы. Например, оценка технического состояния в результате статистической обработки результатов контроля параметров.

К автоконтролю относится автоматический поиск и локализация неисправностей. При этом устанавливается соответствие между состоянием объекта контроля и заданной нормой, то есть только факт работоспособного и неработоспособного состояния (параметры в норме или за пределами нормы).

В ряде случаев при автоконтроле, в отличие от автоматических измерений, нет необходимости знать численные значения контролируемых величин. Достаточно установить значение абсолютного или относительного допуска на отклонение от нормы, например, не более чем на 5, 10, 20% или 10-15%. Отклонение за пределы установленной нормы вызывают предупредительный, аварийный или другие сигналы. Формирование таких сигналов является одной из главных функций автоконтроля.

В подавляющем большинстве случаев системы автоконтроля совмещают функции контроля и измерений, являются контрольно-измерительными системами. Они выполняют функции контроля, а в случае необходимости расширить информацию о контролируемом параметре осуществляют процесс измерения. Так в системах контроля технического состояния объектов диагностирования допустимые значения контролируемого параметра разбивают на классы: «хорошо», «допустимо», «требует принятия мер», «недопустимо». В таких случаях текущие значения (измерения) параметра могут качественно и количественно определять техническое состояние объекта.

Системы автоматического контроля, в которых имеются два устройства сравнения типа «больше-меньше», называются системами допускового контроля.

В подобных системах возможно изменение зоны (уставки) в процессе контроля, при этом создается представление о степени близости контролируемой величины к интересующему состоянию. Такие системы принято называть системами спорадического контроля.

В системах технической диагностики ставится более сложная задача: не только установление факта работоспособности, но и нахождение местоположения отказа и локализация неисправностей. Это достигается специальными методами и способами поиска неисправностей, которые реализуются алгоритмами диагностики. Восстановление отказавшей системы или устройства в результате нахождения места повреждений достигается в современной аппаратуре заменой отказавшего модуля работоспособным. Разделение на типовые модули упрощает поиск неисправностей и эксплуатацию аппаратуры.

Общее число возможных состояний объекта контроля при разделении его на N функциональных элементов для принятых условий поиска равно

$$S=2N-1. \quad (3.27)$$

Определение такого большого числа состояний даже при $N>1$ связано с техническими трудностями. Поэтому ограничиваются предположением, что отказал только один из N функциональных элементов, то есть ограничиваются одиночными отказами, число которых равняется

$$S_0 = C_N^1 = N. \quad (3.28)$$

Функциональные модели являются удобной формой представления объекта контроля для поиска неисправностей во многих аналоговых и дискретных устройствах, за исключением, например, резервированных систем. В последнем случае используется логическая модель объекта контроля, которая строится также на основе структурной схемы. Отличие заключается в том, что входные и выходные сигналы рассматриваются как логические переменные, принимающие только два возможных значения: 0 и 1.

Состояния объекта контроля определяются путем формального применения алгебры логики. Для поиска неисправностей применяются методы: последовательный, комбинационный и различные сочетания последовательно-комбинационного метода, в соответствии с которыми разрабатывается программа поиска.

Последовательный метод. Последовательный метод заключается в таком построении процедуры поиска неисправностей, при котором информация о состоянии отдельных функциональных элементов вводится и логически обрабатывается последовательно. Реализация метода заключается в основном в определении очередности контроля выходных параметров функциональных элементов. Программа поиска при этом может быть жесткой или гибкой. По жесткой программе контроль выходных параметров функциональных элементов осуществляется в заранее определенной последовательности. В отличие от этого по гибкой программе содержание и порядок последующего контроля зависят от предыдущих результатов. Такая программа требует более сложной логической обработки результатов контроля и применяется в комплексе с более производительными ЭВМ.

Системы для автоматического поиска неисправностей относят к отдельному классу систем технической диагностики, то есть они отличаются более сложной логической частью, реализующей способы поиска неисправностей. Включение датчиков и структура системы технической диагностики в остальном существенно не отличаются от систем автоконтроля или от измерительных систем.

Прежде всего для автоматического поиска неисправностей системы или устройства должны обладать следующими свойствами (условиями для поиска):

- могут находиться только в двух взаимоисключающих различных состояниях: работоспособном и неработоспособном (1 или 0);
- могут быть разделены на отдельные функциональные элементы, каждый из которых может одновременно находиться только в работоспособном или неработоспособном состоянии (1 или 0).

В связи с неограниченным разнообразием подлежащих диагностике устройств задачи автоматического поиска неисправностей можно решить только путем составления их упрощенных моделей и разработки методов диагностики на модели. Наиболее часто устройства представляют в виде функциональной или функционально-логической модели. Функциональная модель объекта контроля может отличаться от структурной схемы выбором функциональных узлов и элементов. Так, при построении обычной структурной схемы исходят из закономерностей процессов, описывающих работу двигателя, устройства. При построении функциональной модели для поиска неисправностей выбор функциональных элементов (узлов) определяется точностью локализации неисправностей (например с точностью до одного модуля).

Функциональная модель строится при определенных предположениях, которые в основном сводятся к тому, что для каждого функционального элемента заданы номинальные значения входных и выходных сигналов, их функциональная зависимость и способ контроля. Функциональный элемент считается неисправным, если при его номинальных входных сигналах выходные сигналы отличаются от номинальных.

Комбинационный метод. Данный метод требует более сложной обработки, так как вначале вводятся все результаты контроля параметров, а затем они логически обрабатываются. Для реальных систем возможно большое разнообразие программ поиска неисправностей, требуются большой объем исходной информации о состоянии объектов контроля и сложная логическая обработка результатов контроля. Поэтому разработаны приближенные способы построения оптимальных программ поиска неисправностей. Эти программы в основном представляют собой многошаговый процесс поиска с выбором на каждом шаге лучшего варианта по экстремуму заданной функции предпочтения.

Далее перечислены некоторые распространенные способы построения программ поиска неисправностей:

- способ последовательного функционального анализа;
- половинного разбиения;
- «время-вероятность»;
- с применением информационного контроля;
- построения программ методом ветвей и границ;
- построения программы поиска по иерархическому принципу;
- инженерный.

Способ последовательного функционального анализа был одним из первых способов построения программ поиска неисправностей. Прежде всего при этом способе определяются основные функции: генерирования сигналов на выходе устройства; приема и преобразования сигналов; отображения сигналов; управления; электропитания и др. Выполнение этих функций позволяет считать, что и все устройство выполняет поставленные перед ним задачи.

Контроль работоспособности всего устройства зависит от контроля за выполнением всех перечисленных функций. Для этого выбирают и контро-

лируют параметры, от которых зависит выполнение основных функций. И если одна из перечисленных функций не выполняется по одному из контролируемых параметров, возникает задача поиска неисправностей. При этом параметр, вышедший за границы допусков, рассматривается как функция других аргументов. Схему поиска неисправностей называют деревом функций.

Автоматический поиск неисправностей в сложных системах относится к интересным и быстроразвивающимся направлениям в науке и технике.

3.9.3. Классификация программных методов диагностики электронных технических систем

Программные методы контроля и диагностики применяются для оценки работоспособности микро-ЭВМ и систем, содержащих микро-ЭВМ, компьютеризованные системы, например, цифровых САУ. Достаточно полная схема классификации этих методов приведена на рис. 3.39.

Применение программных методов контроля и диагностики предполагает, что сами программы написаны безошибочно и, следовательно, ошибка во время выполнения программы свидетельствует об отказе или сбое в работе самой цифровой системы.

В соответствии с рассматриваемой классификацией программные методы делятся на три большие группы. К первой группе относятся методы программно-логического контроля, ко второй – методы алгоритмического контроля и к третьей группе – методы тестового контроля и диагностики.

Методы программно-логического контроля основаны на использовании информационной избыточности и предназначены для контроля правильности обработки информации в компьютеризованной системе. Информационная избыточность достигается путем включения в алгоритмы вычислений некоторых дополнительных логических соотношений, позволяющих обнаруживать и исправлять возникающие ошибки.

Существует три направления программно-логического контроля [38].

В первом направлении реализуются методы контроля хода выполнения программы, во втором – методы логического контроля, и в третьем – методы контроля повторным счетом.

Методы контроля хода выполнения программы основываются на контроле правильности выполнения линейных и циклических участков программ, разветвлений, правильности обращения к другим программам и т. п.

Контроль линейных участков программ заключается в контроле факта выполнения данного участка. Каждому линейному участку программы перед его выполнением присваивается свой код, который запоминается, например, 0001. В конце выполняемого участка программы осуществляется контроль на «свой» код и, если, например, код в конце участка равен 0010, что не соответствует коду начала выполняемого участка, то это говорит о том, что произошел отказ или сбой аппаратуры и был выполнен не тот участок программы. Данный метод целесообразно применять для больших участков программ.

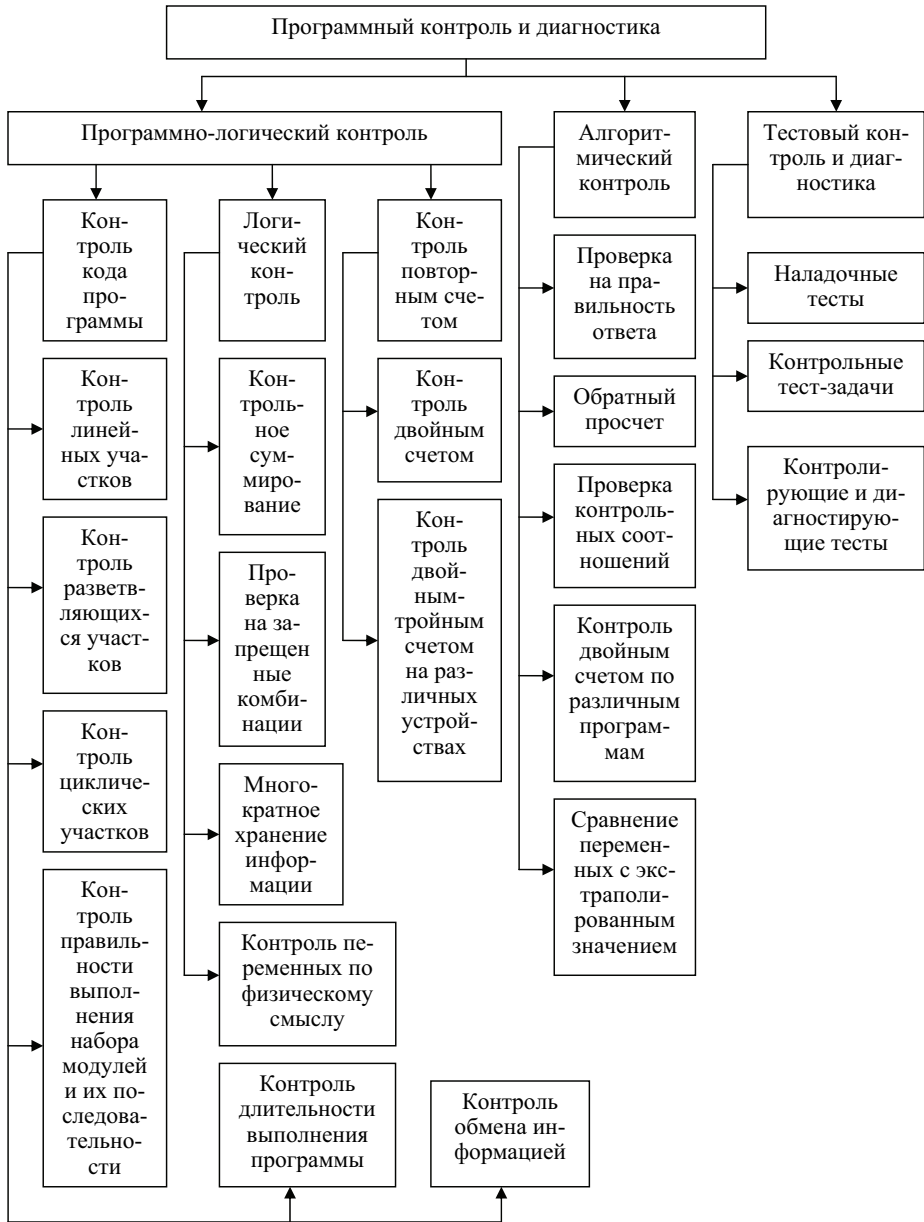


Рис. 3.39. Классификация методов контроля и диагностирования

Контроль разветвляющихся участков программ служит для контроля работы узла разветвления. Здесь возможны ошибки в виде неправильного выполнения условий разветвления и возможности попадания не на тот участок программы. Контроль правильности работы узла можно осуществить после выполнения программой узла разветвления внутри каждой из ветвей,

на которые данный узел делит программу. Для этого внутри каждой ветви вторично нужно проверить условия разветвления. Если вторично условия разветвления подтвердились, то узел разветвления работает правильно, в противном случае имеет место ошибка в работе узла. Вместе с тем возможна ситуация, когда повторный контроль подтвердит правильность работы узла разветвления, а на самом деле имеет место ошибка. Это может произойти в том случае, когда после выполнения узла разветвления начинает работать совсем другой участок программы. Например, после узла разветвления программа делится на две ветви. А программа попала на некоторую третью ветвь, соответствующую другому участку. Контроль факта реализации «нужной» ветви можно осуществить, заранее присвоив каждой из ветвей свой код. И тогда перед выполнением узла разветвления иницируется этот код, который перед началом выполнения ветви сопоставляется с кодом, который соответствует данной ветви программы.

Контроль циклических участков программы заключается в контроле количества циклов. Необходимо отметить, что существуют циклические участки программ с заранее известным и заранее неизвестным количеством циклов. Если количество циклов заранее известно, то контроль сводится к подсчету числа циклов и сравнению с заданным. Если же количество циклов заранее неизвестно, то и в этом случае контроль может быть осуществлен путем ограничения времени выполнения циклического участка программы и сравнения текущего времени с заданным. Таким образом выявляются ошибки, приводящие к «зацикливанию» программы.

Контроль правильности выполнения набора модулей программы сводится к запоминанию кодов, соответствующих каждому модулю выполняемой программы и последующим их сравнением с заранее заданными. При совпадении можно быть уверенным, что была выполнена вся группа моделей и в заданной последовательности.

Контроль длительности выполнения модуля программы осуществляется с использованием счетчиков времени. Тогда при правильной работе модуля его время выполнения не должно превышать заданное.

Во втором направлении программно-логического контроля рассматриваются логические методы. Эти методы основываются на сравнении тех или иных параметров, присущих контролируемой программе и хранимой или передаваемой информации, а также на сравнении результата с контрольными соотношениями. Контрольное суммирование осуществляется путем нахождения суммы всех признаков (обычно поразрядное суммирование признаков по модулю два), контролируемой программы, массивов хранимой или передаваемой информации и т. п. заранее. Во время выполнения программы, считывания хранимой информации или ее передачи также находится контрольная сумма, которая сравнивается с запомненной ранее. При совпадении этих контрольных сумм можно утверждать в правильности работы аппаратуры.

Контроль переменных на появление запрещенных комбинаций заключается в сравнении рассматриваемой переменной с заранее запрещенными или разрешенными множествами значений этой переменной. Это достаточ-

но простой и эффективный способ контроля находит свое применение в алгоритмах работы бортовых систем управления, когда выработка запрещенного управляющего воздействия может привести к непоправимым результатам.

Контроль с помощью многократного хранения информации осуществляется следующим образом. Один и тот же массив информации (это может быть программа, исходные данные или любая необходимая информация) дублируется и записывается в разных местах оперативной памяти или во внешнюю память. Контроль заключается в периодическом сравнении дублированных массивов. Если таких массивов будет три, то искаженная информация может быть восстановлена.

Метод контроля переменных на соответствие физическому смыслу в некотором смысле похож на метод контроля переменных на появление запрещенных комбинаций. Так, например, при расчете скорости движения автомобиля в бортовой ЭВМ эта скорость не может быть отрицательной величиной. Появление отрицательных значений говорит об ошибке в работе аппаратуры. В этом случае указанные два метода одинаковы. Однако возможна другая ситуация, когда скорость движения была стабильна и вдруг моментально возросла или уменьшилась на существенную величину, что противоречит физическому смыслу. Метод контроля переменных на соответствие физическому смыслу также находит применение в бортовых системах.

Третье направление методов программно-логического контроля посвящено различным методам на основе повторного счета. Сущность методов контроля повторным счетом заключается в том, что расчеты по программе, действия по передаче информации и т. п. повторяются (иногда многократно) и результаты сравниваются между собой. Методы контроля повторным счетом находят широкое применение вследствие простоты реализации, хотя и увеличивается время выполнения основной программы.

Контроль двойным-тройным счетом заключается в том, что расчеты по программе или передача информации осуществляются дважды. Совпадение результатов говорит о правильности работы программы. Если же совпадения не произошло, то программа выполняется третий раз и результат сравнивается с первыми двумя. Если третий полученный результат совпадает с одним из первых двух, то он признается верным и делается вывод о том, что в аппаратуре имел место сбой.

Контроль двойным счетом на различных устройствах эффективен, однако требует наличия таких устройств. В современных системах такой метод может быть реализован, так как они обычно содержат резервный вычислитель, находящийся в «горячем» резерве, на котором получают контрольный результат, который сравнивается с результатом основной системы. При несовпадении результатов можно повторить выполнение программ на основном и резервном вычислителе и их сравнение. Возможно осуществление, если это возможно, расчетов на третьем вычислителе или применение иных методов контроля.

Методы программно-логического контроля не позволяют выявлять отказы в работе ЭВМ, кроме метода двойным счетом на различных устройств-

вах, так как в этом случае происходит потеря работоспособности ЭВМ и невозможен ни контроль длительности выполнения программы, осуществляемый самой ЭВМ, ни вычисление предельных значений параметров. То есть неисправная ЭВМ сама себя контролировать не может. Эти методы позволяют выявить лишь сбои в работе аппаратуры, что несколько ограничивает их практическую значимость. Достоинством же рассмотренных методов является простота их технической реализации.

Методы алгоритмического контроля базируются на тех или иных математических особенностях решаемых задач. Контроль на основе контроля попадания в область ответа предполагает сравнение полученного результата с множеством возможных значений из области правильного ответа. И если результат расчетов по программе попал в область ответа, то он признается верным.

Контроль методом обратного счета заключается в том, что по полученному результату находят исходные данные и сравнивают их с начальными исходными данными. Если результаты прямого и обратного счета совпадают, то полученный результат считается верным. Данный метод может оказаться эффективным, если алгоритм обратного счета будет не сложнее алгоритма прямых вычислений.

Контроль контрольных соотношений заключается в установлении некоторой функциональной связи между переменными, участвующими в вычислениях, и контроле выполнения этой связи. Например, если производятся расчеты по программе обращения матрицы, то для нахождения такой функциональной связи может послужить тот факт, что при умножении матрицы на обратную мы получаем единичную матрицу. Если такая функциональная связь подтвердится, то расчеты были выполнены правильно. Данный метод может с успехом применяться, если удастся найти достаточно простой алгоритм функциональной связи.

Контроль двойным счетом по различным программам состоит в том, что одна и та же задача решается дважды. Первый раз по основному алгоритму, а второй по упрощенному, или как его еще называют «усеченному». Если результаты с заданной точностью совпали, то работа программы по основному алгоритму признается верной. В противном случае процедура контроля повторяется и по результатам контроля принимается решение. Если снова обнаруживается ошибка то либо за верные принимаются результаты упрощенного алгоритма, так как он быстрее выполняется и вероятность сбоя меньше, либо принимается иное решение, например, переключение на резервную аппаратуру. Пусть на ЭВМ решается задача фильтрации шума $n(t)$, наложенного на полезный сигнал $x(t)$, при этом полный алгоритм реализует, например, метод наименьших квадратов. «Усеченный» же алгоритм предполагает прямое прохождение искаженного сигнала без всякой фильтрации. При различии результатов вычисления более чем на определенную наперед заданную величину, расчеты по основному алгоритму считаются неверными. Данный метод контроля находит распространение в современных САУ.

Контроль сравнением переменной с экстраполированным значением применяется в цифровых системах управления и заключается в том, что на каждом шаге выработки управляющего воздействия вычисляются два его значения. Одно значение вычисляется при работе основного алгоритма, реализующего закон управления, а другое экстраполируется по нескольким предыдущим значениям сигнала управления. Найденные значения сравниваются между собой и если величина ошибки не превышает заданную, то считается, что система работает исправно.

Последняя группа методов содержит методы тестового контроля и диагностики. Тестовый контроль предназначен для контроля работоспособности, а диагностика предполагает отыскание места отказа в аппаратуре. Необходимо отметить, что между контролирующими и диагностическими тестами нет четкой границы и диагностические тесты обычно строятся на базе контролирурующих.

На вход контролируемой системы подается тестовый входной сигнал, а на выходе фиксируется реакция, которая сравнивается с эталонной. При наличии отказа происходит отклонение реакции от эталона.

Метод тестового контроля и диагностики предполагает прекращение решения основной задачи на время подачи тестового сигнала. Однако, в некоторых случаях при незначительном уровне тестового сигнала по сравнению с рабочим сигналом возможна одновременная подача на диагностируемую систему и рабочего, и тестового воздействий. На выходе диагностируемой системы реакции на эти сигналы разделяются, и реакция на тестовое воздействие сравнивается с эталоном.

По назначению контролирующие тесты можно разделить на наладочные тесты, контрольные тест-задачи и собственно контролирующие тесты. Наладочные тесты служат для наладки цифровых устройств в процессе ввода их в эксплуатацию. Это, как правило, небольшие по своему объему кодовые комбинации, предназначенные для контроля отдельных блоков, узлов и элементов аппаратуры. Анализ выходных кодовых комбинации позволяет обнаружить те или иные неисправности в аппаратуре.

Контрольные тест-задачи служат для оперативного контроля работоспособности цифровых устройств и отличаются от наладочных тестов существенно большим объемом контроля. Эти тесты применяются в процессе работы аппаратуры, прервав ход основной задачи на время контроля. Обычно с помощью тест-задач осуществляется достаточно полный контроль всех устройств аппаратуры в режиме, наиболее близком к режиму реальной работы.

Собственно контролирующие тесты применяются при подготовке цифровых устройств к работе, при проведении профилактических мероприятий и т. п. Эти тесты обладают максимально полной глубиной, а потому бывают объемными и длительными. Для ЭВМ контролирующий тест содержит тесты контроля процессора и его отдельных устройств, тесты контроля как оперативной так и внешней памяти и т. п.

3.9.4. Разработка программного диагностического обеспечения

Здесь мы рассмотрим упрощенный подход к разработке программного диагностического обеспечения. Разработка программ диагностического обеспечения сложных объектов на современных языках программирования приведены в работе [19].

Первой задачей при разработке диагностического обеспечения является выбор микро-ЭВМ, пригодной для проектирования системы диагностирования и управления машиной. Поскольку выбор микро-ЭВМ определяет характеристики системы, необходим тщательный анализ схем управления, выполненных на базе той или иной микро-ЭВМ и на основе этого анализа выбор оптимального варианта.

Одноразрядные микро-ЭВМ – это весьма специфичные устройства, которые совершенно не годятся для численных операций и используются лишь для логической обработки и выполнения функций таймера. Однако для решения указанных задач их с большой эффективностью можно использовать в автомобильной аппаратуре. Наибольшее распространение в автомобильной электронике получили 4- и 8-разрядные микро-ЭВМ. Если сравнить эти два класса, то следует отметить, что 4-разрядные микро-ЭВМ обладают явным преимуществом при выполнении логических операций, для чего они оснащены большим набором команд. Восемьразрядные микро-ЭВМ уступают им по количеству команд логической обработки и эффективность их в этом смысле ниже. Однако, что касается арифметических операций, то здесь ситуация меняется на противоположную, поскольку набор команд в 4-разрядных микро-ЭВМ для этой цели недостаточен. Кроме того, по точности вычислений они в 16 раз уступают 8-разрядным микро-ЭВМ. Поэтому в системах, выполняющих с высокой скоростью высокоточные вычисления, следует применять 8-разрядные микро-ЭВМ [20].

Величина потребляемого тока современных микро-ЭВМ составляет около 10 мА, что считается вполне приемлемым при остановке двигателя.

После выбора микро-ЭВМ на основании предварительного проектирования схемы управления составляют подробное техническое задание для разработки программы. Существуют различные методики разработки программ. На рис. 3.40 показана наиболее распространенная схема последовательности разработки программы.

Сначала составляется общая блок-схема, описывающая работу системы управления, а также синхронизацию и последовательность выполнения ее операций. Затем для каждой операции составляется подробная частная блок-схема, с помощью которой подтверждается ее соответствие техническому заданию и отсутствие ошибок в алгоритме работы системы. Далее в соответствии с блок-схемой составляется программа (обычно на языке ассемблера). Трансляция программы с языка программирования на машинный язык осуществляется другой высокопроизводительной большой ЭВМ, то есть главный компьютер транслирует программу целевого компьютера, написанную на языке программирования в машинные слова.

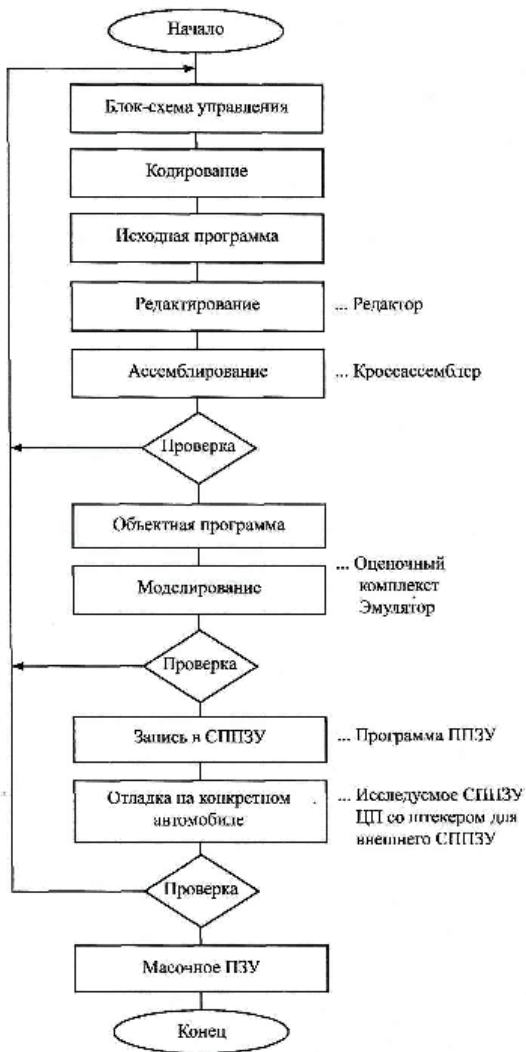


Рис. 3.40. Блок-схема процесса разработки программы

проводится моделирование. На этом этапе программа фактически выполняется разрабатываемыми аппаратными средствами в целях подтверждения нормальной работоспособности системы. Поскольку и на этом этапе довольно сложно обнаружить программные ошибки, то на аппаратуре обеспечения разработки осуществляется отладка программы. В процессе отладки выполнение программы можно остановить на произвольном шаге, вывести на экран текущее содержимое регистров ЦП и ОЗУ и внести соответствующие изменения. Кроме этого существует функция трассировки, которая позволяет отслеживать выполнение программы. К средствам обеспечения раз-

Составить программу, соответствующую техническому заданию редко когда удается сразу. Обычно она содержит много синтаксических и логических ошибок. Ошибки, касающиеся языка, например, синтаксические ошибки, обнаруживаются ассемблером, поэтому их можно увидеть в выходном сообщении главного компьютера об ошибках.

Логические ошибки обнаруживаются при моделировании выполнения программы и отладки ее на реальной машине. При обнаружении ошибки осуществляется коррекция программы и повторное ассемблирование (трансляция программы с помощью ассемблера).

Коррекция программы обычно производится главным компьютером, выполняющим ее ассемблирование. В процессе коррекции программы часто возникает необходимость ввести какие-то дополнительные команды, удалить ненужные команды или произвести их замену. Для этого используется специальная программа, называемая редактором. После коррекции программы и повторного ассемблирования

работки программ относятся автономный оценочный комплекс и виртуальные вычислительные машины, подключаемые к аппаратуре обеспечения разработки микро-ЭВМ. Если при моделировании не удастся создать условия, идентичные реальным, тогда отладка программы производится на реальной машине.

Для отладки на реальном автомобиле объектную программу после асемблирования необходимо записать в программируемое ПЗУ (ППЗУ). Используемое для записи устройство называется программатором ППЗУ. Большинство серийно выпускаемых однокристалльных микро-ЭВМ содержат встроенное стираемое программируемое ПЗУ (СППЗУ) или внешнее СППЗУ, которое устанавливается в разъем на корпусе микро-ЭВМ. Таким образом, на заключительном этапе контроль программы осуществляется на реальном автомобиле и здесь необходимо крайне тщательно проверить и оценить программу.

Если результаты отладки на реальном автомобиле соответствуют спецификации, процесс отладки считается завершенным и выдается заказ на изготовление «защитых» программ серийного производства.

3.9.5. Логические и сигнатурные методы диагностирования компонентов информационно-вычислительных комплексов

Наибольшее применение при диагностировании получили метод логического анализа, метод сигнатурного анализа и метод эмуляции.

Метод логического анализа применяется при наладке и поиске дефектов (неисправностей) как в технических средствах (аппаратуре), так и в программном обеспечении информационно-вычислительного комплекса. При наладке каналов или отдельных компонентов информационных систем часто требуется видеть сразу последовательность сигналов по нескольким каналам и наблюдать события, которые предшествовали интересующему оператору событию. При этом реальные формы сигналов в каналах или цепях плат аппаратуры не играют существенной роли, более важны их логические состояния в те моменты времени, когда они воспринимаются, то есть поступают на вход некоторого блока и содержат необходимую информацию. Отсюда следует, что достаточно запомнить только состояние сигналов в двоичном виде и хранить их в цифровой памяти технического средства диагностирования (логического анализатора).

Логический анализатор фиксирует состояние контрольных выходов диагностируемого блока во время тактовых сигналов, задаваемых самим блоком, и синхронно записывает процесс изменения их состояний в память. Затем записанные сигналы выводятся из памяти на экран логического анализатора (рис. 3.41).

На экран результаты диагностирования выводятся обычно в виде логических таблиц в двоичном, восьмеричном, шестнадцатеричном или алфавитно-цифровом коде. Например, типичное изображение информации на экране выглядит следующим образом:

0101	0111	1101	0100
0010	1011	1010	1000
0001	0100	0101	0110
1100	0100	0100	0110

0101	0111	1101	0100
0110	0111	1000	1100
0011	0000	0001	1000
0100	1100	0110	0100

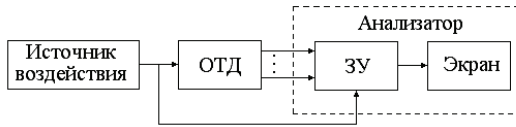


Рис. 3.41. Схема подключения логического анализатора:

ОТД – объект технического диагностирования;
ЗУ – запоминающее устройство

Экран разделен на две части. В правой части находятся данные, воспринятые от диагностируемого блока в некоторый интервал времени, а в левой – данные, зарегистрированные в том же самом блоке несколько позже.

Когда имеются различия в кодовых комбинациях, то цифры левой части светятся ярче, указывая на изменение по сравнению с данными, которые зарегистрированы в правой части. Цифры сгруппированы по четыре для того, чтобы оператор мог без особого труда преобразовать их в шестнадцатиричный код.

Логические анализаторы, у которых информация на экране отображается графически в виде временных диаграмм, называются анализаторами временных диаграмм. Такие анализаторы регистрируют состояние контрольных точек блока в моменты времени, которые задаются независимо работающим внутренним тактовым генератором анализатора (рис. 3.42, а). Состояние контрольных точек регистрируется в дискретные моменты времени в двоичной форме: 0 – при отсутствии сигнала и 1 – при его наличии (рис. 3.42, б).

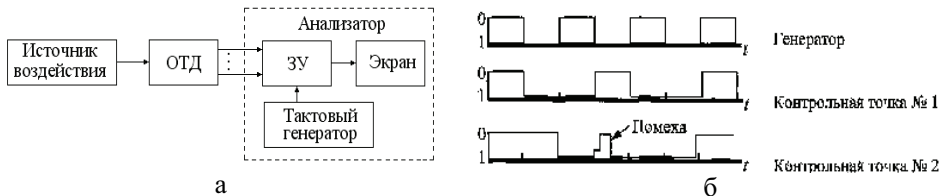


Рис. 3.42. Схема подключения анализатора временных диаграмм (а) и фрагмент временных диаграмм (б)

Поскольку в блоках иногда возникают события, которые асинхронны относительно задающих тактов и которые могут вызвать ошибочную обработку блока, то желательно такие события обнаруживать. Поскольку анализаторы логических состояний регистрируют информацию только синхронно с тактовыми сигналами диагностируемой аппаратуры, то они не могут обнаружить появление помехи, но анализаторы временных диаграмм это обеспечивают. Помехи возникают либо из-за ошибок внутренней временной диаграммы, либо являются следствием действия внешних источников. Анализаторы временных диаграмм обычно показывают 4, 8 или 16 диаграмм одновременно.

Метод сигнатурного анализа. Если на все входы цифровых блоков подавать определенный тест, то каждый блок можно контролировать на строго фиксированный набор состояний. В случае отличия набора состояний от строго фиксированного следует подозревать диагностируемый блок в наличии сбоя или отказа. При заданном строго фиксированном тест-наборе контролируемый набор в любом блоке оказывается уникальным (единственным), а поэтому его можно использовать для диагностирования цифровых компонентов. Контролируемая реакция блока на строго фиксированный тест-набор называется сигнатурой (signature – подпись) по аналогии с уникальностью подписей людей. Данный принцип позволил развить целую область цифрового тестирования, называемую сигнатурным анализом.

Математическая основа сигнатурного анализа – это способ кодирования двоичных последовательностей с использованием циклических кодов. При этом любое двоичное число представляется как многочлен. Так, если взять 7-битную двоичную последовательность, то ее можно рассматривать как полином степени 6. Двоичная последовательность

$$a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0 = 1100110$$

есть сокращенное представление двоичного полинома

$$\begin{aligned} a_6 \cdot 2^6 + a_5 \cdot 2^5 + a_4 \cdot 2^4 + a_3 \cdot 2^3 + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0 = \\ = 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \end{aligned}$$

Обозначив переменную в этом полиноме вместо обозначения 2 символом X , получим полином в следующем виде:

$$A(X) = 1 \cdot X^6 + 1 \cdot X^5 + 0 \cdot X^4 + 0 \cdot X^3 + 1 \cdot X^2 + 1 \cdot X^1 + 0 \cdot X^0$$

или в сокращенном виде

$$A(X) = X^6 + X^5 + X^2 + X^1.$$

Выходной двоичной последовательности с определенного блока соответствует некоторый определенный полином $A(X)$ степени $n-1$, где n – число разрядов двоичной последовательности. В процессе формирования сигнатуры полином $A(X)$ делится на порождающий полином $\Pi(X)$, конкретное значение которого определяется структурой регистра сдвига с обратными связями, который входит в состав сигнатурного анализатора. Например, для формирования 16-битной сигнатуры входной двоичный поток (полином) делится на полином

$$\Pi(X) = X^{15} + X^{11} + X^8 + X^6 + 1.$$

В соответствии с этим полиномом 16-битный регистр имеет четыре обратных связи от 16, 12, 9 и 7 разрядов.

При делении $A(X)$ на $\Pi(X)$ получится некоторое частное $Q(X)$ и остаток $R(X)$. Исходный полином при этом определится как

$$A(X) = \Pi(X) \cdot Q(X) \oplus R(X).$$

Если в двоичной последовательности, соответствующей полиному $A(X)$, возникли ошибки, то они вызывают преобразование исходного полинома $A(X)$ в $A(X)^*$. При этом полином ошибок $E(X)$ определяется как

$$E(X) = A(X) \oplus A(X)^*$$

и

$$A(X)^* = P(X) \cdot Q(X)^* \oplus R(X)^* = A(X) \oplus E(X).$$

Ошибки в выходной двоичной последовательности не обнаруживаются, если остатки $R(X)$ и $R(X)^*$ совпадают.

На вход диагностируемого блока с генератора подается определенной длины и всегда одинаковая двоичная последовательность. Выход блока подключается к устройству деления полиномов, которое делит выходную двоичную последовательность $A(X)$ на полином $P(X)$. Остаток от деления $R(X)$, оставшийся в регистре после окончания входной двоичной последовательности (сигнатура), сравнивается с заранее известным остатком (действительной сигнатурой) и, если они совпадают, диагностируемый блок признается исправным.

Контрольные вопросы

1. Что включает в себя программа диагностирования?
2. Что включает в себя автоматический процесс технического диагностирования?
3. В чем заключается последовательный и комбинаторный методы поиска неисправностей?
4. Что представляет собой способ последовательного функционального поиска неисправностей?
5. Какие существуют направления программно-логического контроля технического состояния объектов диагностирования?
6. В чем заключается достоинство методов двойного счета сигналов, обратного счета и тестового контроля технического состояния объектов диагностирования?
7. Сформулировать упрощенный подход к разработке программного обеспечения систем диагностирования?
8. В каких случаях диагностирования применяется метод логического анализа?

3.10. Методы контроля и диагностирования гидравлических систем и гидроприводов двигателей

Изменение диагностических параметров гидравлических систем при эксплуатации оценивают многими тестовыми и функциональными методами, обладающими определенными преимуществами и недостатками. Выбор тестовых методов диагностирования существенно зависит от типа, назначения и условий эксплуатации гидравлических приводов, а также от оснащенности эксплуатационных подразделений средствами диагностики.

По трудоемкости существующие методы диагностирования гидравлических систем и гидропривода исполнительных устройств двигателя условно можно разделить на следующие группы:

- диагностирование органами чувств человека;

- статопараметрический метод – наиболее трудоемкий, требующий отвода из гидросистемы потока рабочей жидкости;
- методы амплитудно-фазовых и переходных характеристик и термодинамический, которые требуют установку в гидросистему датчиков, имеющих контакт с рабочей жидкостью;
- спектральный анализ и индикация инородных примесей, то есть методы, требующие отбора проб рабочей жидкости;
- акустический, виброакустический, силовой и метод измерения скорости нарастания усилия на исполнительном элементе, то есть методы, требующие установки датчиков, не имеющих контакта с рабочей жидкостью;
- кинематический метод – наименее трудоемкий, не требующий установки специальных датчиков.

Диагностирование органами чувств человека позволяет по осмотру, контролю элементов на ощупь, по запаху определять качественные отклонения состояния составных частей гидравлических систем от нормы.

Любое диагностирование гидравлической системы и гидравлического привода при эксплуатации начинается с внешнего осмотра. Проверяют внешнюю герметичность системы гидропривода (наличие подтеканий рабочей жидкости), обнаруживают механические повреждения элементов гидропривода (забоины, трещины, потертости шлангов и трубопроводов), а также контролируют выработку люфтов тарифных соединений, наличие пломб, контровок и т. п.

Объективность диагностирования органолептическими методами повышается при использовании специальных средств и простейшей аппаратуры. Например, недопустимое повышение температуры обнаруживается с помощью специальных красок, термощупов; возникновение шумов при увеличении зазоров – с помощью стетоскопов; наличие трещин корпусов агрегатов определяется по изменению магнитных линий, обнаруживаемых с помощью порошков; некоторые параметры контролируются визуально по показаниям приборов (манометров, тахометров и др.).

В зависимости от оснащённости эксплуатационного подразделения средствами диагностики визуальные методы заменяются приборными. Этот же процесс имеет место и при совершенствовании систем встроенного контроля гидравлических приводов различного назначения.

Статопараметрический метод основан на измерении параметров функционирования гидропривода: давления P (МПа) и подачи рабочей жидкости Q (л/мин).

При диагностировании вычисляют объемный КПД насоса, равный отношению его фактической подачи (л/мин) к теоретической

$$\eta_o = \frac{Q_\phi}{Q_T}. \quad (3.29)$$

На практике вместо Q_ϕ определяют $Q_{ном}$ – подачу при номинальной частоте вращения вала насоса $n_{ном}$ и нагружении насоса до номинального давления $P_{ном}$. Учитывая, что при малых давлениях утечками в гидроагрега-

тах можно пренебречь, вместо Q_T при частоте вращения n_0 определяют подачу Q_0 (при давлении $P_0 \leq 0,05 P_{ном}$). При этом измерения должны проводиться при $n_{ном} = n_0$. Так как на СДМ, снабженных дизелями с центробежными регуляторами частоты вращения, это условие практически невыполнимо, для повышения точности измерений при вычислении η_0 изменение частоты вращения корректируется

$$\eta_0 = \frac{Q_{ном} n_0}{Q_0 n_{ном}}. \quad (3.30)$$

Нагружение, как правило, в этом случае устанавливается внешним дросселем. Статопараметрический метод широко используется на практике и позволяет точно определить состояние каждого элемента гидросистемы.

Статопараметрический метод основан на измерении (давления, расхода и др.) установившегося задросселированного потока рабочей жидкости. Этот метод позволяет оценивать объемный КПД насоса и по его величине прогнозировать техническое состояние большинства составных частей привода. Он получил широкое распространение для диагностирования гидравлических приводов машин, а также другого гидравлического оборудования. Метод может быть использован для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса большинства агрегатов гидравлического привода.

Общее техническое состояние гидропривода характеризуется отношением полезного расхода рабочей жидкости, используемой исполнительным агрегатом, к теоретической подаче насоса, питающего исполнительный орган. Объемный КПД гидропривода и его отдельных основных узлов являются выходными параметрами. Они характеризуют два важнейших показателя диагностируемых элементов – величину структурного параметра и одновременно экономическую целесообразность дальнейшей эксплуатации гидропривода или отдельного узла.

Для измерения расхода рабочей жидкости применяют счетчиковые расходомеры (турбинные, объемные), расходомеры, основанные на переменном перепаде давления, на струйном методе, электромагнитные, ультразвуковые и др.

Наиболее широко используются расходомеры переменного перепада давления. В этом случае диагностическое устройство представляет собой дроссель-расходомер (ДР), физически моделирующий на практике зависимость вида $Q = \mu F_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{P}}$, то есть зависимость потерь давления на местном сопротивлении (дросселе) от его проходного сечения и потока (расхода) рабочей жидкости. В ряде таких устройств расход контролируется косвенно по степени дросселирования потока при заданном перепаде давления (устройства КИ-1097 (ДР-70), «Поток» и др.). В других случаях в составе устройства может использоваться собственно датчик расхода, например, турбинный (диагностическое устройство ГТ-02 – гидротестер и др.).

Нагрузочный (гидравлический) блок этого тестера, кроме турбинного датчика расхода, включает нагрузочный дроссель, манометр, датчик температуры, предохранительную мембрану.

Измерительный блок тестера включает измерительный прибор, переключатель режимов работы, печатную плату и источник питания, датчик частоты вращения и кабели соединения с гидравлическим блоком и датчиком частоты вращения. Во всех этих случаях диагностическим параметром, оценивающим техническое состояние гидроагрегатов, является их внутренняя герметичность (коэффициент подачи, объемный КПД и т. п.), которая характеризует степень износа и одновременно является показателем эффективности или целесообразности их дальнейшей эксплуатации.

К недостаткам метода относится трудоемкость, обусловленная необходимостью разъединения трубопроводов и рукавов в системе гидропривода для установки датчиков непосредственно для каждого диагностируемого элемента (агрегата) гидропривода, а также сравнительно низкая точность и необходимость применения датчиков разных типоразмеров для различию элементов привода. Необходимость рассоединения звеньев гидропривода часто приводит к потере и загрязнению жидкости.

К разновидностям статопараметрического метода относятся интенсивно разрабатываемые в последнее время термодинамические и акустические методы диагностирования.

Метод переходных характеристик (волновой метод) основан на анализе диаграмм изменения давления на участках гидросхемы после переходных режимов ее работы. Ударная волна, проходя по участку гидросхемы, несет информацию о всех гидравлических сопротивлениях (золотниках, клапанах, вмятинах, утечках). Сравнив полученную ударную диаграмму с эталонной, можно оценить изменения в гидросистеме. Данный метод обладает высокой информативностью, но сложна расшифровка диаграмм. Кроме того, во время проведения измерений необходимо исключать из схемы узлы, влияющие на гашение пульсаций.

Имеется несколько разновидностей метода. Во-первых, техническое состояние системы гидропривода определяется на основании характера протекающих в ней волновых процессов. Эти процессы в гидроприводе возбуждаются путем мгновенного перекрытия потока рабочей жидкости в трубопроводе краном управления. Диагностирование осуществляют по волновым диаграммам. Метод перспективен и обладает высокой информативностью. Его достоинство – в возможности нагружения гидросистемы при минимальных затратах труда на подготовительные работы путем создания избыточного давления управляющими воздействиями с использованием возможностей самой системы, то есть режима самонагрузки. Метод может быть реализован для оценки технического состояния гидропривода с применением как накладных, так и встраиваемых датчиков. Однако при этом требуется применение дорогого оборудования. Недостатком метода является и сложность оценки технического состояния отдельных сборочных единиц. Это объясняется значительным взаимовлиянием их в диагностическом режиме

работы. Поэтому данный метод в настоящее время получил применение в основном при диагностировании гидроприводов авиационных систем.

Второе направление реализации метода переходных характеристик – оценка технического состояния гидроприводов машин по скорости изменения давления в нагнетательной магистрали перед нагружателем. Диагностическим параметром является время нарастания давления до данной величины. Между этой величиной и подачей насоса при постоянном режиме диагностирования существует определенная зависимость. Чем меньше подача насоса (объемный КПД), тем медленнее будет нарастать давление. Процесс этот происходит в короткий интервал времени, что отрицательно сказывается на точности диагностирования.

Еще одной возможностью использования метода переходных характеристик является оценка технического состояния гидросистемы по скорости падения давления. Например, для диагностирования гидросилового цилиндра и золотниковых пар распределителя проверяемые элементы гидропривода отключаются от насоса с помощью распределителя при достижении заданного давления в системе. По времени падения давления в диагностируемой части системы судят о герметичности соответствующих элементов.

Термодинамический метод позволяет путем измерения перепадов температур на входе и выходе элементов гидросхемы определять их полный КПД. Основывается он на превращении в тепло энергии, теряемой в элементах гидропривода. Метод эффективен в условиях эксплуатации, однако требует высокой точности измерения температуры, наличия сведений о теплофизических свойствах применяемой гидрожидкости либо использования сложных измерительных схем.

Метод спектрального анализа заключается в определении количества и вида продуктов износа элементов гидропривода в рабочей жидкости. Он позволяет обнаруживать износ на его ранней стадии, однако сложно локализовать продукты износа одной детали.

Метод индикации инородных примесей основан на определении количества продуктов износа деталей в гидрожидкости при помощи специальных магнитных пробок, а также количества воды и дизельного топлива посредством несложного химического анализа.

Акустический метод применяется для диагностирования внутренней негерметичности гидроагрегатов. Он основан на измерении в ультразвуковом диапазоне шума рабочей жидкости, перетекающей через поврежденные уплотнения. Предварительная тарировка позволяет определить утечки в гидрораспределителях, клапанах и других элементах гидросхемы. Достоинство – высокая скорость измерений, недостаток – необходимость предварительной тарировки и наличие значительных помех от соседних агрегатов.

Силовой метод основан на определении усилия, развиваемого исполнительным механизмом. Метод широко применяется при оценке общего состояния гидропривода машин в стационарных и полевых условиях. Достоинством его является возможность интегральной оценки состояния всего гидропривода исполнительного механизма, недостатком – невысокая точность. Недостатком метода также является ограниченное применение на

стационарных постах диагностики вследствие необходимости использования громоздких нагружающих устройств.

Метод измерения скорости нарастания усилия на исполнительном элементе является развитием силового метода для определения технического состояния гидросистем сельскохозяйственных машин, в которых в качестве исполнительных элементов используются гидроцилиндры. Для измерения усилия применяются быстросъемные накладные датчики. Достоинством метода является возможность быстрого получения информации для оценки общего состояния гидропривода, однако он не может использоваться для диагностирования гидросхем с гидромотором.

Кинематический метод, являясь наименее трудоемким, определяет общее техническое состояние гидропривода по скорости перемещения исполнительных элементов, нагруженных рабочим оборудованием. Он достаточно прост и не требует применения специального оборудования, однако имеет невысокую точность.

На основе наиболее распространенного статопараметрического метода разработаны переносные и стационарные средства диагностирования гидропривода.

Временной метод или метод временных интервалов основан на измерении параметров движения исполнительных органов гидросистемы, нагруженной внешним нормируемым силовым воздействием, по времени выполнения рабочих операций исполнительными органами диагностируемой системы (гидропривода). Метод используется для оценки общего технического состояния систем гидравлического привода. Этот метод отличается простотой реализации, вследствие чего находит широкое применение для диагностирования гидравлических приводов различных машин.

Кроме встроенных средств (реле времени, переключателей, конечных выключателей, кнопок системы управления), применяют специальные средства – электросекундомеры, а также временно устанавливаемые датчики перемещений, скоростей, ускорений, давления, усилий. Данные регистрируются с помощью самописцев, а у быстродействующих приводов – с помощью осциллографов. При использовании нескольких датчиков получают информацию не только о временных интервалах, но и о других параметрах рабочего процесса гидравлического привода, необходимых при других методах его диагностирования. В автоматизированных системах контроля обработка полученной информации производится с помощью ЭВМ.

Контроль производительности форсунок двигателей, их временных характеристик производят несколькими методами:

- проливание в динамическом режиме;
- регистрация движения клапана или якоря форсунки;
- регистрация движения топливной струи.

Метод проливания форсунок позволяет определить разницу в количестве поданного топлива между форсунками, а метод регистрации движения якоря форсунки или клапана дает возможность получить (по осциллограммам) длительность всех временных характеристик запаздывания [5].

Метод нормированных параметров («эталонных модулей») основан на сравнении экспериментально определенных значений параметров гидравлического привода и его отдельных агрегатов (мощности, КПД, усилий, крутящих моментов, давления, подачи, перемещений и др.) с их паспортными значениями или с нормами технических условий.

Метод широко используется для диагностирования любых типов гидравлических приводов. Его преимуществом является возможность использования полученной информации для уточнения расчетов гидропривода и его элементов, прогнозирования ресурса, определения энергетических показателей и т. п. Во многих случаях для реализации метода не требуется сложной диагностической аппаратуры, а при диагностировании с использованием вычислительной техники необходимо лишь простейшее программное обеспечение, например для статистической обработки результатов эксперимента.

К методу нормированных параметров можно отнести также статопараметрический, силовой и временной методы диагностирования.

Номенклатура диагностических параметров, используемых при реализации этих методов, совпадает в основном с номенклатурой параметров, установленных стандартами или ТУ на правила приемки и методы испытаний агрегатов гидропривода (ГОСТ 14658-86, ГОСТ 18464-80, ГОСТ 20234-74 и др.).

Метод эталонных зависимостей (амплитудно-фазовых характеристик) базируется на анализе волновых процессов изменения давления в напорной и сливной магистралях гидросистем на рабочих режимах при загрузке системы со стороны исполнительного органа или дросселирования жидкости в сливной магистрали. Метод разработан для оценки общего технического состояния и локализации неисправностей, характеризующих работоспособное и неработоспособное состояние.

Метод амплитудно-фазовых характеристик (метод пульсаций давления) основан на измерении колебаний давления в напорной магистрали насоса в установившемся режиме его работы и предназначен для оценки технического состояния качающих узлов аксиально-поршневых насосов по осциллограмме пульсации давления. Этот метод позволяет определить суммарный износ в кинематической цепи, обеспечивающей возвратно-поступательное движение поршней. Недостатком его является невозможность определения износа элементов, влияющих на внутренние перетечки.

Распознавание неисправностей производится путем сравнения экспериментально полученных функциональных зависимостей параметров диагностируемого гидропривода (его отдельных агрегатов) с эталонными зависимостями, найденными расчетным или экспериментальным путем. Анализ амплитудно-фазовых частотных характеристик позволяет определить запас устойчивости следящих гидроприводов систем автоматического управления, использование характеристик динамической жесткости приводов систем управления.

Этот метод наиболее эффективен в гидросистемах, работа которых сопровождается значительными колебаниями давления. Используется в ос-

новном для определения неисправностей аксиально-поршневых насосов. Основной недостаток – жесткие требования к условиям его реализации. Метод не применяется для гидроприводов с шестеренчатыми насосами с низкой степенью жесткости нагнетательных магистралей. Метод реализуется с использованием встраиваемых в систему датчиков.

Метод эталонных зависимостей сложнее методов временных интервалов и эталонных модулей и обычно требует применения более сложной аппаратуры, так как в нем используются в большинстве случаев косвенные признаки, характеризующие работоспособное и неработоспособное состояние гидропривода и его составных частей.

Метод эталонных осциллограмм (переходных характеристик) представляет собой частный случай метода эталонных зависимостей, с помощью которого исследуют зависимость диагностического параметра от времени. Он является одним из наиболее простых и эффективных методов диагностирования и широко применяется для выявления дефектов и отказов гидроприводов, для которых характерны низкочастотные динамические процессы. При анализе осциллограмм синтезируются приемы методов временных интервалов и эталонных модулей.

Метод сопоставления и наложения осциллограмм основан на анализе одновременно записанных осциллограмм различных параметров или одного и того же параметра, но при разных режимах (условиях) работы гидропривода. Этот метод представляет собой усложненный метод эталонных осциллограмм, с помощью которого анализируется динамика изменения параметра или устанавливается место возникновения дефекта (неисправности). Метод универсален и особенно эффективен для диагностирования новых конструкций гидропривода или при сложном проявлении отказа для уточнения диагноза. Автоматизации метода затруднена.

Анализ рассмотренных методов показывает, что ряд из них применяется при стационарных режимах работы гидропривода (метод нормированных параметров и его разновидности – статопараметрический и силовой методы, метод эталонных зависимостей), другие обеспечивают диагностирование гидропривода в динамических режимах его работы (временной метод, метод нормированных осциллограмм). К последним часто относят также методы виброакустической диагностики. В связи с этим комплексное диагностирование гидравлических приводов различного назначения и их составных частей может быть достигнуто только при рациональном сочетании различных методов.

Виброакустический метод основан на анализе параметров вибраций и акустических шумов. Метод пригоден для любых гидравлических систем, гидроприводов, насосов и других механизмов.

Виброакустический метод применяется в основном для гидроагрегатов с явно выраженными циклическими рабочими процессами, например для аксиально-поршневых гидронасосов. Основное достоинство – принципиальная возможность получения информации о любом элементе гидропривода без его разборки, недостаток – сложность выделения полезной информации.

Сущность вибрационного метода заключается в следующем. Работа сборочных единиц гидропривода сопровождается вибро- и гидроударными процессами или акустическими шумами, например сопряжений плунжерных пар в насосах и гидромоторах, клапанов, шумов и вибраций создаваемых потоками жидкости при дросселировании его через образовавшиеся зазоры, вытеканием рабочей жидкости через неплотности. Эти колебания называют структурным шумом в отличие от воздушного, возбуждаемого механизмами в окружающей среде. По мере изнашивания механизмов или при возникновении в них каких-либо дефектов нарушаются запроектированные кинематические связи между деталями, вследствие чего характер шума и вибрации изменяется. Это свойство используют для оценки технического состояния объектов.

Сигналы, возбуждаемые колебаниями работающих механизмов, носят импульсный характер. Энергия акустического сигнала возрастает с увеличением зазора между сопряженными деталями. Поэтому амплитуда виброакустического сигнала может достаточно точно характеризовать состояние кинематической пары. Он фиксируется измерительным преобразователем, устанавливаемым для этой цели на корпусе объекта диагностирования и воспринимающим результирующие колебания, которые поступают от всех механизмов системы.

Для оценки соответствующего сопряжения в отдельности необходимо такое разделение сигнала на составляющие, при котором каждая из них характеризовала бы техническое состояние определенного сопряжения или одной кинематической пары.

Разработано несколько методов выделения диагностических сигналов: амплитудный, временной, фазовый и частотный. Эти методы реализованы в диагностических средствах. Часто используют корреляционный метод выделения сигнала, основанный на установлении связи диагностических и структурных параметров механизмов машин.

При виброметрическом методе контроля большое значение имеет правильный выбор первичных преобразователей-датчиков для замера ускорения вибрации и мест их установки. Точность замеров определяется отношением частот собственных колебаний измеряемого объекта и самого датчика.

Тепловой метод основан на оценке распределения температуры на поверхностях сборочных единиц системы, а также перепадов температур циркулирующей рабочей жидкости. Температура является мерой количества тепла, в которое превращается теряемая энергия.

Метод универсальный, может быть реализован при помощи накладных, встраиваемых и дистанционных датчиков (термовизоры). При использовании этого метода может быть реализована самозагрузка диагностируемой системы.

Недостаток теплового метода – в необходимости точного измерения перепада температуры, которое проводится специальными высокочувствительными измерительными преобразователями с линейной и стабильной характеристикой при выполнении весьма жестких требований к условиям их установки в специально подготовленных контрольных точках.

Метод анализа состояния рабочей жидкости основан на определении свойств рабочей жидкости, вязкости, содержания нерастворимых газов, количества и состава загрязнений, механических примесей и продуктов износа, находящихся в рабочей жидкости, счетчиками частиц, микроскопами, спектральными анализаторами или специальными индикаторами.

Классификационная схема основных методов диагностирования гидроприводов представлена на рис. 3.43.



Рис. 3.43. Основные методы диагностирования гидросистем и гидроприводов

При этом из всего комплекса вопросов, связанных с контролем параметров рабочей жидкости, необходимо выделять два основных, которые имеют большое практическое значение для обеспечения надежной эксплуатации гидропривода:

1) периодический контроль основных параметров рабочей жидкости в ходе ее старения при эксплуатации, чтобы оценить ее соответствие техническим требованиям к гидроприводам и своевременно заменить;

2) диагностирование гидропривода по параметрам рабочей жидкости. Контроль качества и изменения параметров рабочих жидкостей в процессе эксплуатации гидропривода осуществляется путем анализа их проб по стан-

дартным методам, которые относятся к методам нормированных параметров.

Контрольные вопросы

1. Какие неисправности в гидравлических системах можно обнаружить органами чувств человека?
2. В чем заключается поиск неисправностей статопараметрическим методом?
3. Какие существуют разновидности методов переходных характеристик измерений давления?
4. В чем заключается силовой метод контроля технического состояния гидропривода?
5. Для каких агрегатов и систем применяется метод нормирования параметров?
6. На чем основан метод амплитудно-фазовых характеристик и в каких случаях диагностирования он применяется?
7. В чем отличие метода эталонных осциллограмм от метода сопоставления и наложения осциллограмм?
8. В чем заключается метод определения технического состояния гидропривода по анализу рабочей жидкости?

3.11. Методы диагностирования по энергетическим и гидравлическим параметрам, угловой скорости валов и рабочим процессам

Методы диагностирования двигателей по энергетическим, гидравлическим параметрам, угловой скорости валов и рабочим процессам находят широкое применение (рис. 3.44) [6] для:

- определения индикаторного и механического КПД;
- определения интенсивности рабочих процессов;
- определения эффективной мощности;
- определения рабочих процессов по параметрам колебаний (электрических величин, температуры, скорости вращения коленчатого вала, уровня вибрации и давлений);
- оценки компрессионных свойств цилиндров;
- технического состояния топливной аппаратуры.

Указанные методы рассмотрены в работе [5].

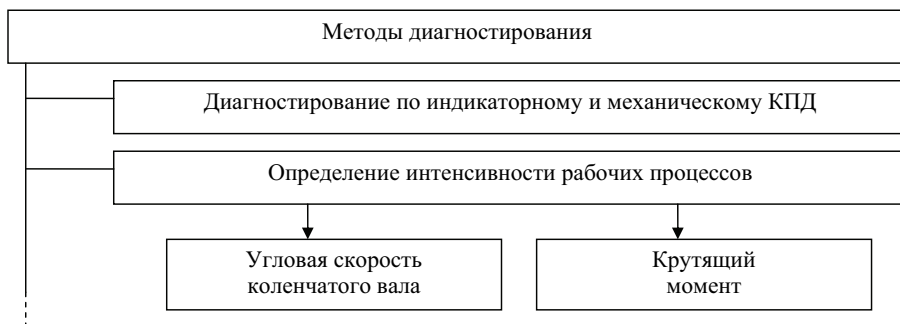
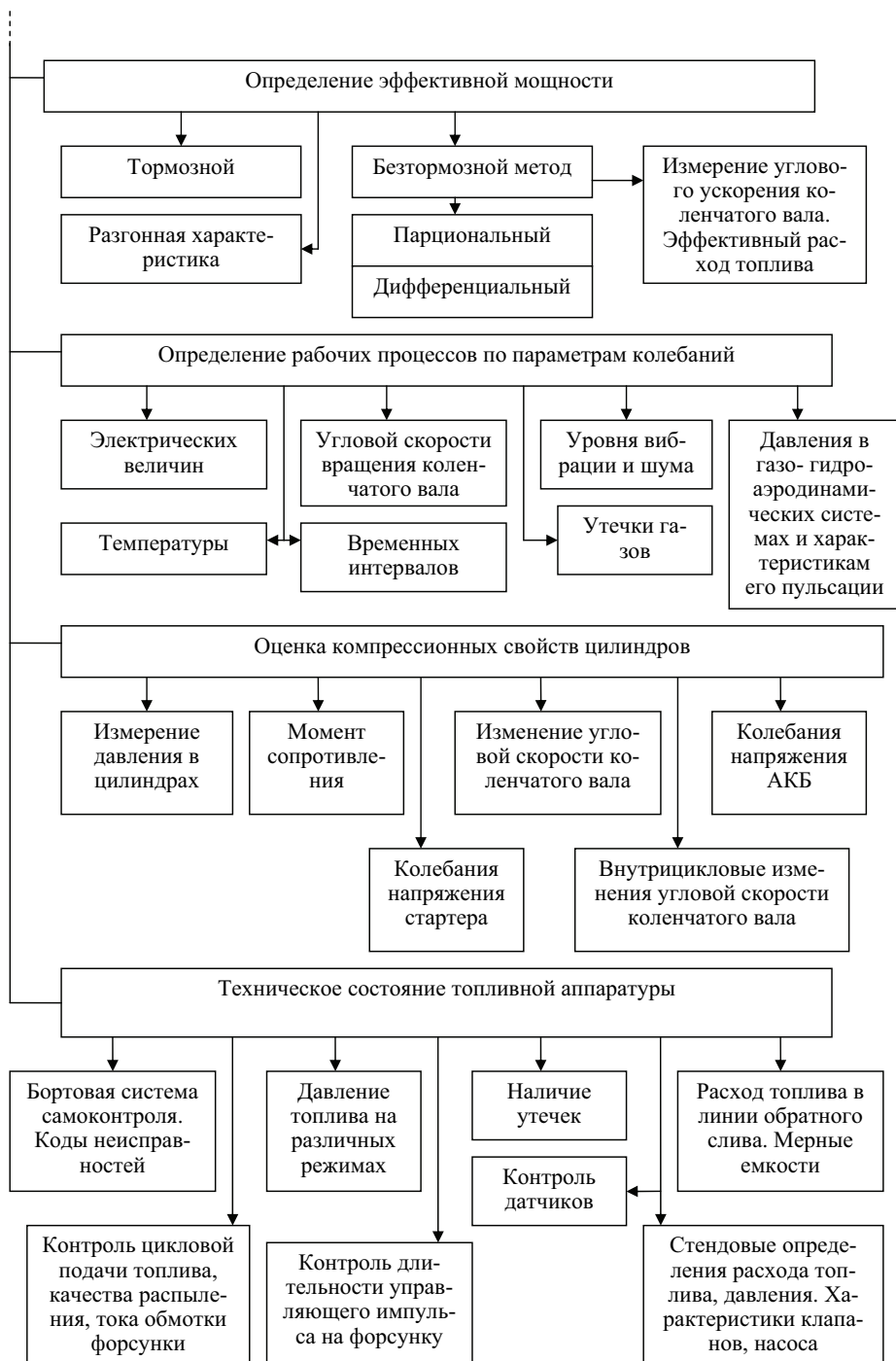


Рис. 3.44. Методы диагностирования двигателя по энергетическим гидравлическим параметрам, угловой скорости валов и рабочим процессам



Окончание рис. 3.44

3.12. Вибродиагностические методы и средства диагностирования и доводки отдельных двигателей и в составе машин

3.12.1. Свойства вибрационных сигналов

3.12.1.1. Области применения виброакустических методов

Все физические и механические процессы, протекающий в ДВС, порождают вибрации, а уровень вибраций сигнализирует о техническом состоянии двигателя. Поэтому методы виброакустической диагностики находят широкое применение.

Виброакустические методы диагностирования двигателей являются одними из наименее трудоемких и наиболее достоверных при оценке технического состояния двигателей. Однако диагностирование этими методами требует определенных знаний динамики машин, навыков применения средств от прослушивания стуков простыми стетоскопами или электронными типа «Экранас» до использования современных виброанализаторов и вибродиагностических систем.

Виброакустические методы диагностирования двигателей направлены на измерение параметров вибрации, создаваемой механическими, газо-, гидро-, аэродинамическими системами двигателя, их обработку и сравнение результатов с заданными проектными нормами, эталонными спектрограммами или нормами допустимого прироста эксплуатационной вибрации.

Виброакустические методы диагностирования могут быть использованы для определения технического состояния движущихся элементов ДВС: подшипников качения, подшипников скольжения коленчатого вала, сопряжений ЦПГ, ГРМ, форсунок, зубчатых зацеплений, переходных процессов в потокосодержащих газо-, гидро-, аэродинамических системах, системах подачи и сгорания топлива.

Наличие динамических нагрузок при работе и зазоров в сопряжениях вызывает соударения, порождающие шум и вибрацию корпусных деталей.

Износ сопряжений, нарушение регулировок и уменьшение жесткости пружин приводят к изменению параметров вибраций, к которым относят амплитуду, энергию и фазовое положение виброимпульса относительно опорной точки измерения (положение коленчатого вала при нахождении поршня цилиндра ДВС в ВМТ такта сжатия).

Необходимость выявления источников вибрации двигателей машин возникает при доводке, контроле технологического и конструктивного качества, диагностирования технического состояния при эксплуатации и ремонте. Локализация источников вибрации является одной из важнейших задач виброакустических исследований и диагностики двигателей, позволяющих оценить роль каждого из них в общем потоке колебательной энергии. На основе определения источников вибрации уточняют методы расчета вибрационных параметров систем двигателя на стадии проектирования и разрабатывают мероприятия по выявлению конструктивных и технологических дефектов двигателя, устранению резонансной вибрации.

Для снижения вибрации до заданных значений в эксплуатации или при доводке конструкции двигателя прежде всего необходимо определить источники вибраций и частоту их проявления в спектре. Частоты вибрации источников определяются в первую очередь частотой действия вынуждающих сил, структурными, функциональными и динамическими характеристиками состояния конструкции узла двигателя машины.

Существующие методы выявления источников вибрации основаны на информации о кинематических, силовых, энергетических и динамических характеристиках двигателя. Вибрационные сигналы от взаимодействия кинематических пар относятся к сигналам частотно-временной группы. Они характеризуются четкой периодичностью работы и пространственным размещением их источников, широким частотным спектром. Перечисленные показатели общего вибрационного процесса и его структура предопределяют возможные исследования по управлению параметрами выходного сигнала (то есть выбора режима диагностирования) с целью получения однозначного их соответствия структурному параметру. Формирование информационного отклика на дефект (неисправность) кинематической пары связано с процессом прохождения упругих волн вибрации в вибрационном канале механизма обладающего определенными колебательными характеристиками, влияющими на прохождение сигнала. Кроме того, каналы могут быть плохо разделены пространственно и взаимно влиять друг на друга.

Одним из основных способов выявления источника повышенной виброактивности является сопоставление частот дискретных составляющих спектра вибрации механизма с расчетными частотами возбуждения и собственными колебаниями деталей. Для этого необходимо знать весь перечень возможных источников вибрации данного механизма и их расчетные частоты. На основании расчетных значений частот всех источников вибрации машины для различных режимов работы составляется таблица или номограмма-дешифратор источников вибрации. Однако знание динамических сил, моментов и других вынуждающих сил, являющихся источниками вибрации конкретной системы двигателя еще недостаточно для разработки методов диагностирования и средств снижения уровня спектра вибрации при проектировании и доводке конструкции. Это объясняется тем, что, во-первых, уровень спектра вибрации определяется не только динамическими силами, но и инерционно-жесткостными параметрами, системой конструкционного демпфирования вибрация и т. д.; и, во-вторых, на одной и той же частоте спектра в двигателях и узлах действуют не один, а несколько источников вибрации механического, газо-, гидро- и аэродинамического происхождения. Уровни вибрации, возбуждаемые каждым из этих источников, могут значительно отличаться друг от друга, а суммарный уровень не может быть определен простым суммированием уровней отдельных источников. Поэтому разработка средств снижения уровня вибрации какого-либо одного источника, не являвшегося основным, не может приводить к существенному снижению суммарного уровня вибрации на данной частоте спектра, а разработка средств снижения одновременно всех источников вибрации экономически нецелесообразна.

В связи с этим необходимо на каждой исследуемой частоте определять основной – наибольший по уровню источник вибрации экспериментальными методами.

Стуки в двигателе прослушиваются в случае износа коренных и шатунных подшипников, поршневых пальцев и втулок, увеличения зазора между клапанами и толкателями, поломки пружины клапанов, при детонационных явлениях, пульсации жидкостей и газов в газо-, гидродинамических и топливных системах. Средства прослушивания стуков в двигателе показаны на рис. 3.45, а контрольные точки – на рис. 3.46. В табл. 3.27 приведены места прослушивания и распознавания неисправностей.

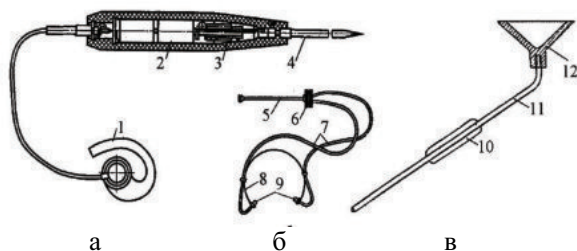


Рис. 3.45. Электронный стетоскоп (а) и механический (б и в – КИ-1154)

для прослушивания шумов и стуков:

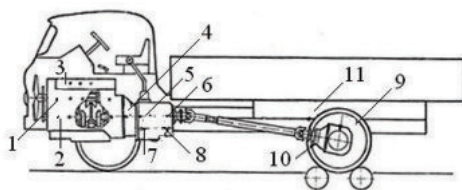
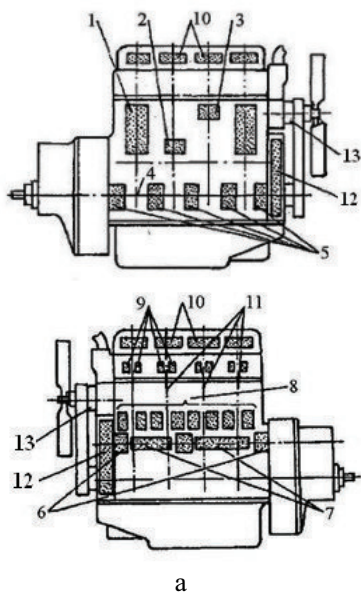
- 1 – наушник; 2 – элемент питания; 3 – транзистор усилителя; 4 – слуховой стержень; 5 – стержень; 6 – мембрана; 7 – резиновая трубка; 8 – пружинная пластина; 9 – телефон-наушник; 10 – корпус-ручка; 11 – стержень; 12 – телефон-наушник

Виброакустический метод диагностирования, реализованный во многих приборах раннего выпуска: ИВД-1, ЭМДП, виброакустических комплексах КИ-13940 ГОСНИТИ и в современных виброанализаторах фирм «Шенк» (Германия), «Брюль и Кьер» (Дания), «Акахи» (Япония), Hewlett Packard 3561 А, Rande&Schwarz (США), позволяет проводить оценку технического состояния динамически на-

груженных сопряжений ДВС и автомобиля.

Наличие в стетоскопе УС-01 двух каналов (звукового и ультразвукового), специальных наушников, насадок на микрофон в виде гибких зондов, позволяющих прослушивать работу механизмов в труднодоступных местах при повышенной температуре деталей двигателя. Наличие на корпусе электронного табло, высвечивающего в цифрах силу стуков и шумов (в децибелах – дБ) – делают данную модель стетоскопа эффективным средством диагностики технического состояния КШМ и ГРМ двигателей. Источник питания прибора - напряжение 12 В.

Перед диагностированием двигатель следует прогреть до температуры охлаждающей жидкости 90 ± 5 °С. Прослушивание производят, прикасаясь острием наконечника звукочувствительного стержня в зоне сопряжения проверяемого механизма.



б

Рис. 3.46. Схема зон прослушивания двигателя (а) и точек контроля вибрации автомобиля (б):

а: 1 – поршень-цилиндр; 2 – поршневое кольцо-канавка на поршне; 3 – поршневой палец-втулка шатуна или бобышки поршня; 4 – коленчатый вал-шатунный подшипник; 5 – коленчатый вал-коренной подшипник; 6 – распределительный вал-подшипник; 7 – кулачок распределительного вала; 8 – толкатель-втулка толкателя; 9 – стержень клапана-направляющая втулка; 10 – боек коромысла-стержень клапана; 11 – клапан-днище поршня; 12 – распределительные шестерни; 13 – водяной насос; б: 1 – зона поршней; 2 – подшипников; 3 – клапанов; 4 – муфты сцепления; 5-8 – коробки передач; 6-10 – карданной передачи; 9-10 – главной передачи; 11 – подвески с измерением вибрации прорессорных и неподрессорных масс.

3 – клапанов; 4 – муфты сцепления; 5-8 – коробки передач; 6-10 – карданной передачи; 9-10 – главной передачи; 11 – подвески с измерением вибрации прорессорных и неподрессорных масс.

Таблица 3.27

Методика прослушивания работы двигателя стетоскопом

Место (сопряжение деталей) возможного стука	Тепловое состояние двигателя	Режим работы двигателя	Место (зона) прослушивания (рис. 3.46)	Характер стука	Возможные последствия эксплуатации с неустранимым стуком
Коренные подшипники коленчатого вала	Прогретый	Резкопеременный	Нижняя часть блока цилиндров (зона б)	Глухой, низкого тона	Разрушение антифрикционного слоя вкладышей подшипников
Шатунные подшипники коленчатого вала	Прогретый	Резкопеременный	Блок цилиндров; места, соответствующие верхнему и нижнему положениям поршневого пальца (зона 7)	Среднего тона (более звонкий, чем стук коленных подшипников)	Разрушение антифрикционного слоя вкладышей подшипников и образование эллипсности шеек коленчатого вала

Место (сопряжение деталей) возможного стука	Тепловое состояние двигателя	Режим работы двигателя	Место (зона) прослушивания (рис. 3.46)	Характер стука	Возможные последствия эксплуатации с устраненным стуком
Клапаны и клапанные седла	Прогретый	Резкопеременный	Боковая поверхность головки блока цилиндров (зона 8)	Отчетливый звонкий	Усиленный износ седел и головок клапанов
Поршень и цилиндр	Холодный	Резкопеременный	Верхняя часть блока цилиндров (зона 7)	Сухой, щелкающий, усиливающийся при изменении частоты вращения коленчатого вала. Стук уменьшается по мере прогрева, при сильном износе стук прослушивается также и на прогретом двигателе	Увеличенный расход масла
Подшипники распределительного вала	Прогретый	Резкопеременный	Стенки крышки головки в местах расположения подшипников распределительного вала (зона 9)	Отчетливый	Усиленный износ подшипников распределительного вала
Цепь привода ГРМ	Прогретый	Резкопеременный	Крышка распределительных звездочек (зона 5)	Отчетливый, исчезающий с увеличением частоты вращения коленчатого вала	Повышенный износ цепи и звездочек

3.12.1.2. Связь вибрации с динамическим состоянием механизмов машин

Актуальность использования методов оценки технического состояния по вибродиагностическим характеристикам обусловлена сложной системой элементов, связей, рабочих процессов и разнообразием (разбросом)

исходных геометрических параметров, сложных эксплуатационных статистических состояний, которые определяют динамическое состояние механизмов и придают каждой машине индивидуальные свойства, а идентификация их в статистических параметрах зазоров, обмерах деталей, скоростях изнашивания и отказах существенно ограничена. Вибрация машин является природной реакцией на реально действующие внешние и внутренние возбуждающие силы. В вибрационном сигнале содержится вся объективная информация об изменении всех компонент, которые определяют техническое состояние механизмов и систем в реальном времени.

Основными характеристиками вибрационных сигналов, которые используются для оценки технического состояния машин, являются:

1. Пропорциональная или близкая к пропорциональной зависимость изменения виброускорений, измеряемых в децибелах, от нагрузки и частоты вращения, зазора, значений геометрических погрешностей, позволяющая нормировать их исходные и предельные значения для контроля качества проектирования, изготовления и эксплуатации машин. Для некоторых элементов машин линейное изменение диагностического параметра, выраженного в децибелах, наблюдается примерно до 75% срока службы объекта диагностирования двигателя, а затем может начинаться экспоненциальный рост вибрации заканчивающийся обычно поломкой механизма [74].

2. Высокая универсальность, чувствительность и избирательность вибрационного сигнала к параметрам технического состояния объекта диагностирования, позволяющая:

- диагностировать большинство дефектов (неисправностей) механических и потокосодержащих систем;
- выявлять зарождающиеся дефекты (неисправности);
- диагностировать дефекты (неисправности) сборки деталей и узлов (в том числе несоосность, изгиб, перекос, дисбаланс).

3. Физические свойства возбуждения вибрации, позволяющие в качестве диагностического параметра использовать не статические признаки, а динамические – комплексные признаки структурного, функционального и динамического состояния двигателя:

- вибродиагностические характеристики отдельных элементов двигателя и машины в целом;
- собственные частоты в сборе деталей, узлов, агрегатов и машин;
- резонансные вибрации;
- жесткостные характеристики узлов и систем.

4. Свойства вибрационных сигналов быстро реагировать на изменение технического состояния объекта диагностирования, позволяющие наблюдать и сопоставлять в реальном времени реакцию всех компонент – структурного, функционального и динамического состояния двигателя на изменения:

- конструкции отдельных элементов или узлов двигателя;
- технологии изготовления и сборки;
- рабочих процессов;
- режимов работы;

- регулировочных работ;
- корреляционных зависимостей дефектов (неисправностей) механизмов двигателя.

5. Высокая скорость диагностирования, позволяющая создавать системы автоматизации контроля и предупреждения аварийных ситуаций, а также управления работой двигателя.

6. Возможность создавать современные компьютерные и микропроцессорные бортовые, стационарные и переносные системы быстрого получения достоверной информации о техническом состоянии двигателя на стадиях изготовления, доводки конструкции и эксплуатации.

7. Большой объем информации в одном измерении вибрации, позволяющий обеспечить контролепригодность двигателя и достоверность вибрационного диагностирования на всех стадиях жизненного цикла.

8. Прогрессивная технология диагностирования (без разборки) и высокая мобильность средств.

9. Снижение трудоемкости ресурсных и эксплуатационных испытаний и диагностирования отдельных двигателей и в составе автомобиля.

Эти свойства позволяют с использованием современных виброанализаторов, компьютерных и микропроцессорных технологий наблюдать в реальном времени и сопоставлять реакцию всех компонент структурных, функциональных и динамических свойств механизмов двигателя, связанных корреляционной зависимостью, на изменение конструкции, технологии изготовления, рабочих процессов, режимов работы, быстро получать информацию о техническом состоянии, повышать точность диагноза и снизить трудоемкость доводки конструкции, ресурсных и эксплуатационных испытаний и диагностирования (контроля) двигателей при изготовлении и эксплуатации.

Проведенные экспериментальные и статистические исследования вибрационных отказов механизмов двигателя показали, что их надежность характеризуется определенным уровнем вибрации, превышение которого вызывает изменение структуры материалов, интенсивное нагромождение повреждений усталости и пластической деформации, виброползучести в элементах механизмов и конструкций, нарушение нормального функционирования и снижения эластичности упругих систем механизмов, потерю жесткости и устойчивости конструкции.

Уровни вибрации и шума механизмов двигателя находятся в прямой зависимости от технического уровня (совершенства) проектирования. Поэтому в задачах проектирования двигателей пониженной виброактивности первоочередное место занимает определение предельных значений вибрации, проблемы оптимизации вибрационных характеристик и снижение мощности потока вибрационной энергии, которая проходит через отдельные узлы и контактные участки деталей механизмов.

Методология обеспечения заданного технического уровня проектирования основывается на нормировании вибрации машин по критерию обеспечения заданного ресурса и надежности на стадии конструирования и согласно критериям сохранения запроектированного качества на стадиях

доводки конструкции. Для этого разрабатывают методы нормирования классов вибрации проектируемых двигателей и расчета их вибрации, конструктивные и технологические средства снижения вибрации; нормируют вибрации и виды дефектов для контроля качества изготовления; разрабатывают методы нормирования исходных и предельных вибрационных диагностических параметров, эксплуатационные нормы вибрации и классы качественной оценки технического состояния и методы прогнозирования остаточного ресурса по вибрационным характеристикам объектов диагностирования [14, 15].

Вибрация многих видов двигателей и транспортных машин нормируется для соблюдения норм безопасности труда водителя и вредного влияния на окружающую среду заданных виброакустических полей двигателя, повышения надежности и вибропрочности, создания автомобилей заданного ресурса [53, 60]. Для контроля качества изготовления отдельных механизмов, агрегатов и машин разрабатывают нормы и методы оценки вибрации [40, 41, 60].

Практическое использование вибрационной диагностики любых двигателей и их механизмов основано на использовании многих стандартов. Основными задачами эксплуатационной диагностики двигателей является определение исходных и предельных вибрационных диагностических параметров и периодичности диагностирования.

Преимущества диагностирования вибрационными методами заключаются в высокой информативности вибрационных сигналов. Вибрационные сигналы представляют собой многоканальную систему с большим объемом информации о техническом состоянии механизмов в одном измерении вибрации. Можно создавать образы вибрационного состояния путем нормирования и кодирования сигналов вибрации, создавать автоматизированные системы вибрационных сигналов диагностирования машин на всех стадиях жизненного цикла. В вибрационном сигнале содержится вся информация о состоянии структурных, функциональных и динамических параметров. Распознавание источников вибрации двигателя при применении стетоскопов значительно снижается по мере уменьшения их габаритов.

Методы вибрационного диагностирования двигателей применяются на всех стадиях их жизненного цикла: оценка качества проектирования, изготовления и эксплуатации как отдельно, так и в составе комплектных машин.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики двигателей можно определить по вибрационным сигналам?
2. Какие признаки неисправностей можно определить методом прослушивания двигателя стетоскопом?
3. Какие основные характеристики вибрационных сигналов?
4. В чем заключаются преимущества диагностирования вибрационными методами?
5. На каких стадиях жизненного цикла двигателей машин применяются виброакустические методы оценки их технического состояния?

3.12.2. Диагностирование методами спектрального анализа вибрации

Эффективность вибрационного диагностирования и контроля технических систем двигателя определяется выбором мест и точек контроля вибрации [40, 41], вибрационного диагностического параметра и информативных компонент сигналов вибрации. Информативными параметрами могут являться значения амплитуды, фазы, гармонических составляющих, направление вибрации (осевая, радиальная), модуляционные сигналы, глубина модуляции вибрационных сигналов, чувствительных к изменениям состояния технических систем.

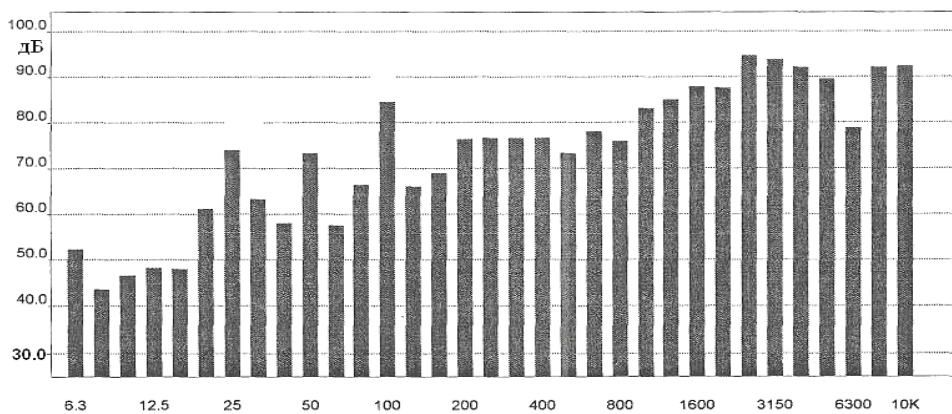
Примеры спектров вибрации двигателей в третьоктавных полосах частот и в узких полосах частотах представлены на рис. 3.47, 3.48. Иллюстрация условных источников и спектров эксплуатационной вибрации представлена на рис. 3.49 (а); назначение точек контроля сложной транспортной машины (трактора) – на рис. 3.49 (б).

3.12.2.1. Спектральный анализ вибрации в широких и узких полосах

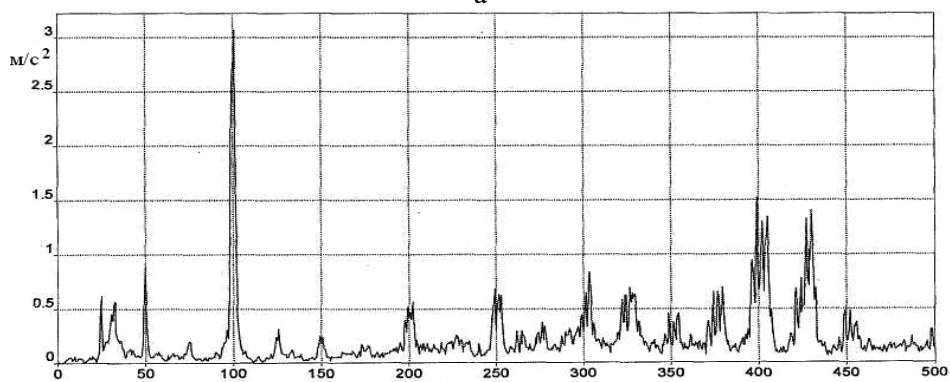
Контроль уровня вибрации в широкой полосе (по «общему уровню») основан на непосредственном измерении параметров виброскорости, виброперемещения или виброускорения диагностируемого узла. Критерием наличия и степени развития неисправности служат нормативные уровни вибрации, принятые для диагностируемого узла (рис. 3.47, а); неисправным считается такой узел, величина вибрации которого превышает установленную норму эксплуатационной вибрации. Метод диагностики в широкой полосе по своему принципу входит в широко распространенные методы оценки технического состояния простых механизмов и узлов и выполняется обслуживающим персоналом без специальной подготовки. Для проведения такой диагностики, например, подшипниковых узлов вполне достаточно иметь простейший виброметр [42]. Для контроля (диагностирования) вибрации в широких полосах разработано много норм вибрации. Однако метод диагностики в широкой полосе вибрации позволяет определять неисправности на предельной стадии их развития, когда они уже приводят к разрушению узлов. Качественную и количественную оценки технического состояния можно производить путем разбиения допустимого приращения вибрации в эксплуатации (рис. 3.49) на зоны «хорошо», «допустимо», «требуется принятия мер», «недопустимо» [40, 59, 60].

Контроль вибрационных характеристик объекта диагностирования можно осуществлять в широких полосах («по общему уровню») и узких полосах частот, а также в широких и узких полосах частот вибрации.

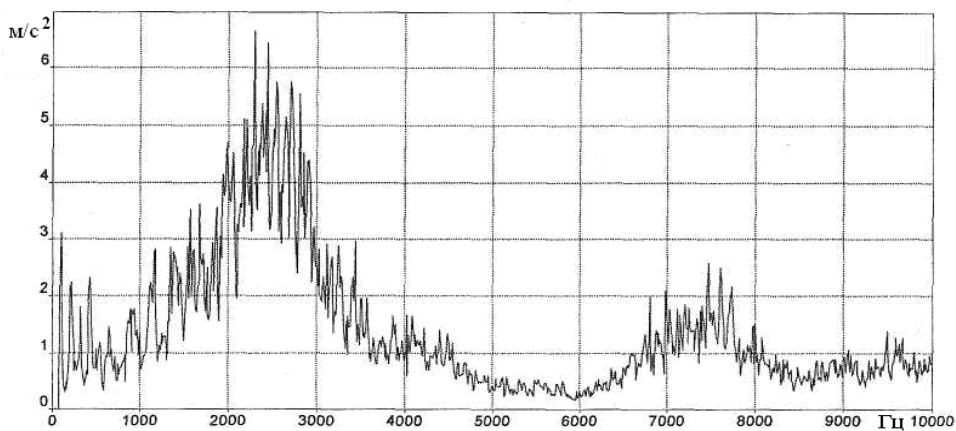
Контроль состояния объектов диагностирования в широких полосах частот базируется на анализе их вибрации при периодическом измерении оператором с помощью виброметра, виброанализатора или автоматизированной встроенной, бортовой или стендовой системой [42, 59].



а



б



в

Рис. 3.47. Спектрограммы третьооктавной (а) и узкополосной (б, в) вибрации двигателя ВАЗ-2108 при частоте вращения 1500 мин^{-1}

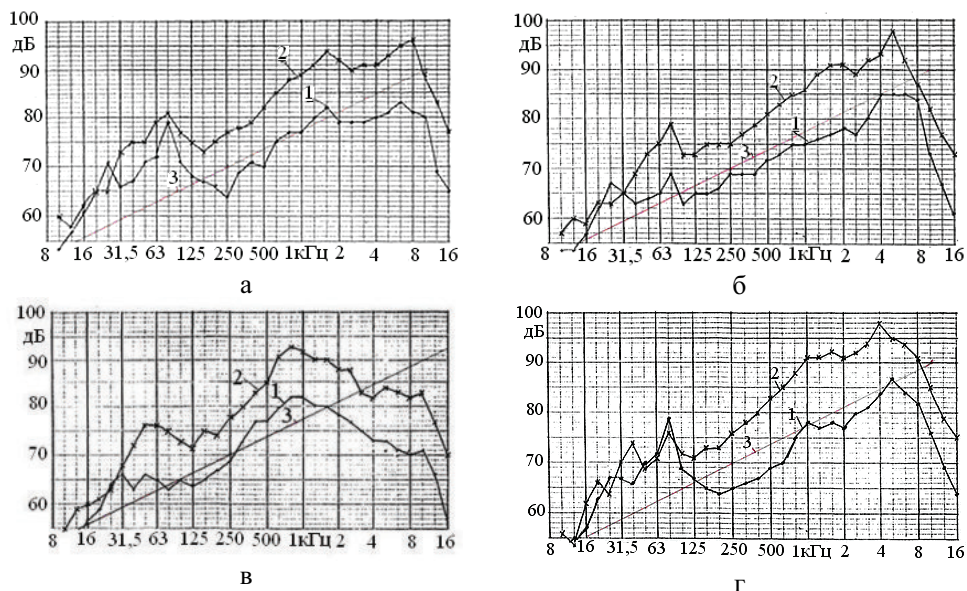
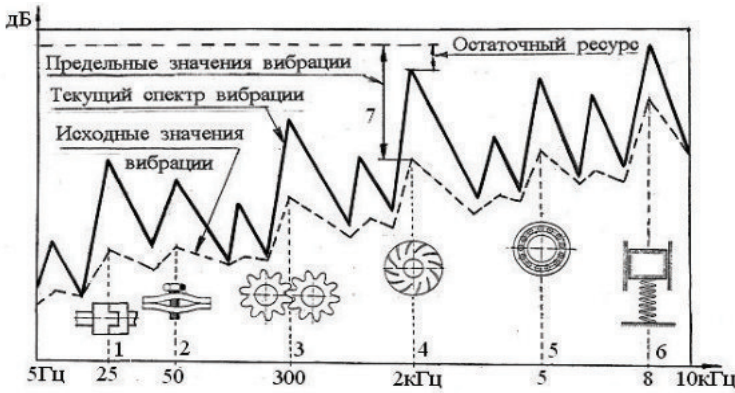


Рис. 3.48. Спектры вибрации двигателя ЯМЗ-236 трактора Т-17221 при частотах вращения 1000 мин⁻¹ (1) и 2000 мин⁻¹ (2):

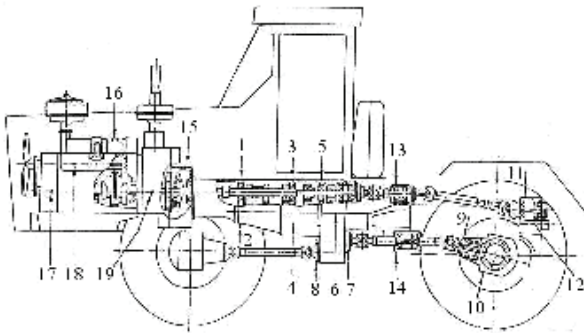
а, б – переднего коренного подшипника (точка 17, рис. 3.49) и заднего коренного подшипника (точка 19, рис. 3.49); в – муфты сцепления в точке 15 (рис. 3.49); г – на головке цилиндров в точке 18 (рис. 3.49); 3 – принятые допустимые (проектные) уровни вибрации, не влияющие на процессы изнашивания

Постоянный или периодический, профилактический или выборочный сбор данных в зависимости от применяемой системы контроля технического состояния может ограничиваться проведением однократного определения широкополосной вибрации бортовой системой. Периодичность контроля осуществляется по заданной наработке, а техническое состояние определяется также при сезонном обслуживании (ремонте) и сравнении измеренных уровней с допустимыми значениями с тем, чтобы указать время, когда скорость ухудшения состояния достигает критического значения и необходим детальный анализ спектра вибрации.

Для периодического или заказного контроля вибрации двигателя достаточно типового виброметра, маршрутной карты информативных контрольных точек (рис. 3.46, 3.48, 3.49) измерения вибрации на каждый двигатель (агрегат), графика периодичности измерений в каждой точке, таблицы классов технического состояния и диагностических признаков дефектов и неисправностей. Такому обслуживанию подлежат двигатели, повреждение и ремонт которых не приводит к перебоям в работе технологического оборудования, не требует выполнения работ в заданные технические сроки, не снижает существенно эффективность производства перевозок, не выполняющие срочные или сезонные работы.



а



б

Рис. 3.49. Структурная схема диагностирования:

а – спектры вибрации: 1-6 – источники вибрации (условные); 7 – допустимое приращение эксплуатационной вибрации;

б – места и точки контроля вибрации трактора Т-17221: 1-8 – коробка передач и раздаточная коробка; 9-10 – мост; 11-12 – редуктор ВОМ; 13-14 – опоры карданных валов; 15 – муфты сцепления; 16 – турбокомпрессор; 17-19 – двигатель

Периодический контроль вибрация дает обзорную картину общего состояния двигателя и выделяет агрегат, узлы и точки контроля, требующие более подробного выборочного анализа вибрации для диагностики дефектов или неисправностей. Такое диагностирование позволяет выдавать предупредительную информацию для составления планов технического обслуживания и графиков ремонта.

Контроль состояния двигателя в широких полосах частот может выполняться стендовыми или бортовыми виброконтрольными устройствами в автоматическом режиме с выдачей заключения о качестве диагностируемого узла и двигателя при приемосдаточных испытаниях, предупреждении и (или) отключении двигателя в случае внезапного ухудшения состояния, что позволяет избежать серьезных отказов.

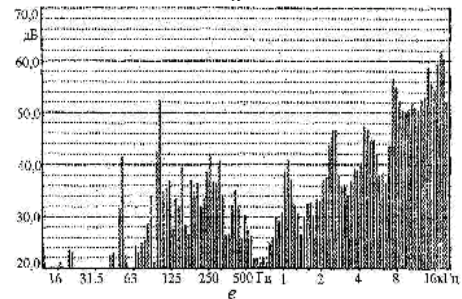
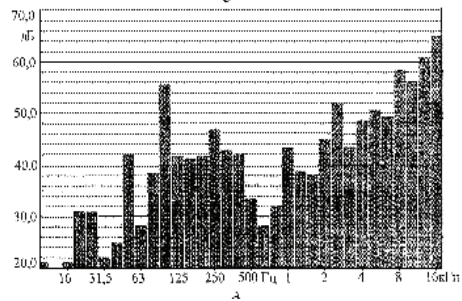
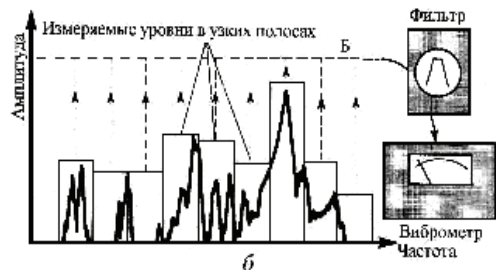
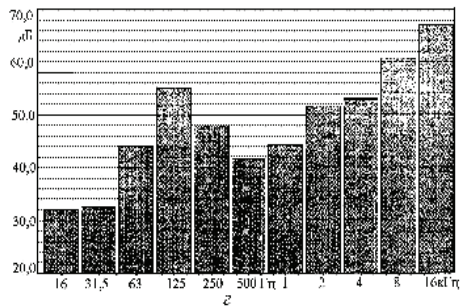
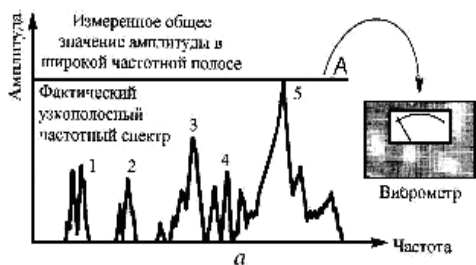


Рис. 3.50. Графические примеры контроля уровней вибрации с различной разрешающей способностью по частоте:

а – в широкой частотной области; *А* – общее значение амплитуды или общий уровень вибрации; 1-4 – отдельные составляющие узкополосного частотного спектра; *б* – с постоянной относительной шириной полосы пропускания, *Б* – третьоктавная полоса частот; *з*, *д*, *е* – с фиксированной шириной полосы пропускания, например, 3 Гц, 10 Гц и т. п. или фильтром с шириной полосы пропускания, равной определенной доли процента от его средней частоты, например, 3%, 6% и т. д.; *В* – плавная развертка частоты; 5 – уровни в узких полосах; 6 – виброанализаторы в реальном времени типа 2033, 2034 фирмы «Брюль и Кьер»

Широкополосная автоматизированная система позволяет определять уровни механических колебаний всех критических узлов, обеспечивая тем самым надежность непрерывного диагностирования (контроля). Широкополосные контрольные устройства с высокой скоростью могут подключаться последовательно к каждому каналу вибропреобразователя, определять соответствующие уровни вибрации объектов диагностирования в широких полосах частот и сравнивать присущие отдельным каналам уровни с предварительно заданными предельными значениями вибрационных параметров.

Любое превышение заданного предельного уровня вибрации может сопровождаться выводом сообщения на световые индикаторы и (или) бортовую центральную ЭВМ для создания и представления графика тенденций с автоматической распечаткой соответствующего предупреждения, создания сигнала тревоги, срабатывания устройств отключения двигателя до того, как неисправность станет критической. Выбор границ широкой полосы контроля вибрации определяется на стадии разработки системы контроля (диагностирования) на основе статистических данных о том, как именно в назначенной контрольной полосе проявляются основные неисправности объекта.

На основе результатов измерения вибрации в полосе частот 10-1000 Гц (согласно стандартам ISO 2372-741, рис. 3.50 (а) или в любой другой широкой полосе можно диагностировать лишь общее техническое состояние узла двигателя. Такой контроль вибрации не позволяет обнаружить изменение состояния всех узлов и деталей до того, как увеличивающаяся амплитуда определенной максимальной составляющей достигает самого большого значения в учитываемой частотной полосе. Из рис. 3.50 (а) видно, что изменение вибрации в широкой полосе определяет преобладающий уровень вибрации 5 одного узла или детали (рис. 3.50, а). Узкополосные составляющие с малыми амплитудами (1-4, рис. 3.50, а) скрыты в более мощной составляющей, в которой предположительно может быть разбаланс, большой изгиб вала и большой механический зазор. При появлении дефектов, например, подшипника, уровень широкополосной вибрации изменяется незначительно, хотя уровень пика небольшого дефекта значительно возрастает. Зарождающиеся дефекты (неисправности: 1-4 на рис. 3.50 (а) подшипников качения, зубчатых передач, износ контактирующих поверхностей и т. д. не могут быть обнаружены при контроле уровней вибрации в широкой полосе, обусловленные, например, амплитудой 3, когда она не превышает уровень составляющей (рис. 3.50, а), могут быть обнаружены на ранней стадии только с помощью частотного анализа.

Назначением контроля состояния двигателя в широких полосах частот может обеспечить текущий контроль уровней вибрации с целью обнаружения предварительных эксплуатационных ситуаций и диагностики неисправностей двигателей, приводящих к предаварийному состоянию. Такой контроль вибрации существенно облегчает обслуживание двигателей и удлиняет срок службы, не допуская необратимых разрушений узлов и механизмов.

Контроль состояния двигателя в узких полосах частот (рис. 3.50, б, е) относится к углубленному распознаванию дефектов (неисправностей) и используется для получения подробной картины состояния двигателя путем изучения частотных спектров вибрации объекта диагностирования. В зависимости от «плотности» распределения дефектов (неисправностей) по частоте и глубине диагностирования технического состояния двигателя контроль вибрации может осуществляться в октавных, третьоктавных (рис. 3.50, г, д) или 1/12-октавных полосах частот, в узкой полосе с разрешением по частоте 3-6% (см. рис. 3.50, е), которые становятся эффективными при диагностировании неисправностей и их причин на основе узкопо-

лосного анализа методом быстрого преобразования Фурье с различными процедурами предварительной и последующей обработки информации. Для этого применяются анализаторы, основанные на быстром преобразовании Фурье, преобразующие сигналы во временной области в узкие частотные полосы спектров. Это способствует эффективному выявлению всех составляющих анализируемых механических колебаний с большой разрешающей способностью по частоте и амплитуде по сравнению с диагностированием в широких полосах частот A (см. рис. 3.50, а). На рис. 3.50 (г, д, е) приведены однооктавные, третьоктавные и $1/12$ -октавные спектры вибрации одной и той же машины, записанные в одно и то же время комплектом приборов типа 2033 и 2313 фирмы «Брюль и Кьер» и других новых виброанализаторов.

Узкополосные виброанализаторы позволяют обнаружить неисправности и дефекты путем сравнения спектров и диагностировать причину этих неисправностей (дефектов) путем анализа в узких полосах частот, расширения спектра, кепстрального анализа и др. Виброанализаторы типа 2515 могут соединяться с базовой ЭВМ для хранения больших массивов информации с последующей ее обработкой и т. п. Анализ спектров вибрации в узких полосах частот параметров гармоник и боковых полос дает предельно раннюю предупредительную информацию о зарождающихся дефектах. Наличие дефекта (неисправности) определяется сравнением двух частотных спектров, зарегистрированных при различной наработке или сравнением зарегистрированного спектра с эталонным. Причину дефекта (неисправности) можно диагностировать путем определения частотных составляющих увеличивающихся уровней вибрации и установления соответствия этих частот известным расчетным или экспериментальным частотам: проявления дефектов механизма и сравнения текущих спектров с эталонными и предельными уровнями вибрации.

Современное развитие цифровых методов обработки сигналов позволяет использовать ряд преобразований, которые определяются не только возможностями программно-аппаратных средств, но и требованиями обеспечения выделения нужной информации об изменении структурных параметров механизмов в наиболее простой и удобной форме. Например, использование в качестве базиса гармонических функций и преобразования Фурье для прямоугольных сигналов приводит к сложным спектрам. В то же время прямоугольные функции и преобразование Уолша существенно упрощают спектр сигнала и, соответственно, его диагностируемую привязку к изменяющимся параметрам технического состояния.

Преимущество частотного анализа в узких полосах частот – ранняя стадия обнаружения дефектов и неисправностей в период t_1-t_2 (рис. 3.51).

Возможность быстрой обработки текущих спектров вибрации и простого, но надежного выявления зарождающихся неисправностей способствуют получению предупреждения на такой ранней стадии, что в запасе имеются месяцы после выявления дефекта (неисправности) до такого момента t_3 , когда ремонт становится неизбежным (см. рис. 3.51). Контроль вибрации двигателя (как и машин в целом) в узких полосах частот с расширением участков спектра, рис. 3.52 [14, 59] позволяет определять зарож-

дающуюся неисправность, трендовые характеристики механизма и прогнозировать момент наступления изменений технического состояния, остаточный ресурс и планировать срок физически обоснованного ТО или ремонта. Этот способ контроля вибрации рекомендуется для диагностирования технического состояния двигателей, выход которых из строя существенно снижает эффективность работы двигателя.

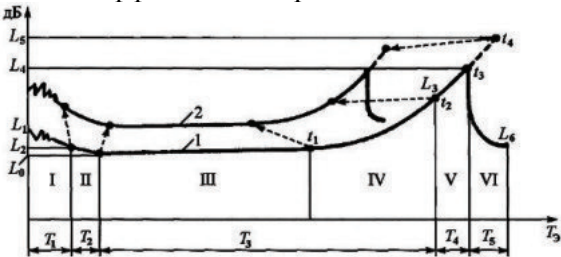


Рис. 3.51. Схема изменения уровней вибрации двигателей в жизненном цикле
 1, 2 – высокий (1) и низкий (2) технические уровни конструкторско-технологической разработки, изготовления и доводки двигателей

эксплуатации до ремонта; T_5 – период доводки и приработки после ремонта; L_0 – уровни вибрации после приработки (обкатки с доводкой); L_1 – уровни вибрации двигателей после изготовления; L_2 – уровни вибрации двигателей после доводки; L_3 – уровни допустимой вибрации двигателей; L_4 – уровни предельных значений вибрации, требующих остановки и решения о пригодности к ремонту, замене узла или двигателя; L_5 – аварийные уровни вибрации двигателей; L_6 – уровни вибрации двигателей после ремонта ($L_6 \geq L_2$).

На рис. 3.51 обозначены: T_1 – период разработки и доводки двигателя; T_2 – период приработки; T_3 – период нормального функционирования; t_1 – начало планово-предупредительного ремонта; участок t_1-t_2 – период зарождения и развития неисправностей; t_3 – оптимальный срок проведения ремонта; t_1-t_2 – период появления отказов; T_4 – предельное значение времени

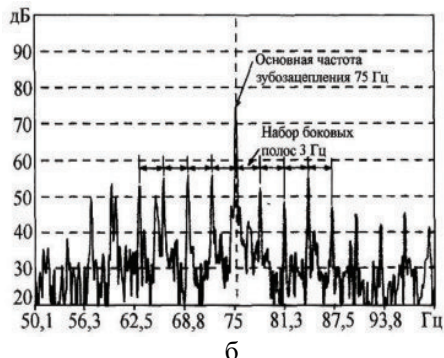


Рис. 3.52. Узкополосные спектры вибрации зубчатой передачи:
 а – спектр, содержащий серию гармоник частоты зубозацепления ведущей шестерни;
 б – расширенный узкополосный спектр в области частоты зубозацепления

Диагностика по спектрам вибросигнала в третьоктавных полосах и на дискретных частотах основана на анализе текущих спектров вибрации диагностируемого узла. Критерием наличия неисправности служат харак-

терные составляющие спектра на несущих частотах элементов узла (см. первая гармоника 75 Гц на рис. 3.52, а), их интенсивность и периодичность. Этот метод позволяет выявлять неисправности ЦПГ, КШМ, ГРМ, подшипниковых узлов зубчатых и других передач значительно раньше, чем акустический или метод диагностики в широких полосах частот. Появление явно выраженных «пиков» в спектре вибрации указывает на появление неисправности, а частота, на которой проявляется «пик», - на источник возбуждения вибрации (рис. 3.52) [14, 59].

Спектральный анализ является одним из широко применяемых и наиболее эффективных методов анализа вибрации и определения неисправностей основных узлов двигателя. Это объясняется как его физической наглядностью, так и возможностью содержательной интерпретации полученных результатов. Частота вибрации является качественным диагностическим признаком, с помощью которого определяется направление поиска дефекта (неисправности). Распределение амплитуд вибрации частотных составляющих характеризует размеры дефекта (неисправности). Частотный анализ позволяет достаточно просто решать задачи по выделению, фильтрации и классификации сигналов, а также задачи по сжатию информации. Выделение дискретных частот (см. рис. 3.53, б) или частотных областей, присущих работе механизма на заданном режиме, осуществляется современными методами частотного анализа с постоянной относительной треть-октавной полосой пропускания и узкополосным анализом с постоянной полосой пропускания, зачастую составляющей доли Герц (см. рис. 3.49, е; 3.52).

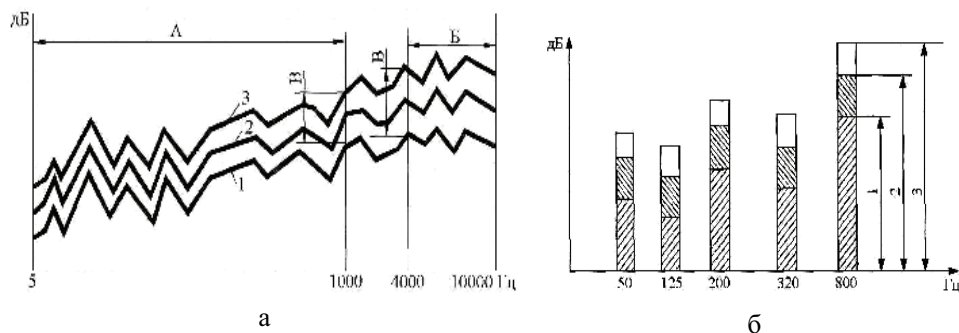


Рис. 3.53. Методы нормирования и контроля вибрации в широких полосах частот:

а - в широких полосах А, Б; 1, 2, 3 - в третьоктавных полосах от 5 до 10000 Гц; б - на характерных дискретных частотах проявления неисправности; 1 - зона уровней вибраций состояния «хорошо»; 2 - зона состояния допустимой вибрации; 3 - зона состояния, требующего принятия мер; В - норма предельного приращения вибрации механизма в эксплуатации

3.12.2.2. Метод спектрального анализа огибающей

Диагностика по спектрам огибающих основана на спектральном анализе огибающей вибропараметров диагностируемого узла. Уровень де-

фекта на диагностических спектрах огибающей определяется по величине модуляции огибающей данного вибросигнала характерной гармонике. Именно в этом модулирующем сигнале содержится информация о техническом состоянии объекта.

Метод огибающей спектра базируется на анализе высокочастотных составляющих вибрации и выявление ее низкочастотных модулированных сигналов. Силы трения, возбуждающие высокочастотную случайную вибрацию, стационарны только при отсутствии дефектов (неисправностей).

Спектр огибающей представляет информацию о периодических изменениях мощности высокочастотной вибрации в выделенной узкополосной ширине частот.

Спектр огибающей при отсутствии неисправности представляет собой горизонтальную волновую линию. При появлении неисправности над уровнем линии начинают появляться дискретные составляющие частоты, которые однозначно рассчитываются по кинематике и вращению элементов объекта диагностирования. Частотный спектр по огибающей позволяет идентифицировать наличие дефекта (неисправности), а превышение соответствующих составляющих над линией однозначно характеризует глубину каждой неисправности, то есть при наличии неисправности величина сил трения и мощность вибрации изменяются во времени, появляется модуляция мощности высокочастотной вибрации (рис. 3.54).

Выявляемые дефекты (неисправности) принято характеризовать в данном методе условными уровнями порогов – слабым, средним, сильным; величиной дефекта и степенью вероятности его появления, выраженных в процентном отношении.

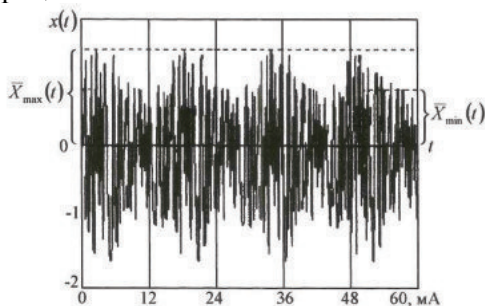


Рис. 3.54. Высокочастотный случайный амплитудно-модулированный сигнал

Глубину модуляции n случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации $x(t)$ можно определить в процентах, используя среднее значение огибающей

$$m = \frac{\bar{X}_{\max}(t) - \bar{X}_{\min}(t)}{\bar{X}_{\max}(t) + \bar{X}_{\min}(t)} \cdot 100\%, \quad (3.31)$$

где $\bar{X}_{\max}(t)$, $\bar{X}_{\min}(t)$ – максимальное и минимальное значение огибающей соответственно.

При изменении вида неисправности частота модуляции изменяется. Чем больше степень развития неисправности, тем больше становится глубина модуляции. Следовательно, частота модуляции определяет вид неисправности, а глубина модуляции – степень его развития. В качестве примера на рис. 3.55 приведены временные сигналы вибрации подшипника исправного (а), с износом (б) и с раковинной на поверхности трения (в). Таким образом, наиболее полная информация содержится в огибающей высокочастотного сигнала. Спектры огибающей вибрации подшипника исправного

(а), с износом (б) и с раковины на поверхности трения (в) представлены на рис. 3.56.

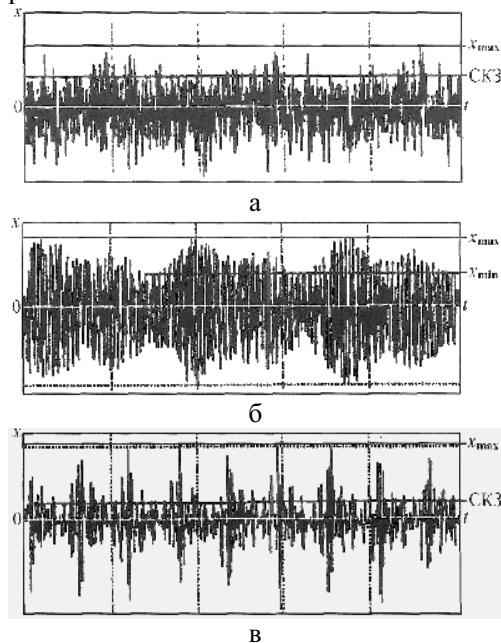


Рис. 3.55. Временная форма высокочастотной случайной вибрации:

а – в бездефектном подшипнике (без модуляции); б – в подшипнике, имеющем неравномерный износ (с модуляцией); в – в подшипнике, имеющем раковины на поверхности трения (с ударами)

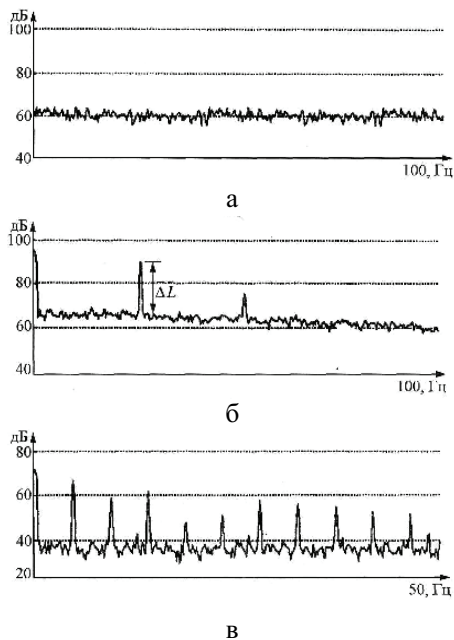


Рис. 3.56. Спектры огибающей высокочастотной случайной вибрации:

а – в бездефектном подшипнике (без модуляции); б – в подшипнике, имеющем неравномерный износ (с модуляцией); в – в подшипнике, имеющем раковины на поверхности трения (с ударами)

Количественное сравнение временных форм (рис. 3.55) оценивается по отношению (3.31), то есть величине пик-фактора, или по более сложным зависимостям, позволяющим обнаружить ударные импульсы, но не модуляцию случайной вибрации. Спектральный анализ огибающей высокочастотной вибрации (см. рис. 3.56) позволяет обнаружить модуляционный процесс. На рис. 3.56 приведены формы огибающей случайных сигналов, показанных на рис. 3.55, которые сильно различаются по спектральному составу. В спектре огибающей модулированного случайного сигнала число гармоник невелико, а в спектре огибающей ударных импульсов количество гармоник может быть большим. Именно по появлению гармонических составляющих в спектре огибающей высокочастотной случайной вибрации обнаруживается факт ее периодической амплитудной модуляции, а по наличию ряда кратных по частоте гармоник – появление ударных импульсов.

В спектре огибающей высокочастотной вибрации можно наблюдать за развитием одновременно всех имеющихся неисправностей по величинам превышения гармонических составляющих на определенных частотах над

фоном. Таким образом, появляется возможность определения парциальных глубин модуляции, то есть глубин модуляции для каждого из имеющихся неисправностей. Это позволяет определять степень развития всех неисправностей и идентифицировать их вид. Следовательно, имеется возможность прогнозировать состояние диагностируемого узла, так как каждый вид дефекта имеет свою скорость развития.

Глубина модуляции m связана с разностью ΔL уровней гармонической и случайной составляющей спектра огибающей выражением

$$m = \sqrt{(10^{\Delta L/10} - 1) \cdot \frac{\Delta f_A}{\Delta f_\phi}}, \quad (3.32)$$

где Δf_A – ширина полосы спектра огибающей; Δf_ϕ – ширина полосы фильтра, выделяющего высокочастотную вибрацию.

Наилучшие результаты метод огибающей дает в случае анализа модуляции не в широкой полосе частот, а в узкой модулирующей полосе сигнала (рис. 3.52).

Анализ спектра огибающей вибрации в области отдельных источников вибрации (рис. 3.52, б; 3.57, 3.58) позволяет выделить частоту модуляции, непосредственно связанную с вызывающей ее неисправностью, глубину модуляции и отношение амплитуды модулирующего колебания к амплитуде колебаний несущей частоты. После анализа огибающей может быть проведено сравнение частотных составляющих с расчетными частотами для определения вида неисправности. Для гармонических сигналов коэффициент глубины модуляции представляет собой отношение амплитуды модулирующего колебания к амплитуде колебаний несущей частоты (см. рис. 3.52, б; 3.57) [25].

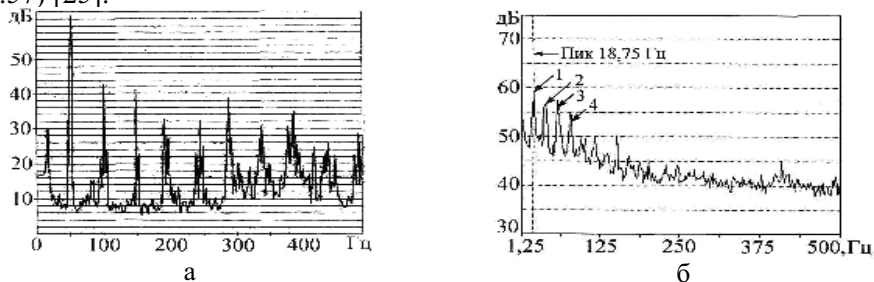


Рис. 3.57. Спектры огибающей вибрации двигателя (а) и внутреннего кольца подшипника (б)

В узкополосном спектре сигнала, как показано на рис. 3.52, б; 3.58, кроме основного ряда гармоник вибрации, у каждой из них появляются еще и боковые сигналы. В этом случае диагностическая информация может содержаться и в таких параметрах, как частота, глубина и форма модуляции. Глубина модуляции определяется соотношением амплитуд основной и первых боковых гармоник, форма – соотношением амплитуд первых боковых гармоник со вторыми, третьими и последующими боковыми гармониками (рис. 3.52, б).

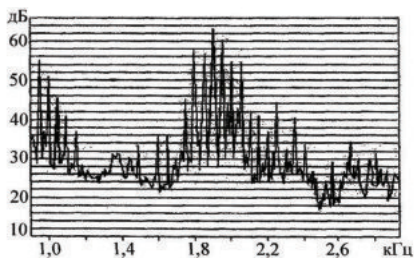


Рис. 3.58. Спектр вибрации на опоре подшипника скольжения электродвигателя, спаренного с редуктором РЦОТ-480

данных и анализирующих пакетов прикладных программ, превращая прибор в сложный диагностический комплекс.

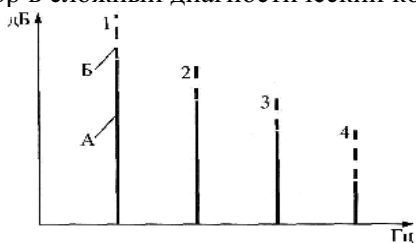


Рис. 3.59. Схема спектра вибрации, отражающая развитие неисправности зубозацепления:

А - исходные уровни вибрации; Б - увеличение уровней вибрации, обусловленное развитием неисправности - показывает незначительное увеличение амплитуды несущей частоты (1) и значительное амплитуд гармоник

Схема спектра вибрации, отражающая развитие неисправности, показана на рис. 3.59.

Метод спектрального анализа по огибающей получил широкое распространение благодаря возможности выявления с его помощью неисправностей на сравнительно ранней стадии развития, а также возможности прогнозирования остаточного ресурса узла. Внедрение метода требует сложной и дорогостоящей выборки

Следует отметить, что для каждого конкретного подшипникового узла требуются свои допустимые уровни, возбуждаемые неисправностью, поэтому в процессе диагностирования необходимо подбирать и постоянно корректировать диагностические параметры узла. Изложенный метод реализуется следующими диагностическими комплексами: Р1-36 (Великобритания), Р-2525 (Дания), Прогноз-1 (Омск, Россия), Вектор-2000 и КПА-1В, Спектр-07 (Санкт-Петербург, Россия) и многими другими [42, 61].

3.12.2.3. Метод спектрального анализа вибрации на резонансной частоте детали, узла, агрегата

Метод основан на анализе гармоник вибрации, возбуждаемых ударными движениями кинематических пар зубчатых передач, подшипниками и другими деталями. Ударные импульсы возбуждают вибрации на резонансных частотах деталей, узлов, корпусов более высокого уровня, чем вибрации на других частотах. В результате значительная энергия концентрируется в узкой полосе спектра, которую легче выделить в общем сигнале. Модуляция резонансной частоты позволяет выделить место неисправности на вращающейся детали.

Наиболее распространенным диапазоном собственных частот корпусов и агрегатов являются низкие частоты, а их деталей – в области частот больших 2 кГц. Резонансную частоту детали или узла можно определить расчетными методами. Однако точнее это можно сделать экспериментально

методом ударного возбуждения с использованием инструментального молотка и вибрoанализатора в реальном времени (рис. 3.60) [39] или вибрoанализатора с плавным фильтром (рис. 3.50, в).

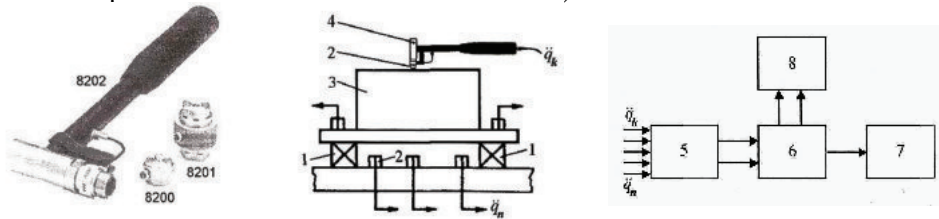


Рис. 3.60. Структурная схема тракта для измерения динамических характеристик конструкций с использованием ударного возбуждения:

1 – виброизолятор; 2 – датчики ускорения; 3 – механизм; 4 – измерительный молоток; 5 – коммутирующее устройство; 6 – двухканальный цифровой анализатор типа 2034 фирмы «Брюль и Кьер»; 7 – двухкоординатный самописец; 8 – запоминающее устройство; \ddot{q}_k - ускорение возбуждающих колебаний; \ddot{q}_n - действующие ускорения в точке системы

Вибрация, создаваемая ударным движением деталей, должна модулироваться один раз за оборот вала, создавая амплитудно-модуляционные боковые полосы. В каждом спектре можно четко видеть характерную частоту проявления неисправности (дефекта) с боковыми полосами модуляции распределенных через интервалы кратные частоте вращения вала, и наоборот, комбинационных частот, содержащие частоту вращения вала и некоторые ее гармоники, которые отсутствуют при исправной работе узла.

Количество и амплитуды боковых полос используются для диагностики причин и размеров дефекта (неисправности). Выход за границы допустимых значений амплитуд боковых полос, полученных на этапе диагностики, служит аварийным сигналом развития неисправности узла (рис. 3.61).

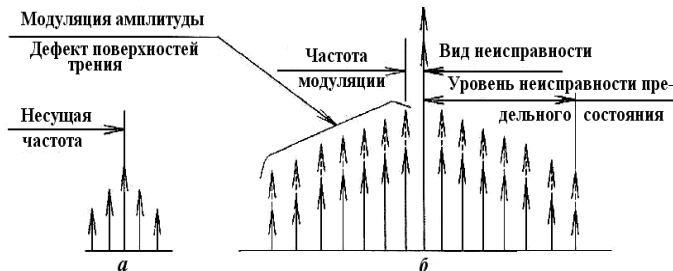


Рис. 3.61. Нормирование вибрации по спектру огибающей неисправности:

а – исходный спектр вибрации; б – предельные значения увеличения модуляции (энергии) вибрации

Широко распространенным случаем появления резонансных частот вибрации являются подшипниковые узлы качения, где при появлении завышенного зазора между наружным кольцом и корпусом (стаканом) не

связанное «жесткой связью» с корпусом наружное кольцо начинает резонировать на собственной частоте кольца. Ослабление посадок деталей, появление повышенных зазоров и неисправностей, усиливающих ударное движение деталей, приводит к ослаблению связей между сопряженными дета-

лями и возбуждению резонансных частот отдельных деталей и узлов [14, 15].

Контрольные вопросы

1. Какие особенности метода спектрального анализа вибрации в широких и узких полосах частот? Какова его разрешающая способность в определении неисправностей объектов диагностирования?
2. В чем заключается преимущество диагностики объектов в автоматических режимах по спектрам вибрации в третьоктавных полосах частот?
3. В чем заключается преимущество диагностирования в узких полосах частот?
4. На чем основан метод спектрального анализа вибрации на резонансных частотах?

3.12.3. Методы углубленного диагностирования источников вибрации

Основными методами углубленного диагностирования неисправностей и дефектов по параметрам вибрации являются [14, 15]:

- спектральный анализ вибрации;
- узкополосный частотный анализ вибрации;
- анализ спектра вибрации по огибающей;
- анализ ударных импульсов;
- кепстральный анализ вибрации;
- фазовое сравнение сигналов вибрации;
- амплитудно-временной анализ сигналов вибрации;
- корреляционный анализ или анализ взаимных спектров вибрации;
- определение акустической эмиссии;
- статистический анализ вибрационных характеристик объекта диагностирования;
- модуляция вибрационных процессов;
- амплитуды вибрации пик-фактора;
- величина эксцесса;
- резонансные частоты узла (детали) механизма, газовых и гидравлических потоков;
- сопоставление изменений уровней и частот вибрации при изменении частоты и других режимов работы технической системы.

3.12.3.1. Метод разделения фазовых соотношений сигналов

Любая сложная колебательная система представляет собой конструкцию с разнесенными в пространстве источниками вибрации. Сигнал вибрации, измеренный в произвольной точке системы, является результатом одновременного проявления разных вынуждающих вибрацию сил, в том числе и совпадающих по частоте.

Решение диагностических задач в этом случае может основываться на сравнении форм колебаний механизма под действием вынуждающих сил одной частоты, имеющих различную природу. Примером является разделение статической и динамической неуравновешенности роторов (валов), уз-

лов двигателя (турбокомпрессора, генератора, насоса и др.) по фазовому соотношению сигналов вибрации, измеряемых на опорах в одной осевой плоскости двигателя. Аналогично можно определить вид перекоса муфт, несоосность, излом, смещение оси линии вала ГРМ, коленчатого вала или вала при стыковке с коробкой передач и другими агрегатами. Фазовый угол вибрации – важнейший параметр вибрационной диагностики, так как он помогает распознать различные причины вибрации. Стробированный свет фиксирует отметку, сделанную на валу, и показывает, как изменяется фазовый угол вибрации от одного конца вала к другому или как угол изменяется со скоростью, стабилен или нет. Вибрационное движение может совпадать по фазе с неисправностью, которая вызывает его, либо может отставать и на 90° , 180° или на некоторый другой угол.

Изменение знака сдвига фазы с плюса на минус, значения фазового угла являются диагностическими признаками дефектной сборки, характера нарушения монтажа. Данные о фазовых соотношениях кратных гармоник колебательного процесса являются существенным дополнением к данным амплитудного спектра вибрации.

Для контроля фазового угла вибрации желательно использовать двухканальный анализатор, в котором один канал предназначен для принятия синхронизирующего сигнала с частотой вращения. Он может формировать график фазы в зависимости от частоты, амплитудно-частотные и амплитудно-временные графики.

В генераторе двигателя и других электрических машинах, например, по форме колебаний вибрацию можно разделить на создаваемую радиальными электромагнитными силами в зазоре и создаваемую пульсирующими моментами.

Формы колебаний механизма на фиксированной частоте определяют по результатам фазовых измерений сигналов вибрации. Для этого измеряют разности фаз гармонических колебаний в двух точках или разности фаз колебаний механизма в одной точке и синхронного опорного сигнала невибрационного происхождения с помощью тракта, содержащего два полосовых фильтра и фазометр.

Погрешность измерения фаз детерминированных сигналов определяется параметрами фазометра и фазочастотными характеристиками полосовых фильтров.

Наличие опорного сигнала, совпадающего по частоте с гармонической составляющей, позволяет использовать методы синхронного анализа вибрации. Применение синхронного фильтра на выходе фазометра позволяет выделить гармоническую составляющую фильтром с полосой, обеспечивающей значительное снижение случайных составляющих. Синхронные фильтры, реализующие алгоритмы синхронного накопления, могут иметь эффективную полосу в сотни долей Герц, что обеспечивает сведение до минимума ошибки измерения фазы гармонической составляющей на фоне случайной составляющей.

Биспектр позволяет выявить фазовую информацию даже при наличии шумовой помехи. Наиболее чувствительной к фазовому соотношению является функция бикогерентности.

В ряде случаев при разделении суммы периодических сигналов на составляющие необходимо измерять начальные фазы кратных гармоник. Для этого необходима модель сигнала, представляющего собой сумму гармонических составляющих с кратными частотами и случайных составляющих. Точность определения начальных фаз составляющих сигнала повышается при наличии опорного гармонического сигнала. В этом случае средние квадратические отклонения разности фаз зависят только от величины среднего квадратического отклонения начальных фаз.

Фазовая информация позволяет увидеть объект диагностирования под несколько иным углом зрения, а способы извлечения фазовой диагностической информации менее дорогостоящие и трудоемкие, чем способы построения диагностических признаков на основе амплитудно-частотного спектрального анализа.

3.12.3.2. Амплитудно-временной анализ сигналов вибрации

Амплитудно-временной анализ применяется для выделения периодического кинематического цикла механизма в КШМ, ЦПГ, ГРМ, работы форсунок и колебаний давления топлива в аккумуляторе, вращения коленчатого вала, вибрация которых представляет собой чередование циклов ударных импульсов, обладающих жесткой временной последовательностью контакта различных кинематических пар. Каждый из импульсов, создаваемых при этих контактах, имеет свою амплитуду, длительность и высокочастотное заполнение. Это обстоятельство, а также быстрое затухание импульсов во времени, позволяет разделять импульсы, сформированные различными парами и режимами работы (рис. 3.62 [43], 3.63). Стробирование сигнала при его временной селекции обеспечивает подавление сигналов, расположенных вне строба, то есть является в данном случае помехой диагностирования.

При ударном возбуждении на спектре вибрации, синхронизированной оборотной частотой, можно выделить момент появления удара, его длительность, частоту заполнения импульса, период следования и форму импульса, если эти импульсы не накладываются друг на друга (рис. 3.62, 3.63). Таким способом можно выявить, например, появление раковин на одной из контактирующих поверхностей – на зубе шестерни или беговой дорожке подшипника качения. Например, временной график вибрации шестерни, запускаемый сигналом от шпоночной канавки вала, может совершенно точно показать такой дефект (неисправность) как сломанный зуб шестерни.

Метод ударных импульсов прост в реализации, обладает высокой чувствительностью и широко используется, поскольку существуют простые, портативные приборы, реализующие этот метод.

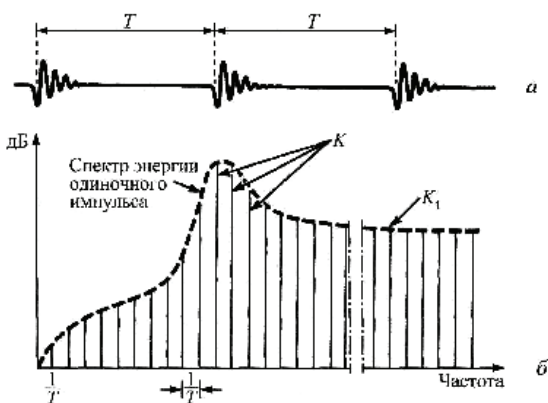


Рис. 3.62. Упрощенная модель импульсного сигнала и соответствующего спектра

расширение гармоник с высокими порядковыми номерами, обусловленных флуктуациями рабочей скорости и т. п.

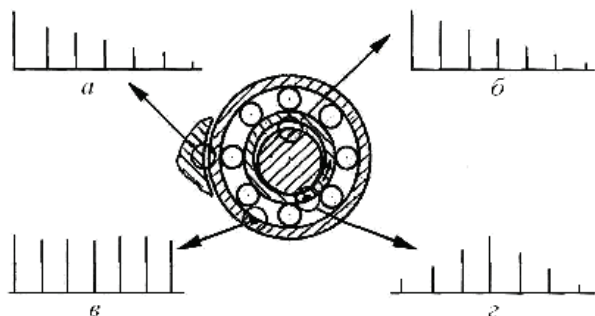


Рис. 3.63. Неисправности подшипникового узла качения

a – огибающая на неподвижном кольце несет информацию о частоте повторения импульсов прокатывания тел качения, имеет одинаковую амплитуду; b – огибающая импульса неисправности на вращающемся кольце, имеет амплитудную модуляцию.

Математически процесс временной селекции сигнала $y(t)$ из зависимости процесса от времени $x(t)$ может быть представлен формулой

$$y(t) = \sum_{k=0}^n x(t) \cdot g(t - k \cdot T - \tau), \quad (3.33)$$

где

$$g(t) = \begin{cases} 1 & \text{для } k \cdot T + \tau + t' \leq t \leq k \cdot T + \tau + t'' \\ 0 & \text{для всех других } k \end{cases},$$

T – период следования импульсов процесса; $t'' - t'$ – ширина строба; τ – время задержки стробирующего импульса.

Другой прием временной обработки сигнала – синхронное накопление для выделения периодического сигнала на фоне аддитивных помех (рис. 3.64). Этот процесс осуществляется на основе выражения

На рис. 3.62 приняты следующие обозначения: a – сигнал во временной области; b – спектр одного импульса в частотной области; $1/T$ – расстояние между спектральными линиями гармоник, имеющих наибольшие амплитуды вблизи резонансной частоты системы; K – дискретные составляющие спектра повторяющихся периодически импульсов; K_1 –

На рис. 3.63 приняты следующие обозначения: a, b – низкочастотная вибрация, возбуждаемая дефектами натягов-зазоров посадок, имеет амплитудную модуляцию с частотой вращения; c, d – высокочастотные вибрации, возбуждаемые дефектами внутреннего и внешнего колец подшипника;

$$y(t) = \sum_{k=1}^n [A(t - k \cdot T) + z(t - k \cdot T)], \quad (3.34)$$

где $A(t)$ – амплитуда искомой компоненты с периодом T ; $z(t)$ – случайная помеха.

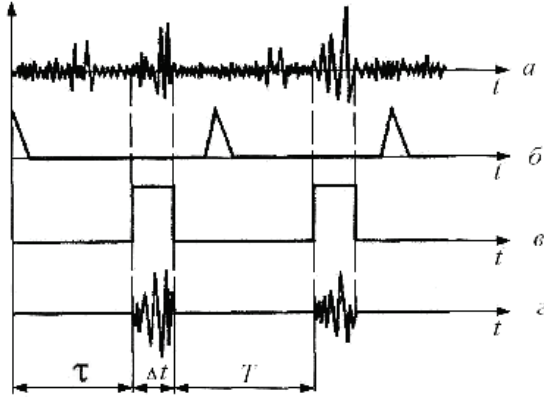


Рис. 3.64. Стробирование ударных импульсов

помех пропорциональна n , если время усреднения больше интервала корреляции помех. Отношение «сигнал-помеха» на выходе синхронного накопителя в n раз превышает то же отношение на входе.

На рис. 3.64 обозначены: a – физический процесс; b – синхроимпульс с датчика оборотов; c – окно селекции; z – «полезный» сигнал; T – период; Δt – ширина стробирующего сигнала; τ – время запаздывания стробирующего сигнала.

Энергия детерминированной составляющей при суммировании реализаций сигналов при n периодах растет пропорционально n^2 , тогда как энергия случайных

3.12.3.3. Кепстральный анализ вибрации

Выявление временной зависимости кепстра, то есть квадрата преобразования Фурье над квадратом логарифма частотного спектра сигнала (логарифмическим спектром мощности) выражается следующей формулой:

$$k(t) = \left\{ \int_0^{\infty} \lg F(\omega) \cos \omega \tau d\omega \right\}^2, \quad (3.35)$$

где $k(\tau)$ – кепстр; $F(\omega)$ – спектр мощности сигнала.

Кепстральный анализ используется для идентификации серии гармоник, боковых полос спектров и для оценки их относительной мощности (рис. 3.65). Поэтому кепстральный анализ для диагностики высокооборотных двигателей с жестко соединенной коробкой передач и большим числом взаимосвязанных источников вибрации имеет определенные преимущества перед спектральным анализом, так как логарифмическое преобразование (псевдокорреляция) делает результат менее чувствительным к неоднородностям спектра.

Кепстр отличен от нуля, когда неоднородности функции наблюдаются в периодически расположенных точках. Если в сигнале присутствует несколько гармонических рядов с частотами Ω_i , где $i=1,2,\dots$, то кепстр отличен

от нуля в точках $\tau_i = \frac{2\pi}{\Omega_i}$. Таким образом, кепстр отличен от нуля, когда в сигнале есть периодически следующие друг за другом импульсы или модулированные сигналы.

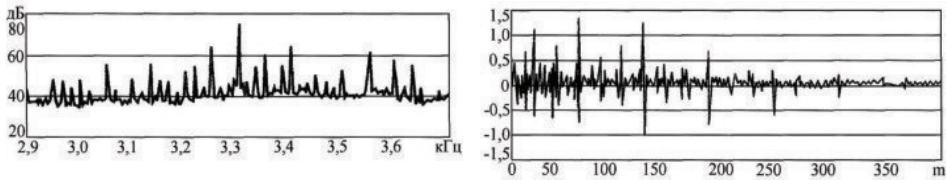


Рис. 3.65. Спектральная и кепстральная функции вибрационного сигнала, создаваемого электрической машиной

Если в сигнале имеются несколько таких рядов, то по виду функции $F(\omega)$ их невозможно отделить друг от друга, так как комбинированные частоты накладываются друг на друга. Кепстр для каждого гармонического ряда принимает значение, положение которого на временной оси определяется периодом $\frac{2\pi}{\Omega_i}$, а величина – амплитудами всех гармоник ряда.

В вибрационном сигнале коробки передач (редуктора) можно таким образом выделить ряды из гармоник оборотной, зубцовой, циклической частот. На рис. 3.66 (а) показана спектральная функция вибрационного сигнала редуктора, а на рис. 3.66 (б) – его кепстральная функция. Значения пиков на кепстральной характеристике удобнее использовать в качестве диагностических признаков [44].

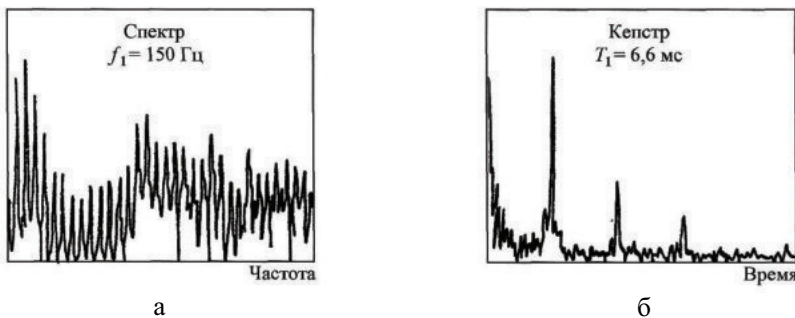


Рис. 3.66. Спектральная и кепстральная функции вибрационного сигнала, создаваемого редуктором

Виброанализаторы 2034, 2031, Textronix-2630, R&S FSVR13, Ониск и др. позволяют также оценивать интенсивность сигналов, находить взаимный спектр двух процессов и выявлять вероятностные характеристики – взаимную корреляционную функцию, находить кривую распределения вероятностей и плотность распределения. Эти приборы осуществляют анализ с помощью цифровых фильтров, являются типовыми приборами современной перспективной измерительной аппаратуры на основе средств цифровой вычислительной техники с использованием микропроцессоров для специализированных целей.

Кепстральный анализ производится для исследования процессов модуляции колебаний и выделения комбинационных частот. Производится «выбеливание» спектра с выделением частот модулированных сигналов гармонических рядов (рис. 3.65). Значение пиков на кепстральной характеристике удобнее использовать в качестве диагностических признаков. При выполнении кепстрального анализа, особенно с целью диагностирования зубчатой передачи, следует исключить низкочастотные гармоники, которые могут дать пики в кепстре.

Кепстр не позволяет получить компактную и наглядную информацию о состоянии механизма. Кепстр, в отличие от функции корреляции, менее чувствителен к неоднородностям спектра (изменениям общей формы и ширины по оси), поэтому он имеет отличные от нуля значения только при больших периодических составляющих. Положение и величина пиков кепстра являются диагностическими параметрами. Вместе с тем, это не всегда наблюдается на практике. Не всегда можно обнаружить, что рост амплитуды кепстра происходит монотонно в зависимости от времени, а следовательно, он не является критерием неисправности. На значения кепстра влияют многие факторы: отношение сигнал-шум, ширина полосы пропускания фильтра, частота модуляции и другие. Поэтому сравнивать можно кепстры, полученные в идентичных условиях. Пока не будет полностью проанализирован вибросигнал, кепстральный анализ не может быть эффективно использован. Кепстральный анализ в значительной степени не чувствителен к изменениям фазы исследуемых сигналов и к параметрам путей распространения механических колебаний. Например, кепстры механических колебаний двух подшипников в коробке передач почти идентичны друг другу. Основное преимущество кепстра заключается в разделении смешанных сигналов, содержащихся в спектре по всему частотному диапазону в виде множества модуляционных компонентов, превращая его в ограниченное число (2-3 компонента).

График кепстра (рис. 3.65, 3.66) содержит пики, положение которых на оси времени соответствует периодам гармонических рядов составляющих спектра вибрации. Высота пиков определяется амплитудами всех гармонических составляющих ряда. Кепстр является инвариантной функцией по отношению к месту установки датчика на механизме, поскольку он реагирует на изменение всех модуляционных компонентов в совокупности, в то время как амплитуда спектральных компонентов очень сильно зависит от положения датчика.

3.12.3.4. Корреляционный анализ спектра вибрации

Сигналы, регистрируемые при работе механизмов и рабочих процессов двигателя имеют сложный и различный характер. Как правило, это периодические сигналы, спектр которых отражает колебания тех или иных элементов двигателя. Корреляция – это мера сходства двух волновых форм или функция временного смещения между ними. Если волновые формы достаточно различны, процесс называется взаимной корреляцией. Взаимная

корреляция двух сигналов является характеристикой их подобия, определяемой в функции сдвига их по времени. При исследованиях вибрации нахождение функции взаимной корреляции позволяет легко обнаружить сигнал вибрации даже на фоне шума, превышающего уровень сигнала на два порядка. Метод взаимной корреляции позволяет определить путь прохождения вибрационных возмущений. Если возможно несколько путей, то методом взаимной корреляции можно определить основной из них. Корреляционный анализ или анализ взаимных спектров позволяет выявить скрытую периодичность, выделить когерентную составляющую виброакустического сигнала, определить вклад отдельных сигналов в суммарный сигнал, определить оптимальное количество информативных точек и частотных полос спектра диагностируемого объекта, разделить случайные сигналы.

Вклад отдельных элементов двигателя в общий сигнал вибрации может быть оценен фиксацией корреляционных связей между колебаниями отдельных элементов или оценкой вклада отдельных сигналов в суммарный сигнал при помощи корреляционного анализа или анализа взаимных спектров. Одно из наиболее распространенных применений взаимного спектра – оценка передаточной функции линейной модели объекта диагностирования при случайных входных возмущениях. Поэтому доля каждого из источников в создании общей вибрации может быть определена по результатам экспериментальных измерений взаимных спектров динамических сил в этих источниках и комплексных механических податливостей (или сопротивлений) конструкций механизмов. Динамические силы, развиваемые в исследуемом источнике, обычно мало зависят от процессов в других источниках этого же механизма. На эту связь незначительно влияют динамические характеристики статорных конструкций роторного механизма (турбокомпрессора или генератора). Взаимного влияния между силами, развиваемыми в источниках однотипных механизмов, практически не наблюдается.

Колебательная энергия в механизмах распространяется в виде волн различных типов. Эффекты взаимного преобразования волн, а также неравномерность фазовых и амплитудных значений передаточных динамических свойств конструкций приводит к тому, что вибрационные сигналы в полосе частот на входе и выходе системы отличаются друг от друга по временным, частотным и фазовым характеристикам. Происходит потеря корреляционной связи между сигналом вблизи источника колебаний с сигналом на корпусе и опорных поверхностях механизмов, даже если в механизме имеется только один источник. Это накладывает ограничение на ширину полосы пропускания фильтров при измерениях взаимных спектров. Допустимой является полоса шириной около $1/6$ октавы.

Анализ сложных сигналов, представляющих собой сумму сигналов от пространственно разнесенных источников вынуждающих сил, требует построения корреляционных и взаимно корреляционных функций либо взаимных спектров сигналов вибрации, измеряемых в разных точках механизмов и оборудования двигателя. На основе статистического анализа корреляционных зависимостей измеряемых уровней вибрации во многих точках механизмов двигателя и коробки передач производят отбор наиболее ин-

формативных диагностических точек и полос частот диагностирования двигателя и коробки передач. Из множества точек, имеющих сильную корреляционную связь, оставляют одну статистически независимую точку.

Контрольные вопросы

1. Перечислить основные методы углубленного вибрационного диагностирования.
2. В чем заключается метод фазовых соотношений сигналов вибрации?
3. Для выяснения каких параметров применяется амплитудно-временной анализ вибрации?
4. В чем заключается преимущество кепстрального анализа вибрации по сравнению со спектральным анализом?
5. Какое наиболее распространенное применение метода сравнения взаимных спектров?

3.12.4. Статистические методы оценки технического состояния объекта диагностирования

Обнаружение зарождающихся неисправностей по величине эксцесса. Центральным моментом четвертого порядка используют для оценки степени отклонения плотности распределения от нормального распределения вероятностей. Для нормального распределения эксцесс равен нулю. Изменение высоты и степени острровершинности характеризует изменение плотности вероятности амплитуд вибросигнала, отражает состояние механизма независимо от его скорости вращения и геометрии.

Коэффициент эксцесса обладает наибольшей чувствительностью из общеизвестных вероятностных характеристик. Он характеризует положение вершины и сглаженность этой кривой.

Использование эксцесса распределения связано с тем, что выбросы в сигнале при появлении ударного возмущения искажают форму закона распределения, что сказывается на величине эксцесса. При исправном состоянии механизма распределение амплитуд вибрации близко к нормальному. По мере увеличения импульсов распределение отклоняется от нормального за счет увеличения «хвостов» кривой на рис. 3.67 [39].

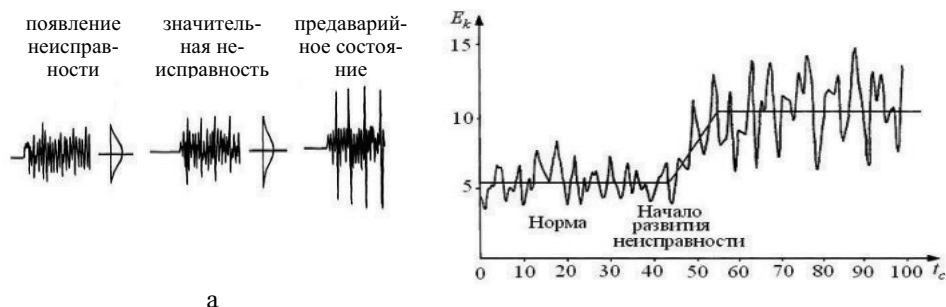


Рис. 3.67. Обнаружение неисправности по величине эксцесса

На рис. 3.67 обозначены: а – временная характеристика вибрационного сигнала и кривые распределения вероятности амплитуд вибрации при различных состояниях подшипника; б – временной ряд значений эксцесса вибрации при развитии задира деталей ЦПГ дизеля.

При развитии неисправности до степени разрушения, например, подшипника скольжения, возрастание уровней вибрации над опорным достигает 30-35 дБ. Большой динамический диапазон создает удобства в использовании коэффициента эксцесса в качестве диагностического признака подшипников качения, скольжения, зубчатых передач и других пар трения узлов двигателя. Выбор времени усреднения для получения стабильных значений этого признака в зоне нормального функционирования и больших отклонений его в зоне разладки производится по данным эксперимента.

Метод очень чувствительный к количеству и интервалу выборки, к положению вибропреобразователя на корпусе механизма двигателя. Установку вибропреобразователей целесообразно производить непосредственно на диагностическом узле, например, на детали подшипника. Для уменьшения влияния качества и интервала вибрации на точность определения эксцесса контролировать развитие неисправности можно по эксцессу амплитудной огибающей узкополосного процесса в окрестности собственной частоты узла.

Статистический анализ вибрационных характеристик. В большинстве случаев при исследовании динамических процессов основными статистическими оценками совокупности мгновенных значений являются следующие оценки: минимальное и максимальное значение выборки, среднее значение, дисперсия, эксцесс, асимметрия, средние квадратические отклонения уровней вибрации, гистограмма частот выборки для интервалов, критерий согласия теоретического распределения (нормального и др.) с эмпирическим, функция корреляции, кепстр, биспектр. К вспомогательным статистическим оценкам можно отнести: размах выборки, медиану, моду, коэффициент вариации. Однако в настоящее время еще нет достаточного опыта, на основании которого можно разработать конкретную методику, позволяющую использовать упомянутые статистические характеристики вибрации для виброакустической диагностики состояния машинного оборудования.

Наиболее чувствительными к форме кривой распределения статистических параметров являются моменты высших порядков. С их помощью можно оценить величину и частоту пиковых значений амплитуд вибрации, которые могут характеризовать, например, состояние подшипника.

Гистограмма является оценкой распределения плотности вероятности процесса. Методы математической статистики не позволяют по экспериментальным гистограммам однозначно определить закон распределения уровней вибрации, а лишь дают количественную оценку согласия экспериментальных данных предварительно выбранному теоретическому закону распределения.

Критериев предварительного выбора теоретического закона распределения не существует – этот выбор целиком зависит от исследователя. Как

правило, по экспериментальным данным находят моменты статистического распределения, на основе их анализа выдвигают в качестве альтернативных известные теоретические законы распределения и производят количественную оценку согласия последовательно с каждым из них. Степень расхождения данных с выбранным теоретическим законом распределения характеризуется функцией отклонения экспериментальных данных от среднестатистических. Вид функции отклонения зависит от выбранного критерия согласия. Наиболее часто для решения подобных задач используется критерий χ^2 .

Функцию корреляции целесообразно использовать в тех случаях, когда изменение состояния узла приводит к резкому переходу от шумового процесса к дискретному или наоборот.

При модуляции вибрационного случайного процесса периодическим колебанием диагностическим параметром может стать дисперсия уровня вибрации или корень из этой величины. Значение дисперсии заметно увеличивается при износе механизмов; асимметрия и эксцесс также могут свидетельствовать об отклонении от гауссового процесса.

При модулированном вибрационном процессе значительную информацию о состоянии механизма несет само изменение амплитуды колебаний, поэтому в качестве диагностических признаков используют параметры огибающей или дисперсию уровня вибрации.

Для уменьшения ошибок в определении большинства статистических параметров состояния двигателя минимальное число однотипных механизмов должно быть не менее 20-30, а интервал выборки, например, сигнала, не менее интервала корреляции рассматриваемого процесса. При нормировании вибрационных характеристик двигателей интервалов в выборке не должно быть, то есть испытываются двигатели в строгой последовательности.

Основной вибродиагностической моделью двигателя должна быть модель, обеспечивающая диагностирование состояния в пространстве признаков. При этом принципиально не исключается диагностика в пространстве параметров, так как при соответствующей модели в определенных случаях это может оказаться целесообразным.

Анализ результатов экспериментальных исследований уровней вибрации больших групп однотипных механизмов и оборудования показывает, что большинство гармонических и случайных составляющих вибрации удовлетворяют законам распределения: нормальному, Релея, Релея-Рейса. Однако в отдельных случаях могут иметь место и более сложные распределения. Так, уровни ряда составляющих могут характеризоваться законом распределения произведения двух случайных величин, каждая из которых распределена по собственному закону. Имеющиеся исключения приведенных законов распределения, как правило, связаны с недоработками в конструкции двигателя, например, совпадением собственных частот колебания с частотой наиболее значительных вынуждающих сил; несовершенством технологических процессов изготовления двигателей, механизмов и машин, особенностями проведения измерения и рядом других условий.

Задача нахождения возможных и допустимых разбросов значений показателей качества выпускаемых двигателей и оценка их технического состояния при эксплуатации может решаться с использованием методов и законов теории вероятностей и математической статистики. Необходимость применения этих методов обусловлена существенным влиянием случайных факторов на значения показателей качества и технического состояния (неоднородностью структуры металлов, элементов и узлов, колебанием упруго-инерционных характеристик элементов и узлов, изменением условий сборки узлов, условий эксплуатации и др.).

При нормировании значений показателей качества и технического состояния двигателей необходимым является решение следующих задач: определение закона распределения значений показателей и параметров этого закона, определение доверительных границ и интервалов для параметров распределения.

Установленный по результатам измерений выборки двигателей закон их распределения сравнивается с теоретическим законом распределения. Анализ работ показывает, что наиболее распространенными критериями оценки согласия опытного и теоретического распределения спектра вибрации новых двигателей при изготовлении являются критерии А. И. Колмогорова, X^2 и Ω^2 . Правила применения, этих критериев приведены в ГОСТ 11.006-74. В процессе установления закона распределения показателя вибрации двигателя конкретного типоразмера определяют параметры распределения: среднее значение S , дисперсию L и среднее квадратическое отклонение σ .

Для нормального распределения значений показателя его нижняя и верхняя границы определяются из следующих соотношений:

$$X_H = S - \frac{V_1}{V_2} \cdot \sigma, \quad X_B = S + \frac{V_{21}}{\sqrt{n}} \cdot \sigma \quad (3.36)$$

при известном значении σ .

Таблица коэффициентов V_1 , V_2 , а также формулы для оценки среднего квадратического отклонения σ выборки значений приведены в ГОСТ 11.004-74. При оценке параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона можно использовать ГОСТ 11.004-74, а параметров распределения Вейбулла – ГОСТ 11.007-75.

Статистический подход успешно применяется в процессе нормирования уровней вибрации машин различного назначения и устанавливается рядом действующих стандартов.

Надежность определения предельно допустимых значений вибрации двигателей (норм и опорной вибрации) при статистическом подходе зависит от объема выборки, то есть от количества двигателей, результатов измерения. Для решения этого вопроса можно также воспользоваться статистическими методами. Ряд чисел, определяющий виброактивность двигателей, можно охарактеризовать средней величиной

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{n}, \quad (3.37)$$

где L_i – значение уровня вибрации i -го двигателя; n – количество двигателей.

Оценка амплитудной неоднородности (разброса) спектра может быть осуществлена по коэффициенту вариации

$$V = \pm \frac{\sigma}{\bar{L}} \cdot 100\% \quad (3.38)$$

Среднее квадратическое отклонение характеризуется величиной

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} \quad (3.39)$$

Для повышения достоверности верхнего уровня допустимой вибрации можно устанавливать максимально возможное среднеквадратическое отклонение значений диагностического параметра

$$\sigma_n = \gamma \cdot \sigma \quad (3.40)$$

где γ – табулированная величина, зависящая от доверительной вероятности и числа исследуемых объектов; σ – среднее квадратическое значение измеряемой величины, например, доведенных двигателей при изготовлении.

Верхний уровень допустимой вибрации

$$L_{\max} = \bar{L} + t_p \cdot \sigma, \quad (3.41)$$

где t_p – табулированная величина, зависящая от доверительной вероятности и показывающая в долях ширину доверительного интервала.

Рассчитанные по формуле (6.41) значения верхнего уровня допустимой вибрации при нормировании мало чем отличаются от так называемых трехсигмовых норм

$$L_{\max} = \bar{L} + \frac{3}{\sqrt{n}} \cdot \sigma. \quad (3.42)$$

Из теории вероятностей известно, что в пределах $\bar{L} \pm \sigma$ будет находиться 68,3% всей совокупности результатов контроля вибрации двигателей; в пределах $\bar{L} \pm 2 \cdot \sigma$ – 95,4%; в пределах $\bar{L} \pm 3 \cdot \sigma$ – 99,7%.

При определении среднего уровня вибрации двигателей используется не вся совокупность выпускаемых двигателей, а определенная выборка из общего их числа. Поэтому для большей достоверности оценки среднего уровня вибрации необходимо внести показатель, позволяющий по частотному значению среднего уровня судить об истинной его величине. Таким показателем может являться средняя ошибка средней величины \bar{L} , определяемая из соотношения

$$K = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.43)$$

По величине \bar{L} и K можно судить о надежности, получаемой средней \bar{L} .

Средняя ошибка от средней величины характеризует показатель точности и вычисляется по формуле

$$C = \pm \frac{K}{L}, \% \quad (3.44)$$

Зная показатель точности C и коэффициент вариации V средней величины, можно вычислить необходимое число двигателей или результатов измерения

$$N = \frac{V^2}{C^2}. \quad (3.45)$$

Результат определения количества двигателей из соотношения (3.44) обеспечит получение с вероятностью 68,3% величины среднего значения, отклоняющегося от истинного среднего с точностью, не превышающей C .

Контрольные вопросы

1. При каких задачах обнаружения неисправностей применяется величина эксцесса вибрации?
2. Какие значения параметров используются при статистической оценке вибрации?
3. Какую роль играет объем выборки для уменьшения ошибок при определении большинства статистических параметров состояния двигателя?
4. Почему при нормировании вибрационных характеристик двигателей они испытываются в строгой последовательности изготовления?

3.12.5. Методы пик-фактора, акустической эмиссии и опорных спектров-масок

3.12.5.1. Метод пик-фактора

Для определения пик-фактора необходимо виброметром определить два параметра вибросигнала:

- среднеквадратические значения уровня (СКЗ) вибрации, то есть энергию вибрации;
- пиковую амплитуду (ПИК) вибрации.

Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактором. В спектре нового подшипника присутствуют стационарные сигналы шума (рис. 3.68, а).

Со временем по мере появления неисправности, например, в деталях подшипника вала ГРМ в сигнале начнут появляться отдельные короткие амплитудные пики, соответствующие моментам появления повреждений

(рис. 3.68, б). Далее, с развитием неисправности сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличиваются и их количество (на рис. 3.68, в).

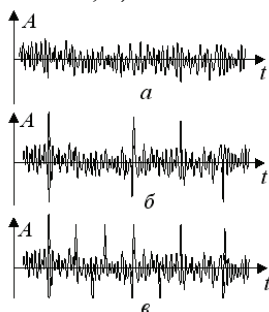


Рис. 3.68. Осциллограмма подшипника:
а – исправный подшипник; б – появление неисправности; в – развитие неисправности

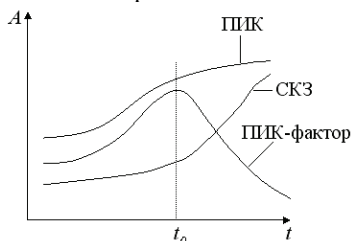


Рис. 3.69. Зависимость пик-фактора и СКЗ от времени

Пик-фактор сигнала возбуждения дает ценную информацию об условиях возбуждения.

Основное достоинство метода – простота. Для его реализации требуется обычный виброметр общего уровня, то есть самый простой и дешевый виброизмерительный прибор.

Основные недостатки – слабая помехозащищенность метода и необходимость проводить многократные измерения в процессе эксплуатации. Получить оценку состояния по одному измерению невозможно. При установке датчика на корпус подшипникового узла, сигнал вибрации характеризует не только подшипник, но и другие узлы механизма, что в данном случае можно рассматривать как вибрационные помехи, то есть достоверность диагностирования подшипника ниже.

Экспериментально было установлено, что момент прохода функции пик-фактора через максимум отвечает остаточному ресурсу подшипника порядка 2-3 недель.

Если изобразить результаты измерений на графике, увидим зависимости, представленные на рис. 3.69. По мере появления и развития неисправности возрастает функция ПИК, а СКЗ меняется очень мало, поскольку отдельные очень короткие амплитудные пики практически не изменяют энергетические характеристики сигнала.

Далее по мере увеличения амплитуд и количества пиков, начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации. Отношение ПИК/СКЗ из-за временного движения между ними имеет явно выраженный максимум на временной оси. На этом и основывается метод пик-фактора.

Пик-фактор синусоидальных колебаний равен $\sqrt{2}$.

Чем больше выражен импульсный или случайный характер механических колебаний, тем больше числовое значение присущего им пик-фактора. Пик-фактор следует учитывать при анализе составляющих сложных колебаний состояния двигателя и испытаниях конструкций, например, при импульсном возбуждении с помощью инструментального ударного молотка.

3.12.5.2. Метод определения акустической эмиссии

Метод акустической эмиссии, обладающий рядом преимуществ перед другими методами, основан на регистрации и анализе акустических сигналов ультразвукового диапазона, сопровождающих зарождение и развитие микро- и макродефектов контролируемого объекта при его работе.

Процессы взаимодействия контактирующих поверхностей при трении и периодические механические напряжения сопровождаются разнообразными электрическими явлениями, эмиссией электронов за счет появления дислокаций и изменения пространственного энергетического состояния электронов. Характер процессов эмиссии весьма сложен, спектр сигналов при этом широк в ультразвуковом диапазоне частот от 100 до 1000 кГц.

Волны напряжений возникают в материале вследствие его пластического деформирования, разрыва связей и роста трещин под действием накопленной упругой энергии. Источники и интенсивность акустической эмиссии очень многообразны: от роста трещин в хрупких материалах, звук которого может услышать человеческое ухо, до слияния микропустот в пластической малоуглеродистой стали, которое может быть практически беззвучным.

Процессы зарождения и развития трещин проявляются в виде непрерывно следующих коротких импульсов звуковых колебаний малой амплитуды в начальной стадии с последующим увеличением и появлением взрывных импульсов большой амплитуды в момент образования трещин. Вокруг дефектов увеличивается интенсивность напряжений, так что материал, например, вблизи трещин находится в более напряженном состоянии, чем вдали от них. Как правило, это приводит к более интенсивной акустической эмиссии вблизи вершины трещины. В процессе роста трещины наибольшее значение имеют два явления – развитие локальной зоны пластических деформаций вблизи вершины трещины и скачок фронта трещины. Анализируя данные акустической эмиссии, можно определить скорость отдельных скачков увеличения трещины и площадки поверхности, образующейся при этих скачках, а, следовательно, выявить различия между разными процессами разрушения [45].

Выделяемая энергия в виде волн напряжений или акустической эмиссии (АЭ) оценивается количеством импульсов в единицу времени, распределением амплитуд, частотным спектром и формой образующихся при погружении импульсов. Эти волны напряжения могут быть зафиксированы с помощью пьезопреобразователя (рис. 3.70, а).

Путем установки нескольких приемников эмиссии в различных элементах конструкции удастся определить координаты локальных источников эмиссии, например, места возникновения трещин, местных напряжений, элементов, потерявших упругость. Простая АЭ-система состоит из преобразователей, предварительных усилителей, схем кондиционирования сигналов и счетчиков, приборов фирмы «Брюль и Кьер» (рис. 3.70, б). Пьезопреобразователи настолько чувствительны, что позволяют обнаруживать смещение в материале порядка межатомных расстояний.

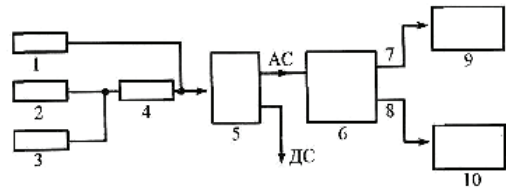
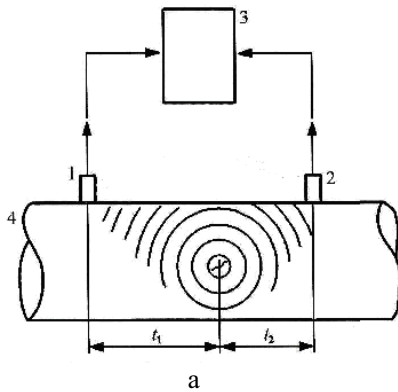


Рис. 3.70. Схема измерения (а) и приборного комплекса для регистрации АЭ-сигналов (б):

а: 1 – преобразователь АЭ (приемник 1); 2 – преобразователь АЭ (приемник 2); 3 – центральный блок сбора и обработки на базе промышленного компьютера; 4 – объект контроля; t_1 – время прихода сигнала на первый приемник; t_2 – время прихода сигнала на второй приемник; б: 1 – широкополосный приемник типа 8312 с предусилителем; 2 – резонансный приемник типа 8313 до 200 кГц; 3 – резонансный приемник типа 8314 на 800 кГц; 4 – предусилитель типа 2637; 5 – широкополосный кондиционирующий усилитель типа 2638; 6 – анализатор импульсов типа 4429; 7 – цифровой выход; 8 – выход на самописец или экран ЭВМ; 9 – счетчик ЭВМ и др.; 10 – графопостроитель типа 2306, 2307, 2309; АС – линия со связью по переменному току; ДС – линия со связью по постоянному току

Пример изменения интенсивности акустической эмиссии во времени показан на рис. 3.71 [45]. Резкое увеличение интенсивности соответствует разрушению испытываемого образца.

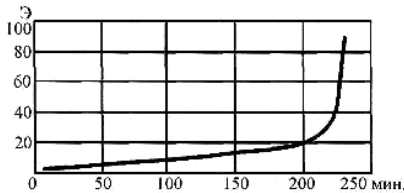


Рис. 3.71. Изменение интенсивности акустической эмиссии во времени:

Э – относительная интенсивность эмиссии

изменений идентифицировать дефекты материала, контролировать интенсивность их развития.

При этом оценивается степень опасности дефектов, прогнозируется остаточный ресурс работы материала и конструкции в целом.

Для диагностирования подшипниковых узлов методом акустической эмиссии используют такие устройства, как ИРП-12, АРП-11 и др. Индикатор ресурса подшипника ИРП-12 имеет небольшие размеры (178×82×35), пьезокерамический датчик, автономное питание, а время работы от одной зарядки четырех аккумуляторов достигает 25 ч. Анализатор ресурса под-

шипников АРП-11 является основным элементом бортовой системы диагностирования подшипниковых узлов, выполняя функцию сборщика-анализатора данных технического состояния контролируемого узла (буксового, редукторного и якорных подшипников).

Известно, что подшипниковый узел при его работе генерирует акустический сигнал в широкой полосе частот 20-300 кГц с различными составляющими, которые возрастают по мере разрушения подшипников, нарушения условий смазки, износа посадочных мест и из-за дефектов монтажа. На этот сигнал накладываются колебания, возбужденные всеми остальными кинематическими парами узла. Как показывает опыт, низкочастотные составляющие акустического сигнала довольно свободно распространяются в узле, а высокочастотные локализуются вблизи места их генерации. С точки зрения борьбы с помехами, которые накладываются на акустический сигнал подшипника, целесообразно проводить широкополосный анализ в диапазоне частот 20-300 кГц, то есть в ультразвуковой части спектра.

Это новое направление в диагностике основывается на классических методах акустико-эмиссионной и ультразвуковой дефектоскопии.

Метод акустической эмиссии получил широкое распространение в конце 1980-х гг. благодаря значительному прогрессу в электронной и вычислительной технике, а также в области исследований физики и теории упругости.

3.12.5.3. Методы вибрационного диагностирования с использованием опорных спектров-масок

Метод опорных спектров используется для выявления отдельных неисправностей или общего технического состояния объекта диагностирования автомобиля.

За исходный опорный спектр принимают частотные полосы, в которых проявляется контролируемая неисправность, например, составляющая с частотой зубозацепления (рис. 3.72, а) и ее второй гармоникой. Такой исходный спектр должен обладать разрешением по частоте лучше 7% или 4-6% [39, 43]. Этот спектр используется для создания **опорной маски**, в которой отдельным узким полосам придается максимальное значение амплитуды, присущее им самим либо двум смежным полосам. Программное обеспечение диагностирования позволяет непрерывно сканировать текущие спектры и сравнивать их с опорной маской.

На рис. 3.73 показано применение нижнего предела исходных значений диагностических параметров 2, названного спектром, и опорная маска 1, созданная путем расширения полос опорного спектра и ограничения по высоте допустимыми значениями эксплуатационной вибрации. Это значит, что при наложении опорной маски на текущий спектр вибрации (изменение амплитуд) составляющие спектра ниже этого предела не вызывают сигнала тревоги (наличие неисправности). Следовательно ложные тревоги от случайных шумов будут исключены. Новые (текущие) спектры вибрации будут сравниваться с описанной опорной маской. Увеличение уровня контроли-

руемых составляющих по сравнению со значениями опорного спектра-маски означает появление неисправности.

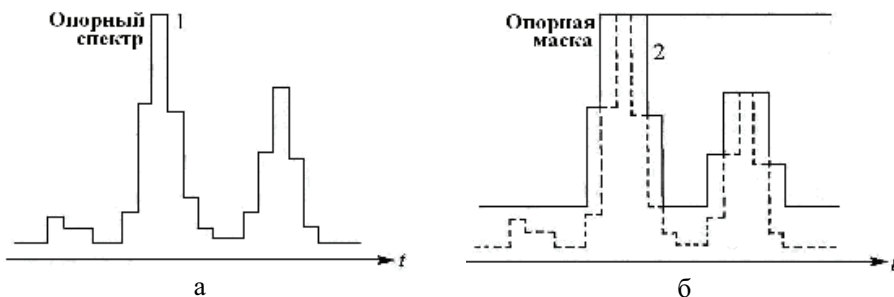


Рис. 3.72. Опорный спектр (а) и опорный спектр с наложенной маской (б):

1 – опорный исходный спектр дискретной составляющей; 2 – опорная маска

При сравнении новых (текущих) спектров с опорной маской любые уровни, превышающие опорный спектр могут рассматриваться как признак неисправности. Опорная маска может быть сформирована с учетом допустимого или предельного приращения вибрации в эксплуатации механизма (см. рис. 3.73). Тогда достижение амплитуд текущего спектра 2 верхних значений опорной маски 1 принимается как предельное развитие неисправности (см. пик 3 на рис. 3.73) или другого класса технического состояния на стадии проектирования и доводки изделия.

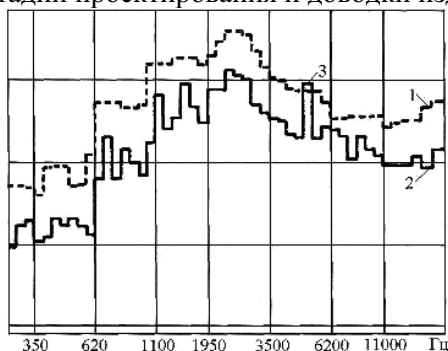


Рис. 3.73. Спектр текущих значений вибрации (2) и опорной маски (1) предельных значений приращения вибрации

для опорного спектра) составляющая вибрации находилась в пределах ширины опорной маски. Например, при увеличении скорости коробки передач на 15% увеличится частота зубозацепления и всей ее гармоник на 15%. Таким образом, можно сравнить новый опорный спектр с опорной маской, сдвинутой на 15% в частотной области. Все основные частоты, гармоники, боковые полосы и т. п. снова выровняются, и при сравнении спектров будет исключена ложная информация (предупреждение) о зарождающейся или предельной неисправности – предельного приращения вибрации

Характерной особенностью построения опорной маски 2 на рис. 3.72 является определение эффективной ширины контролируемой полосы в три раза больше, чем ширина исходных частотных полос, а нижняя ширина полос не должна превышать третьоктавной (23%). Исходный опорный спектр должен быть определен по частоте не больше, чем приблизительно 7%. Это необходимо для того, чтобы в случае незначительного изменения рабочей скорости контролируемого объекта (по сравнению с принятой

(см. рис. 3.73). На рис. 3.73 составляющая текущего спектра 3 превысила предельно допустимые приращения 1.

Однако не все составляющие спектра вибрации контролируемого объекта диагностирования тесно связаны с рабочей скоростью. Примером таких составляющих являются уровни вибрации на резонансных частотах. Вибрации на резонансных частотах незначительно изменяются от рабочего или назначенного скоростного режима диагностирования.

В представленных на рис. 3.47 спектрах (а, б, в) вибрации двигателя автомобиля ВАЗ-2108, записанных при частоте вращения 3000 мин^{-1} пики вибрации вызваны дисбалансом (50 Гц), перекосами и несоосностью коленчатого вала (100 Гц). Необходимую информацию о техническом состоянии других систем двигателя можно получить из анализа узкополосных спектров (рис. 3.47, б, в) в области частот 300-450 Гц и 2400 Гц.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры вибрации определяют, чтобы получить пик-фактор?
2. Какие преимущества метода определения акустической эмиссии?
3. Рассказать, как необходимо устанавливать датчики при поиске трещин.
4. Какие составляющие спектра вибрации объекта диагностирования принимают за исходный опорный спектр?
5. Какие принимаются значения ширины контролируемой полосы при построении опорного спектра?

3.12.6. Методы определения динамических вибрационных характеристик отдельных двигателей и в составе транспортных машин

3.12.6.1. Необходимость изучения и нормирования вибрационных характеристик

Несмотря на давнюю актуальность проблемы оптимального проектирования двигателей и повышения их надежности, решаются эти проблемы медленно. Обширная техническая литература в большой мере способствует развитию знаний классической теории надежности и теоретических знаний в области надежности систем. Однако они еще не позволяют инженеру непосредственно и конкретно решать задачи обеспечения заданного ресурса двигателей.

Методы определения надежности, ресурса и долговечности двигателей на стадии проектирования по закладываемым функциональным и прочностным характеристикам, точности изготовления и запасам на износ не позволяют в достаточной мере учитывать исходные и изменяющиеся с работой динамические характеристики и физические процессы трения в двигателе, протекающие при эксплуатации. Результаты существующих исследований повышения надежности и ресурса двигателей слабо увязаны с их вибрационными свойствами и вибронегруженностью деталей, чем по сути объясняются причины медленного разрешения проблемы повышения качества двигателей. Глубокое понимание вибрационной нагруженности меха-

нических систем и необходимости оптимизации рабочих процессов двигателя имеет большое значение для проектирования, создания и усовершенствования новых конструкций, а также для решения проблем, связанных с вибрацией и шумом существующих конструкций. Поэтому в настоящее время сложились четкие инженерные представления, что двигатели, не прошедшие виброакустическую доводку, считаются изделиями низкого технического уровня проектирования.

Необходимость определения вибрационных характеристик двигателей объясняется тем, что вибрация является в большинстве случаев основной причиной ненадежной работы механических и газогидроаэродинамических систем, снижения экологической надежности и ресурса элементов двигателей. Поэтому расчеты на вибрацию, виброиспытания и нормирование допустимой вибрации технических систем стали нормой в машиностроении.

Вибрация двигателей является природной реакцией на реально действующие внутренние и внешние возмущающие силы. Она является основным показателем технического уровня проектирования, технического состояния в эксплуатации и причиной ускоренного изнашивания деталей и снижения качества рабочих процессов двигателя. В вибрационном сигнале имеется вся объективная информация о структурных, функциональных и динамических свойствах двигателя в реальном времени.

При определении влияния динамических характеристик конструкций на вибрацию возникает необходимость, во-первых, исследовать и выявить основные присущие собственные частоты механических и потокодержающих систем с идентификацией их по уровню вибрации и формам колебаний; во-вторых, установить, какие из собственных форм проявляются от действия сил конкретного источника вибрации (механизма, устройства потокодержающих систем) и приводят к резонансным колебаниям.

Первой причиной появления высоких уровней вибрации двигателя является несовершенство конструкции и оптимизации рабочих процессов, технологические погрешности изготовления, сборки и регулирования, которые приводят к ударным процессам движения деталей. К конструктивным причинам появления высоких уровней вибрации относится резонанс – совпадение какой-либо из частот кинематического возбуждения с одной из собственных частот механизма как вибрационной системы. Задача конструктора – не допустить или свести к минимуму проявление такого совпадения и изменения жесткости конструкции в определенных режимах работы элементов двигателя и действия внешних сил. Конструктору также необходимо учитывать изменяющиеся собственные частоты деталей по мере ослабления натягов в посадках, появления зазоров и т. п. при эксплуатации двигателя. Виброиспытания позволяют выявить амплитудно-частотные характеристики конкретного механизма путем использования вибраторов для возбуждения тестовых воздействий или слежением за основными частотами возбуждения и их гармониками при изменении частоты вращения коленчатого и других валов механизмов. Для отличия резонансных форм от собственных форм колебаний достаточно иметь средства сбора и обработки информации о пространственном распределении амплитуд и фаз колебаний, снабженные

дополнительными анализирующими устройствами для выделения дискретных частот из общего спектра вибрации.

Другой сложной конструктивной, технологической и эксплуатационной причиной повышенной вибрации являются нелинейные колебательные эффекты из-за локального или постоянного проявления нелинейных упругих и демпфирующих свойств отдельных узлов механизмов типа зазор, изменение натяга, посадок деталей, пятна контакта, недостаточная или слишком высокая жесткость и т. д. Объяснение этих явлений возможно только в рамках нелинейных моделей формирования вибрационного поля. В условиях нелинейных взаимодействий разных деталей и узлов двигателя для нормального и дефектного состояний теоретическое спектральное описание его колебаний становится неадекватным и сложным для интерпретации. Распределение вынужденных колебаний в пространстве конструкции является либо результатом суперпозиции форм собственных колебаний всей системы в целом, либо результатом преимущественного влияния резонансных колебаний отдельных элементов узла или элементов конструкций. В таких случаях теоретически очень сложно, а зачастую невозможно методом сопоставления собственных форм с вынужденными установить степень влияния динамических характеристик конструкций на вибрацию. Это объясняется тем, что в широком диапазоне частот пространственные конструкции элементов двигателя имеют очень большое число частот собственных колебаний. Даже сама задача выявления всех собственных частот в широком диапазоне при точной ее экспериментальной реализации требует детального, чрезвычайно длительного исследования каждого из элементов конструкции. Доступными оказываются только отклики вибрации в измерительных точках на внешние и внутренние возбуждения и изучение свойств этих вибросигналов во временной области.

3.12.6.2. Необходимость изучения динамических характеристик

Прежде чем приступать к устранению проблем, связанных с повышенной вибрацией двигателя, системы «двигатель-трансмиссия» автомобиля необходимо сделать четкое различие между двумя путями, которые могут быть при этом избраны, то есть между анализом сигналов и анализом систем (см. рис. 3.74) [46].

Анализ сигналов представляет собой процесс определения откликов системы на неизвестное (в общем случае) возбуждение и представления их в такой форме, которую легко интерпретировать.

Изучение развития во времени ускорения вибрации в движении автомобиля (см. рис. 3.75) дает немного полезной информации. Путем преобразования в частотную область получается спектр ускорения вибрации. Такой спектр может указать на концентрацию энергии в области одной или нескольких частот, возбуждаемой вибрации определенным источником двигателя или деталей автомобиля. После выявления источника вибрации можно сконцентрировать внимание на системе. В дальнейшем необходимо определить, имеет ли источник вибрации достаточное количество свободной энер-

гии для того, чтобы возбудить вибрацию соответствующей конструкции или отдельного элемента узла; является ли система «динамически слабой» или податливой при данной частоте с чрезмерной реакцией на воздействие обычных сил рабочего режима двигателя.

Реакция	
<p>Анализ сигналов</p>  <p>Определение и описание действительных реакций на действие рабочих сил. Примеры: Уровень звука и механических колебаний. Форма деформаций. Интенсивность звука. Интенсивность колебаний. Температура. МКЭ – анализ реакции.</p>	<p>Анализ систем</p>  <p>Определение внутренних свойств и создание динамической модели. Примеры: Измерение подвижности. Анализ мод колебаний. Определение акустических параметров кузова, салона. Определение модуля упругости элементов. МКЭ – анализ мод колебаний.</p>

Рис. 3.74. Пути анализа конструкции:

МКЭ – метод конечных элементов; 1 – датчик вибрации (акселерометр); 2 – вибростенд

Анализ систем является методом определения характерных свойств систем. Он может быть проведен путем возбуждения системы с помощью измеряемых сил и определения отношения отклик/сила (чувствительность). Для линейных систем это отношение является независимым, присущим этим системам параметром. Этот параметр остается постоянным независимо от того, если система находится в возбужденном состоянии или в состоянии покоя. Автомобиль должен иметь одинаковую форму мод колеба-

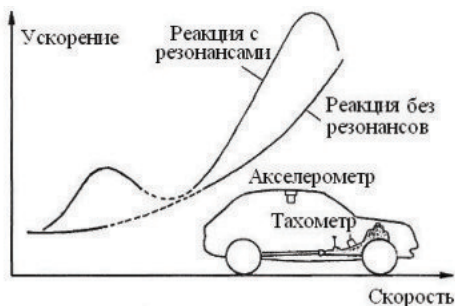


Рис. 3.75. Анализ систем. Измерение реакции системы (ускорение) в зависимости от скорости и разгона (движения по инерции)

В любой ситуации возбуждения и распространения вибрации на конструкцию имеются три фактора:

- источник – где создаются динамические силы;
- путь – как передается энергия;
- приемник – какие уровни вибрации и шума являются допустимыми

для узла, двигателя, машины, человека-оператора, окружающей среды.

Любой из этих факторов может являться причиной возникновения проблемы и может быть исследован для отыскания соответствующего оптимального определения механических сопротивлений и податливости конструкции силовым воздействиям.

Экспериментальное определение механических сопротивлений и податливостей колебательной системы под действием сил, аналогичных силам, возбуждающих систему при работе механизмов и устройств. При работе механизмов и устройств конструкции возбуждаются под действием сил: гармонических или шумового характера; линейных или моментов; единичных или групповых; сконцентрированных в одной точке, нескольких точках или распределенных в пространстве конструкции.

При таком подходе выявляется количественная реакция колебательной системы на конкретное силовое воздействие с учетом всех особенностей взаимодействия отдельных элементов. Выявляются те формы собственных колебаний, которые проявляются при возбуждении конкретными силами. Для реализации такого рода исследований необходимо установление параметров механических сопротивлений, с помощью которых количественно можно оценивать влияние динамических свойств колебательной системы на уровни вибрации. В процессе исследования требуется аппаратура, позволяющая осуществлять различное заданное силовое воздействие на конструкцию по частотам и характеру сигнала (гармонический, стационарный случайный, шумовой), а также фиксировать пространственное распределение амплитуд и фаз возбуждаемых колебаний и количественно оценивать реакцию системы по параметрам механического сопротивления.

3.12.6.3. Объем диагностических испытаний

Проблемы вибрации машинных агрегатов часто вызваны не отдельными дефектами и неисправностями, а возможностью механической системы иметь резонансную частоту, совпадающую с вынужденной частотой некоторых узлов, изменяющую жесткость конструкции в определенных режимах работы и действия внешних условий.

Динамическая надежность агрегатов в системе отдельного двигателя и в системе машины определяется низким уровнем вынужденных колебаний агрегатов двигателя, системы «двигатель-трансмиссия», корпусов двигателя, кузова, рамы, отсутствием самовозбуждающихся колебаний валов и корпусов.

Основными динамическими характеристиками конструкции транспортной машины являются собственная частота колебаний агрегатов в комплектной сборке, конфигурация мод, характеристики затухания мод. На сегодня существует разный подход к определению этих параметров. Математическая модель расчета динамических свойств машинных агрегатов представляет собой обычно расчетные значения собственных частот и направленных векторов; коэффициент демпфирования выбирается эмпирически. При экспериментальных исследованиях определяется величина демпфирования как фактор потерь линейной системы. Резонансные вибрации возникают в

трубопроводах (неопорные связи) и опорных конструкциях двигателей, поэтому экспериментальный контроль динамической надежности двигателей и комплектных машин должен осуществляться путем проведения комплексных вибрационных испытаний узлов на стадии монтажа, пусконаладочных работ и опытно-промышленной эксплуатации по специальным программам испытаний, согласно требованиям соответствующих стандартов и технических условий [47, 48, 49, 50, 53, 62, 63].

На первом этапе испытаний следует определять динамическую податливость опор валов, необходимую для оценки качества опор. Значения модулей комплексных коэффициентов динамической податливости не должны превышать величин, установленных опытным путем данных. В случае необходимости разрабатывать мероприятия по повышению динамической жесткости опор, обеспечению требований на уравнивание вращающихся частей, выполнению уточненных расчетов вынужденных колебаний системы «вал-смазочный слой-опора».

На втором этапе следует определять вибрационные характеристики системы «двигатель-рама-кузов», а также статистические составляющие положения центров коленчатого вала во вкладышах, перекосы и взаимное положение подшипников. К большим конструкциям можно подсоединить вибратор, непрерывно возбуждающий набор входных частот. Вибраторы могут быть механические (кинематические или инерционные), электромеханические, электродинамические и гидравлические. Возбуждение вынужденных колебаний (корпусов двигателя, его агрегатов) должно осуществляться при ступенчатом (с шагом не более 1 Гц) изменении частоты вынуждающей силы в заданном диапазоне. Величина вынуждающей силы вибровозбудителя должна составлять 15% от статической нагрузки на испытываемую опору, корпус и т. п.

3.12.6.4. Методы тестовой диагностики динамических характеристик объектов транспортных машин

В зависимости от конструкции объекта диагностирования в основе процедуры вибрационного контроля (диагностирования) может быть функциональная либо тестовая диагностика. Для описания диагностического поведения механической конструкции достаточно определить три модальных параметра для каждой моды механических колебаний: модальную частоту, модальное затухание и форму моды.

Методы тестового диагностирования базируются на воздействии на объект контроля с помощью некоторого стандартного вибрационного воздействия, называемого тестовым. Параметры тестового воздействия специально подбираются так, чтобы, с одной стороны, повысить информативность и чувствительность диагностических признаков, а с другой стороны, не вызвать в диагностируемой системе необратимых изменений ее технического состояния. К тестовой диагностике прибегают в тех случаях, когда объект вовсе не излучает вибрацию, или в процессе функционирования, если регистрация и анализ вибрационных характеристик в эксплуатационном

режиме затруднены. Типовые объекты тестовой вибродиагностики: автомобильные конструкции, корпусные детали, трансмиссия, силовые агрегаты (двигатель, коробка передач), рама кузова, динамические и механические системы, многослойные соединения и др.

Основной целью тестовых вибрационных испытаний является распознавание технического состояния объекта в условиях, когда получение информации о динамических характеристиках объекта, подвижности, надежности и ресурсе крайне затруднительно.

Вибрационные методы диагностирования позволяют определить расчетными методами динамические характеристики проектируемого объекта и оценить техническое состояние по времени организованного тестового вибрационного воздействия, например, нагружения заданной амплитудной частотой вибрации или механическим гармоническим воздействием заданной амплитуды, имитируя возбуждающие силы двигателя.

Вибрационным испытаниям могут подвергаться двигатели, отдельные элементы, узлы, агрегаты и комплектные машины в статике, динамике (функционалировании). В процессе определения технического состояния объекта реализуется некоторый алгоритм испытаний и диагностирования, например, имитация влияния дорожных условий на надежность и ресурс двигателя или комплектной машины. Результатами элементарного текущего контроля являются конкретные значения изменения амплитуд вибрации (создаваемой двигателем), появление резонансов, определение характеристик затухания сигналов вибрации и др., параметров вибрации в контрольных точках и особенно в местах крепления, например, на раму, к кузову. Анализ выполняется обычно по совокупности результатов элементарных этапов контроля.

Задачами тестовой виброидентификации дефектов конструкции является решение задач построения математической модели объекта по данным динамического поведения при известном внешнем вибрационном воздействии. Математические модели конструкции могут быть получены аналитическим или экспериментальным путем.

Из аналитических методов чаще всего употребляют два метода: метод сосредоточенных параметров, основанный на применении идеализированных масс, пружин и демпфирующих элементов; и метод конечных элементов, при применении которого конструкция рассматривается как комбинация эластичных элементов с определенными массами и жесткостями. Эти аналитические методы используются на стадии проектирования при наличии специальных программ для ЭВМ.

Экспериментальные методы определения динамических характеристик конструкции проводятся на прототипах и натурных механических конструкциях. Параметрами оценки динамического поведения конструкции являются частотные вибрационные характеристики отклика на тестовые вибрационные воздействия. Резонансы в рабочем частотном диапазоне силового привода и трансмиссии могут считаться индикаторами слабых мест конструкции. Опасность резонанса зависит от амплитуды частотной характеристики между точкой на конструкции, где приложены рабочие силы, и точкой, где определяется реакция.

При проведении измерений исследуемая конструкция (в зависимости от целей исследования) подвешивается, устанавливается на виброизоляторы (рис. 3.60), на стенд с беговыми барабанами или на вибростенд с одноточечным или многоточечным возбуждением (рис. 3.76, 3.77, 3.78) [14, 15].

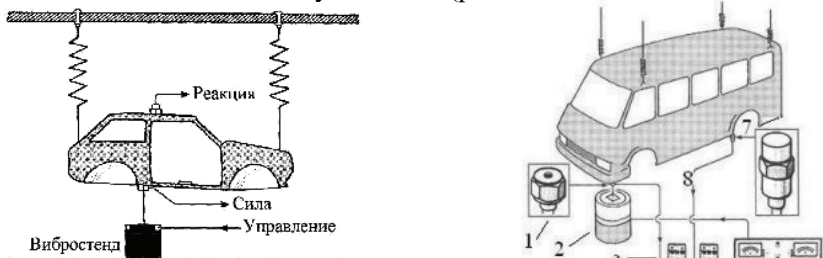


Рис. 3.76. Вибрационные испытания кузова:

1 – датчик силы; 2 – вибростенд; 3 – усилители за-
ряда; 4 – анализатор; 5 – ЭВМ; 6 – усилители
мощности; 7 – крепежный магнит; 8 – акселерометр

По результатам измерения частотных характеристик определяются скорости затухания колебаний, пики и фазы частотных характеристик, собственные частоты вибрации и свободного затухания, которые дают качественную информацию о динамических свойствах соответствующей механической системы. Конструкции с малым демпфированием имеют острые резонансы (моды), а пики – слишком узкие.

Вибрационные испытания рамы могут быть выполнены для различных режимов работы вибростендов, имитирующих заданные эксплуатационные условия. Измерение вибрационных характеристик производится в заданных точках [14, 15], часто в местах крепления двигателя.

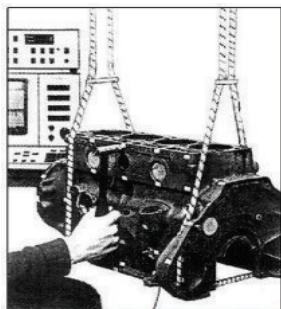


Рис. 3.77. Возбуждение корпуса двигателя ударным молотком 8202

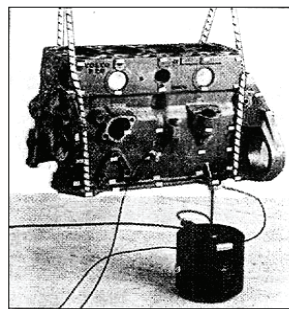


Рис. 3.78. Возбуждение корпуса двигателя вибростендом 4809 (динамическая сила 45 Н)

Возбуждение конструкции малых или средних корпусов двигателя можно осуществить ударным инструментальным молотком (рис. 3.60, 3.77), пьезоэлектрическими и другими вибраторами (рис. 3.78). Возбуждение может быть гармоническим, случайным или кратковременным (импульсным). Кратковременный удар обладает тем большим спектром частот, чем меньше

его продолжительность. Вибрация широкого спектра частот, распространяясь по конструкции механизма, вызывает интенсивные колебания тех элементов, собственные частоты которых совпадают с отдельными участками возбуждающего спектра. Методы экспериментального определения собственных и резонансных форм колебаний конструкции, механических сопротивлений и податливости при различном характере силового воздействия (линейного усилия, действия моментов в полосе частот) описаны в работе [39].

3.12.6.5. Требования к стендам и аппаратным средствам вибрационных диагностических испытаний двигателей

Виброакустические испытания должны проходить все узлы и агрегаты как отдельных двигателей, так и в составе комплектной машины с последующим формированием исходных параметров вибрации и шума в технической проектной и эксплуатационной документации.

Для проведения вибродиагностических испытаний двигателей используются специальные стенды. Во многих случаях для вибрационных испытаний объектов диагностирования можно использовать типовые стенды ресурсных испытаний или стенды с беговыми барабанами для испытаний комплектных машин. Для этого требуется их аттестация на пригодность к виброакустическим измерениям вибрации, то есть обеспечение виброконтролепригодности. Основным параметром пригодности стендов к измерениям вибрации является уровень помех в контрольных точках испытуемого объекта.

Стенды и их рабочие места должны удовлетворять следующим требованиям:

- установка исследуемого объекта на рабочее место должна обеспечивать виброизоляцию от фундамента и ограничивать массу присоединительных деталей;

- уровни помех во всех точках измерения вибрации во всем диапазоне исследуемых частот должен быть не менее, чем на 8-10 дБ ниже значений собственных вибраций работающего объекта исследований;

- масса фундамента стенда или рабочего места установки испытуемого объекта должна превышать его массу не менее, чем в 8-10 раз;

- дополнительные массы (совокупность всех приспособлений, связанных с установкой испытуемого объекта на рабочее место не должна превышать 0,1 массы испытуемого объекта.

Виброшумовые характеристики отдельных агрегатов и комплектных машин должны выполняться в заглушенных акустических камерах в соответствии с требованиями технического задания, технических условий и технической документации на исследуемый объект.

Определение динамических характеристик макетных и опытных образцов машин позволяет исключить те вынужденные и собственные колебания элементов машин, которые могут вызвать резонансные вибрации при воздействии на конструкцию заданных внутренних и внешних сил. При доводке машин необходимо учитывать фактические структурные и функцио-

нальные состояния объектов диагностирования (испытаний), повышение при эксплуатации возмущающих сил, возбуждаемых неисправностями и ухудшающими рабочие процессы, возросшими зазорами, ослаблением посадок и механических связей. Поскольку функциональные характеристики (скоростные, нагрузочные, быстродействия, надежности, ресурса и прочности) во многом зависят от упругих демпфирующих свойств (изоэластичности) элементов переменной жесткости, то учет колебаний в сопряжениях элементов машин и нестабильности рабочих процессов имеет первостепенное значение.

Основными динамическими характеристиками конструкции составных частей автомобиля должны быть собственные частоты, резонансные вибрации и характеристики затухания вибрации. В комплект аппаратуры для определения собственных частот и измерения динамических характеристик конструкций ударным возбуждением входят измерительный молоток, с помощью которого возбуждается конструкция и формируется пропорциональный возбуждающей силе сигнал, а также двухканальный анализатор, например, типа 2034 фирмы «Брюль и Кьер» раннего выпуска или многоканальные R&S FSVR13, Tektronix-2630, 3061 (рис. 3.79), позволяющие в реальном времени определить собственную частоту, механическое сопротивление или податливость элементов конструкции, а также формы их собственных колебаний [39, 42, 61].

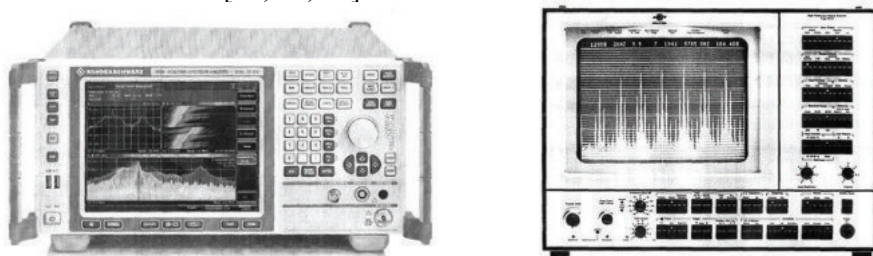


Рис. 3.79. Внешний вид вибрoанализатора R&S FSVR13 и модели 2033

При экспериментальном определении динамических характеристик конструкции машинных агрегатов исследуются все детали и звенья, представляющие собой физические тела с присущей им способностью деформироваться под действием внешних сил. Деформации вызывают перемещения, которые имеют колебательный характер. Для решения практических задач во всех случаях достаточно получить информацию о первых, наиболее существенных формах и частотах собственных колебаний конструкции.

Выявить вклад отдельных сил в создание вибрации объекта диагностирования в широкой полосе можно по информации об амплитуде, частотной и фазовой модуляции. Модуляция вибрационных процессов происходит из-за нелинейности свойств системы и измерений параметров контактов между элементами кинематических пар и другими передаточными звеньями на пути распространения вибрации от мест ее возникновения до излучающей поверхности механизма, двигателя или комплектной машины. Анализ

спектров огибающей вибрации в области отдельных источников позволяет выделить частоту, присущую отдельным источникам.

Определить резонансные вибрации механической системы любой машины можно при испытаниях методом «разгона-движения по инерции». Разгон автомобиля и движение по инерции при различных скоростях позволяет получить реакцию системы автомобиля на скорость. Измерения вибрации можно получить, используя виброметр и самописец или анализатор на базе ноутбука, с последующей обработкой результатов на виброанализаторах типа R&S FSVR13, Textronix-2630, 2034, 2033 (рис. 3.79) в лабораторных условиях. Если на графике рис. 3.47, 3.48, 3.74, 3.75 в зависимости реакции от скорости имеются пики, есть основания предположить, что система имеет резонанс. Построение графиков зависимости ускорения от скорости дает качественную индикацию значительных резонансов. Однако, поскольку при таких испытаниях не измеряется сила, такие измерения могут дать грубую качественную оценку динамических свойств исследуемой системы машин.

Комплексные исследования вибрационных характеристик автомобилей проводятся на специальных вибрационных стендах. На таких стендах можно получить вибрационные характеристики автомобилей для заданных режимов работы, а также производить их ресурсные испытания в заданных режимах вибрационного возбуждения, имитирующих эксплуатационные условия. Но вибрационные стенды для испытания полнокомплектных машин слишком дорогие. Поэтому на практике в большинстве случаев применяют отдельные вибростенды и вибростолы [61] для тестовых возмущений конструкций в отдельных или многих точках, в зависимости от габаритов конструкции и задач вибрационного анализа.

Комплексные виброакустические испытания колесных транспортных машин или их отдельных агрегатов в рабочих режимах можно осуществить в виброакустических камерах (см. рис. 3.80), используя типовые стенды с беговыми малозумными барабанами для испытаний отдельных агрегатов или комплектных автомобилей.

При виброакустических испытаниях автомобиля на стендах с беговыми барабанами определяют спектры вибрации агрегатов автомобиля в различных режимах работы в заданных контрольных точках (см. рис. 3.81). По результатам измерения вибрации определяют динамические характеристики двигателя, силовой передачи, ведущего моста, рамы автомобиля, акустические характеристики кузова и кабины (рис. 3.76, 3.80, 3.81).

На неподвижном автомобиле с применением вибростендов и без них определяют собственные вибрации различных агрегатов, оценивают эффективность подвески силового агрегата при работающем двигателе, динамические характеристики виброизоляторов. Вибрационные испытания отдельных агрегатов машин можно проводить на типовых стендах ресурсных испытаний. Стенды ресурсных испытаний должны удовлетворять требованиям виброконтролепригодности. Для испытуемых агрегатов, не приспособленных к установке испытуемого объекта на рабочее место стенда на виброизоляторы, определяют конструкции технологических лап.

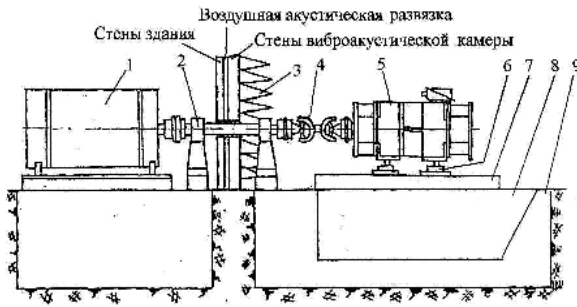


Рис. 3.80. Схема стенда виброакустической камеры испытаний отдельных агрегатов и комплектных машин в режиме нагрузки и холостого хода

1 – нагрузочная балансирующая электрическая машина; 2 – опоры вала привода испытуемого объекта; 3 – звукоизоляция всех стен, потолка и пола помещения заглушенной камеры; 4 – карданный вал привода; 5 – испытуемый объект, например, электрическая машина автомобиля БелАЗ; 6 – виброизолятор; 7 – монтажная плита или съемные устройства малошумного стенда с беговыми барабанами; 8 – смотровая канава; 9 – фундамент виброакустической развязки.

На рис. 3.80 приняты следующие обозначения: 1 – нагрузочная балансирующая электрическая машина; 2 – опоры вала привода испытуемого объекта; 3 – звукоизоляция всех стен, потолка и пола помещения заглушенной камеры; 4 – карданный вал привода; 5 – испытуемый объект, например, электрическая машина автомобиля БелАЗ; 6 – виброизолятор; 7 – монтажная плита или съемные устройства малошумного стенда с беговыми барабанами; 8 – смотровая канава; 9 – фундамент виброакустической развязки.

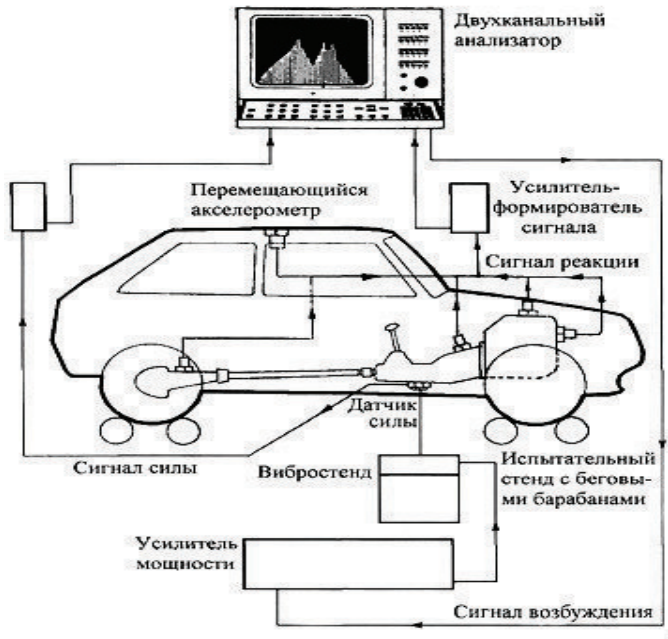


Рис. 3.81. Оборудование и аппаратные средства комплексного исследования вибрационных характеристик двигателя и трансмиссии автомобиля

3.12.6.6. Методы определения и устранения резонансной вибрации

Резонанс – резкое возрастание амплитуды вибрации механической системы, которое возникает в ней при совпадении собственных частот с частотой возмущающей силы.

Резонансная вибрация – вынужденная вибрация системы, соответствующая одному из максимумов амплитудно-частотной характеристики.

Свободная вибрация – вибрация системы, обусловленная начальным запасом механической энергии и происходящая без воздействия возмущающей силы или поступления энергии извне.

Силовое возбуждение вибрации – вынужденные вибрации системы вынуждающими силами и (или) моментами.

Определение динамических характеристик отдельных агрегатов, узлов и машины в сборе необходимо на стадиях проектирования (доводки), модернизации машин и агрегатов, изменения конструкции деталей и способов крепления при эксплуатации. Это вызвано тем, что динамические характеристики машин определяют в большинстве случаев надежность и ресурс машин.

Во многих случаях отдельные узлы и агрегаты имеют хорошие технические и вибрационные характеристики, надежность и ресурс, а в сборе машины имеют резонансные явления, которые требуют существенной доводки машины или агрегата. Причиной такого состояния машин являются неудачное распределение собственных частот, изгибных колебаний по длине собранных агрегатов, подвижности в сопряжениях деталей и местах монтажа агрегатов.

Для изучения динамических характеристик объектов необходимо создать условия для свободной подвески. Одним из методов является подвешивание исследуемого объекта на упругих канатах (рис. 3.76, 3.77, 3.78) или установка на виброизоляторах (рис. 3.60, 3.80).

Для перекрытия области низких частот и линеаризации каких-либо нелинейных свойств можно использовать метод возбуждения случайной силой. Сигнал возбуждения отбирается усилением мощности и подается на электродинамический стенд (рис. 3.60, 3.76, 3.81).

Аналоговая аппаратура динамических исследований конструкций транспортных средств представлена на схемах рис. 3.60, 3.82 [39].

Порядок проведения испытаний объектов может быть разделен на четыре этапа:

- подготовка модальных испытаний;
- проведение испытаний;
- оценка параметров подбора кривых;
- выпуск документации по испытаниям и их результатам.

Испытательным оборудованием является система для анализа мод колебаний с соответствующим программным обеспечением для ЭВМ.

Общая схема универсального аппаратно-программного комплекса представлена на рис. 3.83 [50]. Функциональные и эксплуатационные характеристики комплекса определяются, главным образом, его математическим

обеспечением. Применение подобных систем позволяет легко адаптировать возможности комплекса с учетом конкретных задач возбуждения объекта испытаний, эффективно решать традиционные задачи формирования, измерения и контроля узко- и широкополосных случайных электрических сигналов с заданными спектральными и статистическими характеристиками.

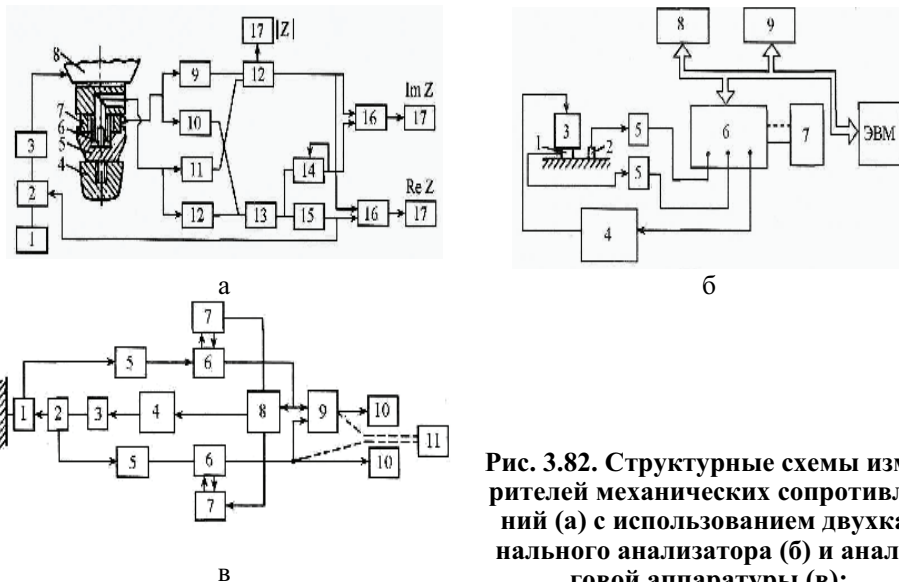


Рис. 3.82. Структурные схемы измерителей механических сопротивлений (а) с использованием двухканального анализатора (б) и аналоговой аппаратуры (в):

а: 1 – генератор; 2, 14 – блоки компрессии; 3 – усилитель мощности; 4 – исследуемые конструкции; 5 – переходник; 6 – датчик ускорения; 7 – датчик силы; 8 – вибратор; 9 – предварительные усилители; 10, 11 – корректирующие усилители; 12, 13 – измерительные усилители силы и ускорения; 15 – измерительный интегрирующий усилитель;

б: 1 – преобразователь силы; 2 – преобразователь ускорения; 3 – вибратор; 4 – усилитель мощности; 5 – предварительные усилители типов 2626, 2635; 6 – двухканальный анализатор типа 2023/34; 7 – двухканальный самописец 2309; 8 – цифровой магнитофон; 9 – цифровой регистратор;

в: 1 – датчик силы типа 8200; 2 – датчик ускорения типа 4370; 3 – вибростенд типа 4802 с вибростолом типа 4818; 4 – усилитель мощности типа 2708; 5 – предварительный усилитель типа 2626 или 2635; 6 – измерительный усилитель типа 2607; 7 – следящие фильтры типа 2020; 8 – управляющий генератор типа 1027; 9 – фазометр типа 2971 или устройство для измерения взаимной корреляции типа 5748; 10 – самописец типа 2307; 11 – самописец типа 2309

Для повышения качества имитации эксплуатационной вибрации необходимо формировать тестовые поля с заданными пространственно-временными (пространственно-частотными) характеристиками. Возбуждение случайных виброполей с заданными характеристиками также необходимо осуществлять с использованием конечного числа источников вибрационных воздействий.

На практике задачи имитации виброполей сводят к задачам формирования случайной вибрации с требуемыми спектральными характеристиками в заданных контрольных точках в наиболее ответственных местах конст-

рукции. Для сокращения объема испытаний количество возбудителей стремятся свести к минимуму, особенно на первой стадии испытаний. На основе виброиспытаний дают рекомендации по доработке изделия с целью улучшения его свойств, локализации возможных дефектов, возможных резонансов, повышения вибрационной надежности др.

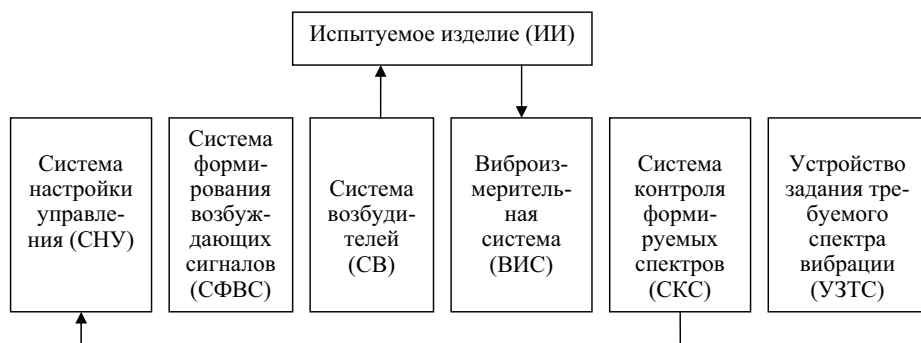


Рис. 3.83. Структурная схема виброиспытательного стенда

Общая схема вибрационного диагностирования объекта испытаний представлена на рис. 3.84 [50]. Диагностирование состоит в следующем. Сигналы ВИС поступают на входы СФИП, которая формирует информационные признаки с фактической информационной ценностью. СКИП обрабатывает эти сигналы и на основе сравнения их с сигналами, соответствующими информационным признакам с требуемой диагностической ценностью УЗИП, вырабатывает управляющий сигнал для УЗТС. УЗТС изменяет параметры требуемого спектра, по которым СФВС и СВ осуществляет в соответствии с управляющими сигналами СНУ изменение спектра возбуждений вибрации стендами (см. рис. 3.84). Это позволяет получить на выходе СФИП информационные признаки, обладающие диагностической ценностью, близкой к требуемой. Обычно диагностический контур (СФИП, СКИП, УЗИП) возникает лишь на этапе планирования исследований, когда возникает задача выбора параметров вибрационных воздействий с целью определения частотных характеристик, обеспечения высокой диагностической ценности исследований.

На рис. 3.81 показана схема измерительной установки, позволяющая определять вибрационные характеристики, возбуждаемые под действием внутренних сил механизмами автомобиля и под действием заданных внешних сил, возбуждаемых вибростендом. Аппаратные средства комплексных вибрационных испытаний объектов диагностирования: 8202 – инструментальный молоток; 2319 – графопостроитель двухкоординатный; 2706 – усилитель мощности; 8200, 8201 – датчики силы, виброанализаторы 2032, 2034 или восьмиканальный R&S FSVR13, а также Tektronix-2630 и др. [61].

Виброакустические диагностические исследования двигателя в составе транспортной машины являются обязательными, поскольку отдельный двигатель может удовлетворять заданным виброакустическим требованиям,

а в составе машины (при присоединении дополнительных масс с возмущающими источниками) часто не удовлетворяет этим требованиям. На практике замена двигателя автомобиля на казалось бы лучший по техническим характеристикам нередко вызывает повышенные вибрации.

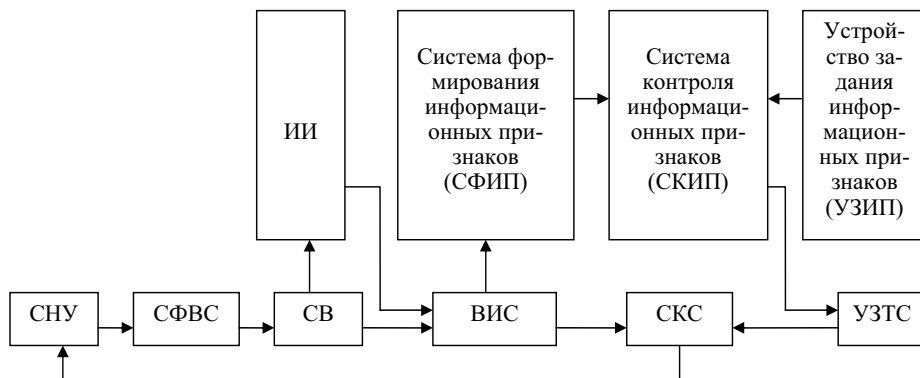


Рис. 3.84. Структурная схема вибродиагностического комплекса

Контрольные вопросы

1. Какая необходимость нормирования вибрационных характеристик элементов двигателя?
2. Какие конструктивные причины появления высоких уровней вибрации?
3. Какие эксплуатационные причины появления повышенной вибрации?
4. Какие динамические характеристики можно изучать вибрационными методами?
5. На чем базируются методы тестовой диагностики динамических характеристик объектов диагностирования двигателя?
6. Зачем при исследовании динамических характеристик объект диагностирования подвешивают?
7. Рассказать о методах возбуждения исследуемых конструкций.
8. Каким требованиям должны удовлетворять стенды для вибродиагностических испытаний?
9. Какие существуют методы распознавания резонансной вибрации механических систем?
10. Какие виброакустические характеристики можно определять в виброакустических камерах?
11. Какой порядок проведения динамических испытаний?

3.12.7. Методы собственных частот вибрации, форм деформации резонансов и податливости конструкции

3.12.7.1. Определение собственных частот вибрации и форм деформаций

При определении динамических характеристик объекта диагностирования первоначально находят значение собственных частот, а затем форму колебаний на каждой частоте. Форма колебаний линейной системы, колеб-

лющейся с одной из собственных частот, называется собственной формой колебаний или модой колебаний. Анализ моды колебаний обеспечивает получение определенного описания конструкции жестких машин, рам, валов и т. д. Такой анализ позволяет разработать мощный инструмент, модальную модель, с помощью которой определяют влияние конструктивных модификаций или предсказывают поведение конструкции при изменении способов крепления узлов, режимов и условий работы одного или нескольких механизмов двигателя и агрегатов комплектной машины.

Экспериментально можно определить три параметра: собственную частоту колебаний, конфигурацию моды, а также характеристику затухания (конструкция с малым или большим затуханием). Метод модального анализа позволяет учитывать возбуждение всех мод колебаний одновременно, а метод многооточечного возбуждения позволяет разделить моды колебаний.

Информация о собственных частотах и формах колебаний необходима не только при изучении свободных колебаний отдельных узлов двигателя, машин и их агрегатов, но и для анализа вибрационного поля двигателя и машины в целом. Наглядное представление формы колебаний позволяет:

- установить соотношение между амплитудами вибрации в характерных точках конструкции; эта информация является весьма ценной для минимизации избыточных вибраций путем определения точек и зон конструкции, где будет наиболее эффективным применение дополнительных антивибрационных средств;

- сравнивать влияние различных воздействий и режимов работы на вибрационную чувствительность конкретной части конструкции двигателя, машины, агрегата;

- получить информацию о смещении частей конструкции относительно ее основы, чтобы обеспечить целесообразное размещение двигателя машины, механизма в составе агрегата.

Для фиксации форм колебаний элементов конструкций на, каждом элементе устанавливают несколько вибропреобразователей (рис. 3.85). На корпусах двигателя следует устанавливать в нескольких сечениях опор вала в двух взаимно перпендикулярных направлениях. На подшипниковых узлах, корпусах целесообразно фиксировать поперечные колебания в центре и на расстоянии от центра, равном радиусу изгибающей волны и промежуточным значениям радиуса. Количество вибропреобразователей, устанавливаемых по радиусу и по промежуточной окружности, зависит от исследуемого

диапазона частот. Расстояние между вибропреобразователями должно быть меньше или равно четверти длины изгибающей волны в узле. На корпусных конструкциях, представляющих собой цилиндрические оболочки, колебания измеряют в радиальном



Рис. 3.85. Схема измерения деформаций

направлении по образующей и в нескольких сечениях. На опорных конструкциях двигателя и его агрегатов, на рамах автомобиля вибропреобразователи колебаний размещают на основных несущих балках в нескольких их сечениях перпендикулярно оси в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Фазы колебаний в различных точках следует измерять либо относительно опорного сигнала генератора, либо относительно какой-нибудь из точек измерения (рис. 3.85). Изображать форму колебания удобно, фиксируя значения амплитуд колебаний для четырех моментов времени, соответствующих 0, 90, 180 и 270° угла сдвига фаз опорного сигнала [61].

При выявлении резонирующих элементов конструкции возбуждение необходимо осуществлять системой сил, примерно соответствующей системе сил, действующей при работе механизма или установки. Практически это значит, что при исследовании резонирующих элементов отдельных механизмов необходимо воспроизводить силы, действующие в районе рабочих узлов. Чтобы выявить резонирующие элементы несущих рамных конструкций или установок, состоящих из механизмов, трубопроводов и т. п., необходимо воспроизвести силы в районе расположения отдельных механизмов источников вибрации. Однако на отдельные конструкции двигателя (вал собранного двигателя, рабочее колесо насоса или район камеры сгорания) очень трудно воздействовать силой. Поэтому передаточные характеристики конструкций механизма целесообразно исследовать с помощью метода взаимности: возбуждение осуществлять в районе точек, где вибрация при работе механизма (на одной поверхности, корпусе, подшипниковых узлах и т. д.) контролируется, а отклик измерять в месте и в направлении приложения возмущающих сил работающего механизма.

При воздействии ударных импульсов на систему с n степенями свободы откликаются все собственные частоты системы. Однако, такое явление наблюдается только в диапазоне частот до 1-2 кГц. Чем выше собственная частота узла механизма, тем избирательнее она к месту приложения ударного воздействия. Для диапазона частот от 1-2 кГц до 10-20 кГц, в котором временное и пространственное затухание акустических волн в конструкции механизма достаточно велико, характерно, что на такого рода кратковременные воздействия откликаются собственные частоты именно близлежащих к источнику возбуждения узлов. Наибольшая амплитуда отклика наблюдается на одной из собственных частот дефектного узла. Уровень помех от соседних узлов тем меньше, чем выше собственная частота.

Анализ импульсных сигналов имеет ряд особенностей. Реализация импульсного сигнала существует только в интервале $0 \leq t \leq T$, где T – длительность импульса, которая обычно значительно меньше длительности выборки анализатора. Поэтому в современных цифровых частотных анализаторах предусмотрено использование во временной области взвешивающих функций (прямоугольные, экспоненциальные и др.), которые можно перемещать по оси времени и изменять по длительности. Это позволяет выделить полезную информацию и тем самым значительно улучшить соотношение сигнал/шум и, следовательно, повысить достоверность измерений.

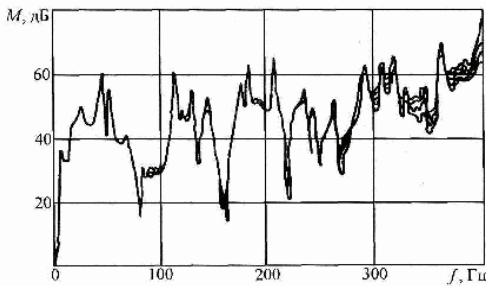


Рис. 3.86. Механические податливости конструкции, полученные по разным реализациям возмущающей силы при ударном возбуждении

нии ударного возбуждения к динамическому диапазону анализирующей аппаратуры предъявляются повышенные требования. Кроме того, при ударном возбуждении невозможно от удара к удару добиться полной идентичности векторов сил по месту приложения и направлению. Это приводит к некоторому различию динамических характеристик конструкций, полученных по разным реализациям возбуждающей силы (рис. 3.86). Такое различие связано с перераспределением энергии колебаний по собственным формам конструкции при некотором изменении действующей силы по месту и направлению. Проявляется оно в основном на антирезонансных частотах и в области высокой плотности собственных частот, то есть там, где возбуждение колебания конструкции определяется несколькими близкими друг к другу формами [39].

Для того, чтобы неидентичность векторов возбуждающей силы не влияла на повторяемость результатов измерений, возбуждают конструкцию серией ударов с накоплением информации методом линейного усреднения по реализации в соответствии с заданными алгоритмами. Интервал между ударами в серии должен быть не меньше длительности выборки анализатора для выбранного частотного диапазона.

3.12.7.2. Измерение формы деформации

Целью измерений деформации (формы прогиба, изгиба и т. п.) во время работы является определение вынужденной динамической деформации при рабочей частоте (см. рис. 3.81, 3.85, 3.87, 3.88, 3.89).

Амплитудно-частотные характеристики машин определяются на частоте вращения $f = \frac{n}{60}$, на частоте $f = 1,5 \frac{n}{60}$, возбуждаемые полуторной со-

ставляющей опрокидывающего момента, на $\frac{2n}{60}$, возбуждаемые неуравновешенным моментом сил инерции второго порядка на опорных поверхностях (лапах) агрегатов, и в выбранных точках неравномерно расположенных по исследуемой длине сопрягаемых узлов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Определение амплитуд вибрации производится в диапазоне

Импульсные методы возбуждения по сравнению с традиционными, основанными на применении вибраторов, имеют ряд преимуществ: меньшее количество аппаратуры, более низкая трудоемкость испытаний, возможность возбуждения конструкций в труднодоступных местах и др. Однако, учитывая, что импульсный сигнал обладает значительно большим пик-фактором, чем синусоидальный при использова-

от минимальных оборотов с интервалом 60 мин^{-1} (1 Гц) в режиме холостого хода при полной и характерных нагрузках. Пример определения амплитудно-частотных характеристик силового агрегата трактора Т-150К представлен на рис. 3.87, 3.88, 3.89 [53, 60, 61, 64].

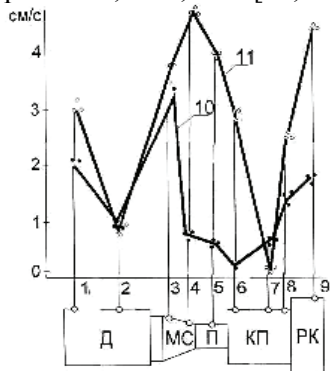


Рис. 3.87. Амплитудно-частотные характеристики силового агрегата трактора Т-150К:

1-9 – точки измерения вибрации: 10 – при частоте вращения 1000 мин^{-1} ; 11 – при частоте вращения 2000 мин^{-1} ; Д – двигатель; МС – муфта сцепления; П – проставочный корпус; КП – коробка передач; РК – раздаточная коробка.

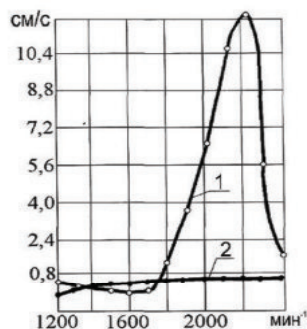


Рис. 3.88. Амплитудно-частотная характеристика силового агрегата в области стыка МС и П в вертикальном направлении:

1 – серийного корпуса МС и П; 2 – разделенного силового агрегата (без П)

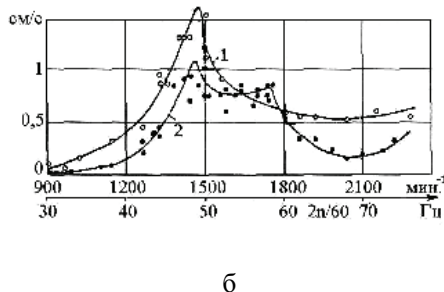
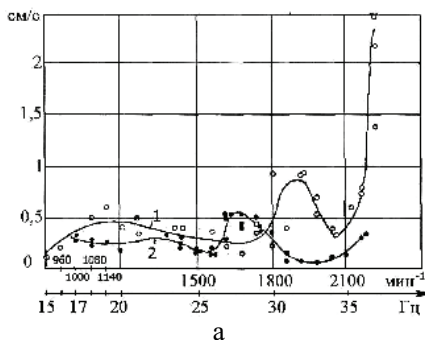


Рис. 3.89. Амплитудно-частотные характеристики виброскорости опоры агрегата (1) и рамы (2) в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях

3.12.7.3. Способы распознавания резонансов

Один из простейших способов распознавания резонанса как причины вибрации, когда машина находится в рабочем состоянии, - это незначительное изменение ее скорости. Если уровень вибрации снижается, тогда причиной этого является резонанс. В более сложных случаях необходимо уста-

новить, как вибрация меняется при движении по инерции, во время которого при различных скоростях измеряется реакция системы (ускорение). При наличии резонанса и резкой остановке машины скорость падает быстро, а снижение уровней вибрации на резонансной частоте запаздывает и медленно затихает. Если резонанса нет, то уровни вибрации после остановки машины резко снижаются. Для решения практических задач определения динамических характеристик составных частей и комплектных машин необходимо исследовать все их корпусные детали, узлы, линию валов и получить информацию, в первую очередь, о первых, наиболее существенных формах и частотах собственных колебаний конструкции, резонансных формах колебаний, механическом сопротивлении и податливости при заданных рабочих режимах машины. Носителем диагностических признаков технического состояния механизмов должны быть рабочие функциональные режимы, закономерные процессы изнашивания, а не прогрессирующее развитие неисправностей за счет дефектов конструкции и технологии изготовления.

Если обнаружится, что причиной вибрации конструкции является резонанс, а вынужденную частоту нельзя устранить, тогда необходимо изменить резонансную частоту конструкции. Это можно сделать тремя способами:

- увеличить жесткость машины, усиливая структуру, чтобы поднять собственную частоту;
- добавить массу, чтобы снизить собственную частоту;
- увеличить демпфирование, чтобы уменьшить отклик машины на вынужденную частоту.

Самым простым и наиболее точным методом определения изгибных и крутильных колебаний является установка акселерометра в какой-либо точке, которая принимается за опорную, и применение перемещаемого акселерометра, который устанавливается в различных точках и, при необходимости, в различных направлениях (рис. 3.85). Для обеспечения нужной разрешающей способности точки замера должны быть выбраны с достаточно малым промежутком. Измерения разницы амплитуды и фазы отдаваемых опорным и перемещаемым акселерометрами сигналов во всех точках проводятся при установившемся режиме работы. Применяемыми приборами могут быть две отдельные одноканальные системы или двухканальный анализатор, выполняющий быстрое преобразование Фурье (см. рис. 3.79, 3.81) [61].

После этого по результатам измерений строятся графики, с помощью которых определяются деформации и перемещения отдельных частей конструкции как абсолютные, так и относительные.

Форма деформации во время работы представляет собой абсолютную деформацию конструкции вследствие влияния неизвестных, но реально существующих сил. Форма деформации не дает информации о независимых динамических свойствах системы. Поэтому с ее помощью не может быть получена информация о перемещениях, отклонениях и т. п., вызванных другими силами или при других частотах.

В приведенном примере (см. рис. 3.85, 3.87) форма деформации показывает, что система трансмиссии и двигатель перемещаются в вертикальном направлении. На основе данной информации можно заключить, что хорошим решением задачи, связанной с шумом, было бы ограничение этих перемещений трансмиссии и двигателя. Это может быть сделано путем увеличения жесткости – лучше всего, между точками, в которых движения происходят в противофазе.

Увеличение жесткости приводит к росту собственных частот, причем предполагается, что этот рост происходит за пределами рабочего частотного диапазона. Мера необходимого увеличения жесткости может быть определена только методом проб и ошибок с использованием инженерного опыта.

3.12.7.4. Определение механического сопротивления и податливости конструкции

Основой одного особого класса экспериментального модального анализа являются измерения набора частотных характеристик.

Движение может быть описано в терминах перемещения, скорости и ускорения. Соответствующие частотные характеристики можно назвать характеристиками «податливости», «подвижности» и «ускоряемости». В общем случае термин «измерение подвижности» используется для обозначения механической частотной характеристики любого вида.

Под механическим сопротивлением колебательной системы принято понимать отношение силы Q , действующей на систему, к скорости \dot{q} возбуждаемых колебаний, то есть $Z = \frac{Q}{\dot{q}}$.

Величину, обратную механическому сопротивлению, называют податливостью $M = \frac{\dot{q}}{Q}$; иногда используют термин «подвижность» или «проводимость». На наш взгляд, использование термина «податливость» в смысловом отношении более точно, когда речь идет об оценке способности пассивных механических систем деформироваться под действием внешних сил, то есть поддаваться силовому воздействию. По смыслу термин «податливость» противоположен термину «сопротивление», в то время как термин «подвижность» имеет оттенок активного действия.

Механические сопротивления и податливости подразделяют на точечные (входные) и переходные (передаточные).

Под точечным механическим сопротивлением Z^{nn} понимают отношение силы Q^n , действующей в n -й точке системы, к скорости \dot{q}^n , возбуждаемой в точке действия силы, то есть $Z^{nn} = \frac{Q^n}{\dot{q}^n}$. Соответственно $M^{nn} = \frac{\dot{q}^n}{Q^n}$.

Учитывая, что сила и колебательная скорость могут иметь шесть составляющих, для точечных сопротивлений и податливостей запишем $Z_{ji}^{nn} = \frac{Q_j^n}{\dot{q}_i^n}$ и

$M_{ji}^{mn} = \frac{\dot{q}_i^n}{Q_j^n}$, где индексы j и i принимают значения от 1 до 6 и обозначают направления соответственно действующей силы и колебательной скорости.

Переходное (передаточное) механическое сопротивление конструкций определяют как отношение силы, действующей в n -й точке Q_j^n , к скорости колебаний, возбуждаемой этой силой в произвольной k -й точке, то есть

$$Z_{ji}^{nk} = \frac{Q_j^n}{\dot{q}_i^k}. \text{ Соответственно } M_{ji}^{nk} = \frac{\dot{q}_i^k}{Q_j^n}.$$

При гармонических колебаниях уравнения для Z и M записывают так:

$$Z_{ji}^{nk}(\omega) = \frac{Q_j^n(\omega)}{\dot{q}_i^k(\omega)}; \quad M_{ji}^{nk}(\omega) = \frac{\dot{q}_i^k(\omega)}{Q_j^n(\omega)}.$$

Механические сопротивления и податливости при гармонических колебаниях представляют как комплексные величины, что позволяет учитывать не только амплитудные, но и фазовые соотношения между силами и скоростями колебаний. В виброакустике величины Q и \dot{q} принято рассматривать как комплексные. Комплексное число

$$Q = |Q|e^{j\omega t} = |Q|(\cos \omega t + j\sin \omega t)$$

это не настоящая сила, так как физика нет комплексных сил. Все силы имеют только действительную часть. Тем не менее силу обозначим через $|Q|e^{j\omega t}$, хотя надо помнить, что имеется в виду лишь действительная ее часть. Алгебра экспонент гораздо проще алгебры синусов и косинусов, вот почему удобно использовать комплексные числа.

Механическое сопротивление и податливость при гармонических колебаниях представляют как комплексные величины, что позволяет учитывать не только амплитудные, но и фазовые соотношения между силами и скоростями колебаний (см. рис. 3.82, 3.85, 3.88, 3.89).

При моделировании наиболее часто учитываются частотные характеристики податливости. При измерениях обычно определяют частотные характеристики ускоряемости, так как наиболее удобным датчиком для измерения движения является акселерометр.

Податливость, подвижность и ускоряемость алгебраически связаны друг с другом. Результаты измерений одной из соответствующих частотных характеристик могут быть использованы для расчета другой.

В идеальном случае определение частотной характеристики подвижности включает в себя возбуждение конструкции с помощью замеряемой силы, измерение реакции с последующим расчетом отношения спектров действующей силы и реакции. Однако, на практике возникает целый ряд проблем:

- наличие механического шума в конструкции, включая нелинейные процессы;

- шум электрического характера в используемой аппаратуре;
- ограниченная разрешающая способность при анализе.

Для сведения этих проблем к минимуму необходимо применить некоторые статистические методы для оценки частотной характеристики по результатам проведенных измерений. Оценка по данным, содержащим случайные шумы, обычно требует применения какого-либо вида усреднения.

Чтобы измерить частотные характеристики модуля $|Z_F|$, действительной $\text{Re } Z_F$ и мнимой $\text{Im } Z_F$ частей механического сопротивления по отношению к усилию, а также угол сдвига фаз между усилием и колебательной скоростью, необходимо:

- воздействовать гармонической силой на исследуемые конструкции во всем исследуемом диапазоне частот;
- получить информацию о действующей силе и скорости возбуждаемых колебаний на каждой частоте;
- определить модуль отношения сигнала, пропорционального силе, к сигналу, пропорциональному скорости; записать частотную характеристику этого отношения;
- определить угол сдвига фаз между силой и скоростью;
- на каждой частоте сигнал, пропорциональный модулю сопротивления, умножить на косинус и синус угла сдвига фаз между силой и скоростью и зафиксировать частотные характеристики этих произведений.

Конструкции можно возбуждать с помощью механических (кинематических или инерционных), электромеханических, пьезоэлектрических, электродинамических и гидравлических вибраторов.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы определения собственных и резонансных частот вибрации?
2. Какие различия в разрешающей способности методов возбуждения ударным молотком и применения вибратора?
3. Рассказать, как можно определить формы деформации двигателя в составе транспортной машины.
4. Какой самый простой и наиболее точный метод определения изгибных и крутильных колебаний двигателя и трансмиссии в составе транспортной машины?
5. Какие существуют способы распознавания резонансов?

3.12.8. Методы и способы управления спектром вибрации при доводке динамических характеристик двигателя и транспортной машины

3.12.8.1. Способы улучшения динамических свойств конструкции

Демпфирование вибрации – уменьшение уровня вибрации вследствие рассеивания механической энергии.

Общее правило: если вынуждающая частота ниже резонансной, наиболее эффективным путем уменьшения отклика является демпфирование,

если выше – лучше всего увеличить массу, изменив, например, натяги посадок деталей, способы крепления узлов. По результатам доводки двигателей машин в ходе стендовых испытаний и на полигонах производится отстройка собственных частот от частот вынужденных сил, импульсных рабочих (эксплуатационных) режимов и протекающих физических процессов, например, сгорания топлива, работы насоса, режима переключения скоростей, набора и сброса нагрузки и т. п. При необходимости производится перераспределение энергии вынужденной вибрации в область спектра частот действия менее ответственных элементов механизмов двигателя и агрегатов или элементов машины, выбора частот возмущающих сил, соотношения чисел зубьев в шестернях, добавлением элемента жесткости, диаметра и группы шумности подшипников. Конструктивные и технологические средства снижения вибрации подшипниковых узлов и зубчатых передач приведены в [51, 52, 53, 60, 64].

Как правило, шум и вибрации любого реального механизма образуются в результате одновременного совместного действия нескольких источников. Интегральное значение шума и вибрации, тем не менее, обычно определяется каким-либо одним, наиболее интенсивным источником. Однако исключение самого мощного источника не всегда приводит к снижению общего шума более, чем на 8-10 дБ, так как свой вклад начинают вносить остальные источники, уровни которых могли быть на 8-10 дБ меньше преобладающего и ранее не оказывали влияние на результаты измерений.

Поскольку источниками вибрации двигателей машин являются детали и узлы со спектром собственных частот, уровни их вибрации зависят от спектрального распределения собственных частот деталей и узлов. При проектировании и ремонте механизмов повышенной надежности и точности необходимо рассматривать не только параметры возмущающих сил, но и динамические свойства деталей отдельных узлов, агрегатов и комплектной машины в заданных эксплуатационных режимах работы. Исследование зависимости собственных частот системы от геометрических и физических параметров конструкции позволяет определять возможности управления расположением собственных частот относительно спектра возмущающих сил. [53, 64]

Накопленный опыт по устранению резонансных явлений в машинах и агрегатах и обобщение известных методов анализа собственных частот конструкций позволяют выделить основные принципы улучшения динамических свойств машин путем изменения параметров структурных элементов (рис. 3.90).

Для исключения резонансных явлений необходимо изменить частоты возмущающих сил, что не всегда возможно, тогда необходимо изменить собственные частоты деталей и узлов. Последние можно менять путем изменения массы или жесткости сопряжений и деталей (рис. 3.90).

Масса и натяги посадок деталей, их взаимное расположение по длине вала и относительно опор подшипников оказывают существенное влияние на уровни спектральных составляющих механизма. Чтобы избежать появления резонанса деталей, вала, силового агрегата в составе машины, частоту

собственных колебаний валов с деталями и агрегатами желательно выбрать выше частоты основных источников возмущения, действующих на частоте вращения, двойной и тройной частотах вращения. Эти параметры необходимо учитывать при проектировании и доводке двигателя, его агрегатов и комплектной машины. Собственные частоты креплений и монтажа агрегатов на раму машины не сложно определить экспериментально в статике методами ударного возбуждения. Масса составных деталей узлов, их взаимное расположение, натяги в соединениях и осевой натяг подшипников определяют фактическую собственную частоту узла механизма в сборе или детали при различных посадках в корпус. Увеличение массы за счет присоединения деталей по плотной посадке ведет к снижению собственных частот узла.

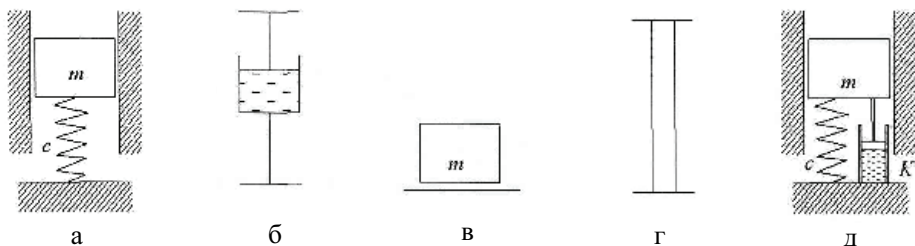


Рис. 3.90. Способы улучшения динамических свойств конструкции путем добавления или удаления из механической системы любой комбинации структурных элементов:

а – добавление или удаление элемента жесткости c ; б – добавление или удаление демпфирующего элемента; в – увеличение или уменьшение массы m ; г – добавление жесткости связи; д – добавление виброизолятора K

Величина посадочных поверхностей деталей, собираемых в узлы с зазором и натягом, влияет на собственные частоты узла и позволяет изменить уровень вибрации до 10 дБ. Увеличение осевого упругого натяга подшипников качения приводит к повышению жесткости узла, обуславливающей снижение вибрации и повышение собственных частот валов и роторов в сборе машин. За счет изменения натяга посадки деталей на вал и в корпус или площади сопрягаемых поверхностей можно снизить амплитуду или изменить (сдвинуть) собственную частоту узла до 50 Гц (рис. 3.91).

Этого достаточно для отстройки от вынужденных частот или для ослабления резонанса. На рис. 3.91 f_1 – частота вибрации, возбуждаемая перекачиванием тел качения и f_2 – дефектами беговых дорожек наружного кольца подшипника. Для повышения частоты вибрации f_1 необходимо увеличить натяг внутреннего подшипника на вал, а для снижения – уменьшить величину натяга. Для повышения частоты f_2 необходимо усилить осевой натяг подшипников в опорах, а для снижения частоты – уменьшить зазор посадки подшипника в корпус (стакан) до нуля. Ряд других способов изменения частоты и уровней возбуждаемой вибрации f_1 , f_2 и другими источниками приведены в работе [53].

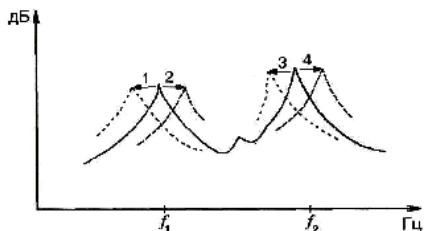


Рис. 3.91. Схемы изменения собственных частот вибрации, возбуждаемых подшипниковыми узлами

Жесткость подшипниковых узлов можно значительно повысить и изменить собственную частоту кольца подшипника качения при посадке наружного кольца подшипника в корпус (стакан) без зазора, присоединив таким образом частично массу корпуса или стакана. При этом необходимо решить вопрос исключения перекоса колец подшипников и обеспечения движения опор при тепловом удлинении вала и создании предварительного натяга подшипников вала, например, по стакану подшипникового узла.

Понижению собственной частоты способствует увеличение размеров деталей, повышению – применение дополнительных точек закрепления, разделение таких деталей на составные части, каждая из которых колеблется на более высокой частоте, чем в сборе агрегатов, и позволяет устранять вибрации. Экспериментальная собственная частота, например, отдельной коробки передач трактора Т-150К на собственных опорах составляет 250 Гц, а в сборе силового агрегата частота меньше.

Использование деталей механизма из прессованных порошков металлов, чугуна и из различных видов пластмасс – капрона, текстолита – является эффективным средством снижения высокочастотной вибрации и устранения резонансных явлений, так как указанные материалы обладают большим внутренним трением.

Отстройку собственных частот и частот вынужденных колебаний можно реализовать конструктивным изменением размеров и формы элементов корпуса, расположением мест крепления фланцев, толщиной, количеством и расположением ребер корпуса машины и подшипниковых узлов, заменой изгиба растяжением-сжатием; изменением изгибной жесткости элементов конструкции двигателя. Повышение соосности расточки подшипниковых опор, определение оптимального расстояния между опорами подшипников и количеством ребер в корпусе, применение подшипников класса шумности Ш6-Ш8 позволяют снизить вибрацию, например, электродвигателя в агрегате до заданного класса вибрации и обеспечить высокий ресурс. Чем выше степень симметрии корпуса, но лучше при нечетном количестве ребер в его радиальном сечении, тем благоприятнее его резонансные свойства.

Жесткость валов зависит от величины критической скорости вращения, на которую влияет целый ряд факторов. К ним относятся: односторонние силы ременных, зубчатых, газо-, гидродинамических, электромагнитных и других сил, податливость опор вала, гироскопическое действие масс, распределение деталей по длине вала, длина посадочных поверхностей, натяг деталей на вал и другие факторы.

Количество ребер определяет не только количество собственных частот, но и их взаимное расположение в спектре. Чем больше ребер, тем больше расчленение волн колебаний и собственных частот деталей, а в целом – жесткость корпуса. Необходимое местоположение детали по длине вала, ребра на корпусах агрегатов и машин быстро экспериментально определяется по снижению резонансной вибрации на заданной частоте при свободном перемещении макета ребра по корпусу или детали по валу. Для определения нежелательного распределения вибрации найденное место установки детали на валу или макета ребра на корпусе уточняется по изменению спектра вибрации машин по всему спектру вибрации машины от 5 до 10000 Гц.

Другим способом снижения вибрации, возбуждаемой силами в цилиндрической части корпуса, является изготовление цилиндрического корпуса оболочки с поперечными массивными и жесткими кольцами. При увеличении отношения толщины кольца к толщине корпуса в 3-5 раз перепад вибрации на нем составляет до 10 дБ.

Определять собственные частоты всех деталей механизмов двигателя на стадии изготовления не всегда рационально. В таких случаях при большом количестве деталей и сопряжений, небольшой массе деталей очень сложно, а зачастую невозможно методом сопоставления собственных частот и форм с вынужденными установить степень влияния динамических характеристик конструкции на вибрацию агрегата в сборе. При работе механизмов и устройств вибрация конструкции возбуждается под действием сил гармонических или шумового характера, линейных сил или моментов, единичных или групповых, сконцентрированных в одной точке, нескольких точках или распределенных в пространстве конструкции. Все эти особенности действующих сил и взаимодействия собранных соединений узла деталей конструкции в работающем агрегате определяют форму и собственные колебания, пространственное распределение амплитуд и фаз возбуждаемых колебаний, по которым можно установить параметры механических сопротивлений и податливостей конструкции с идентификацией конкретных источников резонансной вибрации и корреляционной зависимости распределения вибрации. Учет влияния всех указанных факторов на динамические характеристики конкретной технической системы можно оценить лишь при доводке реальной конструкции отдельного агрегата и в сборе машины. Наибольшие уровни колебательной скорости конструкции при разных возбуждаемых силах возникают на ее первой собственной частоте. С повышением порядкового номера собственной частоты уровень колебательной скорости на этой частоте уменьшается обратно пропорционально ее значению, поэтому на стадии конструирования нет необходимости в отстройке всех собственных частот от частот возбуждаемых сил. С учетом продольных и крутильных колебаний стержней следует учитывать первые три собственные частоты: для изгибных колебаний стержней – первые две резонансные частоты, для изгибных колебаний пластин – первую.

На частотах ниже первой собственной частоты изгибных колебаний конструкций увеличение их жесткости приводит к возрастанию механиче-

ского сопротивления этих конструкций, в результате чего их вибровозбудимость уменьшается. Принимая меры по увеличению изгибной жесткости, следует иметь в виду, что это приводит к изменению не только механического сопротивления, но и других виброакустических свойств конструкции таких, как вибропроводимость и звукоизолирующая способность.

При наличии банка частот и форм собственных колебаний оценку виброактивности конструкции можно осуществлять методом разложения вынужденных колебаний по собственным формам. Вопрос о числе собственных форм в разложении остается открытым, но тем не менее можно дать следующие рекомендации: при внезапно приложенной или импульсной нагрузке возбуждаются прежде всего формы колебаний, соответствующие низким частотам. Собственные частоты, возбуждаемые отдельным подшипником на частотах 2-3,15 кГц при увеличении нагрузки и возмущающих сил, возбуждаемых собственными дефектами подшипника и монтажа в подшипниковом узле, возбуждаются на второй и третьей собственной частоте в области 5-6,3 кГц. Для расчета отклика системы на такие нагрузки в большинстве случаев достаточно взять в разложении несколько первых форм. При низкочастотном периодическом возбуждении системы можно ограничиться несколькими формами, соответствующими собственным частотам, близким к частоте возбуждения. Учитывая, что собственные формы и частоты высоких порядков определяются с большой погрешностью, задачу о вынужденных колебаниях следует решать экспериментальным путем методом ударного возбуждения.

В системах с трением, как и в других механических системах, возможны автоколебания различной природы, например, обусловленные дисбалансом, эксцентricностью вала.

Неплавность скольжения, порождаемая силами трения, вызывает фрикционные автоколебания. В практике машиностроения применяют разнообразные методы снижения и устранения фрикционных автоколебаний.

3.12.8.2. Методы разделения источников вибрации, возбуждаемой агрегатами машин

Исходными данными для определения основных источников вибрации служат спектры, полученные в нескольких точках по периметру машины в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В большинстве случаев, однако, достаточно измерения спектров только в радиальном и осевом направлениях, в которых уровни вибрации обычно наибольшие. Первые сведения об источниках вибрации могут быть получены в результате определения влияния основных технических параметров машины на ее вибрацию. Для этого спектры вибрации определяют на различных скоростных и нагрузочных режимах, при различных условиях питания энергоносителями (давлении нагнетания, качестве энергоносителей и т. п., например, рис. 3.92 [54]). Важным элементом экспериментальных исследований вибрации является определение амплитудно-частотной характеристики как машины, агрегата в целом, так и отдельных их узлов и деталей.

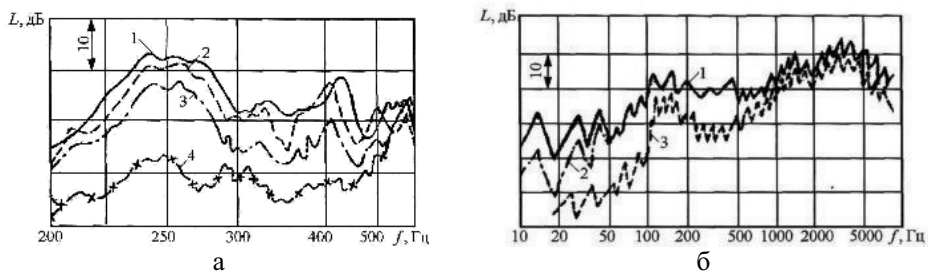


Рис. 3.92. Спектр вибрации компрессора:

а – компрессор подачи воздуха: 1 – компрессор в штатном исполнении; 2 – компрессор с перекрытой заслонкой на всасывании одного цилиндра; 3 – двух цилиндров; 4 – трех цилиндров; б – дизель-компрессор ДК2: 1 – давление нагнетания 22,5 МПа; 2 – давление нагнетания 14,7 МПа; 3 – прокрутка топливного насоса

Спектры вибрации измеряют на нескольких скоростных режимах работы механизма, что позволяет более надежно сопоставлять расчетные частоты с реальным частотным спектром вибрации, разделять вынужденные и собственные колебания, выявлять резонансные зоны. Множественные испытания позволяют более точно оценить тенденцию изменений амплитуд составляющих спектра, вызванных функционированием определенного кинематического звена.

Локальный источник интенсивной вибрации можно выявить по пространственному распределению уровней вибрации на исследуемой частоте спектра вибрации машины или конструкции. Уровни вибрации вблизи источника обычно наибольшие.

При действии нескольких источников вибрации на одной частоте в конструкции механизма возбуждается почти равномерное вибрационное поле. Его следует анализировать в узкополосном спектре частот с учетом конструктивных особенностей механизма и его резонансных свойств. Повышенная вибрация в отдельных местах конструкции может быть следствием резонанса, а не наличия близко расположенного источника вибрации.

Во многих исследованиях для разделения источников вибрации можно воспользоваться спектральным или корреляционным анализами, временной селекцией, сопоставлением потоков колебательной мощности от разных механизмов, методами взаимности спектров, измерения динамических сил. Большое значение для селекции вибрационных сигналов от взаимодействующих сопряжений имеет их выделение в определенные промежутки времени цикла работы, например, двигателя. Такая операция носит название стробирования или фазового избирания. Она заключается в том, что в соответствующий момент времени по углу поворота коленчатого вала относительно некоторой опорной точки формируется импульс определенной длительности. Временное положение этого импульса должно соответствовать появлению вибрационного сигнала от исследуемой кинематической пары. В двигателях в качестве опорной точки обычно принимают момент прохождения поршнем первого цилиндра верхней мертвой точки. Этому соответствует наличие у большинства тракторных двигателей отверстия в маховике,

положение которого соответствует верхней мертвой точке первого и четвертого цилиндров (для двигателей с порядком работы цилиндров 1,3,4,2) или моменту начала нагнетания топлива в эти цилиндры. По фазовому углу отклонения виброударного импульса при посадке клапана в гнездо в зависимости от зазоров в клапанах и фаз газораспределения можно производить оценку состояния газораспределительного механизма, определять места неравномерности распределения масс вокруг оси вращения, распознавать изогнутость вала и несоосности.

Силовые и кинематические воздействия в элементах и узлах машины зависят не только от параметров рабочих процессов, но и от динамических характеристик узлов машины и присоединительных конструкций. Поэтому для вибрационных полей характеристики машины как источника вибрации целесообразно производить оценку динамических сил, действующих в различных сечениях машины, а также механических импедансов опорных узлов машины, рам, плит, кузова.

Локализацию источника отдельного узла или механизма, входящих в состав агрегата, необходимо осуществлять двумя способами: по отношению значений колебательных мощностей, излучаемых отдельными механизмами в рамные конструкции, и по направлению потока колебательной энергии. Применение этого метода оправдано в исследованиях сложных и насыщенных оборудованием объектов. По спектру колебательной мощности, излучаемой машиной в опоры крепления агрегатов, к рамам, плитам, можно установить вклад каждого источника в вибрационное поле. Преимущества этого метода особенно явно выражены при оценке низкочастотной вибрации в различных направлениях. Колебательная мощность используется при выявлении источников повышенной вибрации в блочных агрегатах. Локализация источника от механизма, входящего в состав агрегата, производится различными способами: по соотношению величин колебательных мощностей, излучаемых отдельными механизмами в несущие конструкции, либо по направлению потока колебательной энергии.

При одновременном действии в машинах и сложных агрегатах источников с одинаковыми частотами их локализацию можно производить, используя метод взаимных спектров и механических импедансов. Метод основан на использовании связи между энергетическими спектрами колебательных скоростей в точках опорной поверхности машины и энергетическими и взаимными спектрами сил, действующих на корпус машины.

Энергетические и взаимные спектры позволяют произвести количественную оценку доли вибрации от действия каждого из источников. По податливости конструкции и взаимным спектрам возбуждающих сил можно определить вибрации, обусловленные влиянием каждого источника с учетом или без учета их взаимной корреляции. Особенности указанного метода и аппаратура, позволяющая его реализовать, подробно описана в литературе [14, 15, 61].

Диагностика может успешно использовать информацию, содержащуюся в амплитудной, частотной и фазовой модуляции вибрации при определении спектров многомашинных агрегатов, изменении скорости враще-

ния в режиме холостого хода и номинальной нагрузки; при пониженном напряжении сети, пониженном и повышенном напряжении питания сети или последовательном отключении в электромеханических системах; при различных условиях изменения подачи энергоносителей, изменении осевого натяга подшипников качения и т.п. В таких исследованиях, например, электродвигателя, спектры, измеренные при пониженном напряжении, сравниваются со спектрами, снятыми при номинальном напряжении. Из такого сравнения определяются частоты составляющих магнитного происхождения. Составляющие, уровень которых практически не зависит от величины магнитного потока, имеют механическое происхождение.

3.12.8.3. Методы последовательного исключения источников вибрации

Методы последовательного исключения источников вибрации применимы как при одновременной работе нескольких машин, агрегатов, в которых возбуждаются колебания на одинаковых частотах, так и при выявлении источников вибрации узлов одной машины, например, при ее доводке на стадии проектирования.

При определении источников вибрации одной машины последовательно выполняется демонтаж ее узлов и производится измерение спектров вибрации до и после исключения каждого источника. После исключения основного источника уровни вибрации становятся меньше на определенной частоте или в области частот. Вклад исключенного источника в общий уровень определяется по разности уровней вибрации.

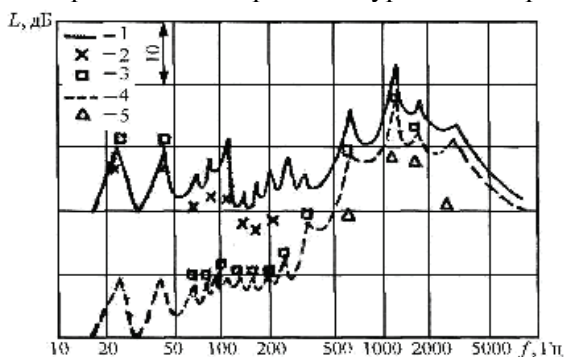


Рис. 3.93. Спектры вибрации поршневого компрессора:

- 1 — компрессор в штатном исполнении; 2 — компрессор с пониженным давлением нагнетания; 3 — компрессор без всасывающих и нагнетательных клапанов; 4 — компрессор без шатунно-поршневых групп; 5 — компрессор без водяного и масляного насосов

и нагнетательных самодействующих клапанов приводит к отсутствию сжатия газа во всех ступенях компрессора, то есть практически к полному исключению опрокидывающего момента. Основным источником вибрации на

Спектры вибрации многоступенчатого поршневого компрессора при последовательном исключении источников вибрации показаны на рис. 3.93 [54]. Полученное в эксперименте уменьшение уровней вибрации на частотах 200-500 Гц свидетельствует о том, что в этом диапазоне частот источником вибрации являются газодинамические процессы в межступенчатых коммуникациях. Исключение всех всасывающих

третьей и восьмой дискретных составляющих являются гармоники опрокидывающего момента. При исключении самодействующих клапанов ликвидируются также газодинамические колебательные процессы в межступенчатых коммуникациях компрессора.

Исключение шатунно-поршневых групп с соответствующим изменением массы противовесов на коленчатом валу и прокрутки вала от электродвигателя показало, что основным источником вибрации на частотах первой и второй составляющей являются силы инерции поступательно движущихся масс.

После демонтажа шатунно-поршневых групп производится испытание компрессора с исключением зубчатого привода водяного и масляного насосов при осуществлении прокрутки электродвигателя. Полученное снижение вибрации на 8-10 дБ на частоте 615 Гц (частота контактных зацеплений) указывает на уровни вибрации, возбуждаемые зубчатым приводом. Охлаждение компрессора в этих опытах осуществлялось водой из водопроводной сети, а смазочное масло добавлялось от автономного масляного насоса.

Пример последовательного исключения источников вибрации, возбуждающих колебания на одинаковых частотах при одновременной работе нескольких агрегатов на примере трактора приведен на рис. 3.93 [55]. Оценка влияния отдельных машин и агрегатов на спектр вибрации комплектной техники осуществляется при поочередном включении отдельных функционирующих механизмов и агрегатов машины. Метод может дать надежную информацию, если при исключении одного агрегата не нарушаются условия работы остальных. На практике, однако, это удается сделать далеко не всегда. В большинстве случаев механизмы и агрегаты комплектных машин не могут работать автономно. Очевидно, что одну машину или механизм нельзя расчленить на элементарные источники и запускать их по очереди. Таким образом, метод последовательного включения источников, хотя и является наиболее удобным, но не всегда может быть применим.

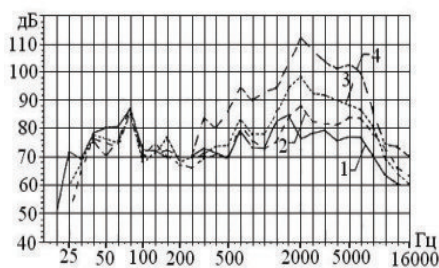


Рис. 3.94. Третьоктавные спектры ускорения вибрации в одной контрольной точке при испытаниях трактора МТЗ-82 на стенде:

1 – двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
2 – ДВС и муфта сцепления (МС); 3 – ДВС, МС, вал отбора мощности (ВОМ – отключен рычагом); 4 – ДВС, МС, 4ПНС (понижена нагрузка передачи), ВОМ отключен рычагом

На рис. 3.94 приведены спектрограммы вибрации трактора МТЗ-82, из которых видно, что в области частот 2000 Гц явно обнаруживается резонанс, поскольку при исследовании условий испытаний с отключением различных узлов в этой области наблюдаются высокие уровни вибрации (в области частоты 2000 Гц). Выводы о том, что необходимо доработать, снизить вынуждающие силы или совершенствовать конструкцию корпусов, рамы, способы крепления агрегатов, можно сделать при анализе собственных и изгибных

частот колебаний систем трактора.

Недостатком метода последовательного исключения источников вибрации является то, что он не учитывает их взаимодействия. Исключение одного какого-либо источника вибрации может влиять на действие других источников. Так, исключение зубчатых электромагнитных сил в электродвигателе путем применения гладкого (без пазов) ротора не позволяет определить взаимное влияние соотношения чисел пазов статора и ротора на их динамику. Исключение всасывающих и нагнетательных клапанов наряду с исключением газовой составляющей противодействующего момента компрессора устраняет колебательные процессы в межступенчатых коммуникациях и меняет величину и направление сил в кривошипно-шатунном механизме.

Таким образом, каждый из рассматриваемых способов определения источников вибрации имеет недостатки. Основные источники вибрации должны определяться по результатам использования нескольких методов. От правильного определения основного источника вибрации зависит эффективность вибрационного диагностирования и результативность всех работ по доводке конструкции машины.

3.12.8.4. Методы доводки конструкции и структурных параметров машин

Источники вибрации можно определить и методами изменения способа крепления или размера деталей механизма или машины. Это приводит к уменьшению или увеличению динамических сил, возбуждающих вибрацию. Спектры вибрации механизма измеряют до и после внесенных конструктивных изменений. Например, для определения в электродвигателе источника вибрации электромагнитного происхождения, возбуждаемого пазами ротора, производят замену штатного ротора на гладкий (без пазов). Для определения вибрации, возбуждаемой подшипниками качения, их заменяют на лабораторные подшипники скольжения. Результаты испытаний электродвигателя с такими конструктивными изменениями представлены на рис. 3.95.

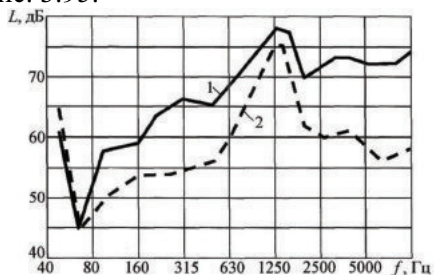


Рис. 3.95. Спектрограммы вибрации электродвигателя мощностью 55 кВт с подшипниками качения (1) и скольжения (2) при частоте вращения 3000 мин^{-1}

При исследовании источника вибрации зубчатого привода можно применить шестерню с уменьшенной толщиной зуба. Это приводит к увеличению уровня вибрации на частоте зубозацепления и второй ее гармоники. Таким образом, по увеличению вибрации на этих частотах убеждаются в наличии источника вибрации.

При работе поршневых машин с кривошипно-шатунным механизмом под действием изменяющейся по величине и знаку нормальной силы

происходит перекладка поршней.

Наличие зазора между поршнем и цилиндром приводит к удару поршня о стенки цилиндра. С увеличением зазора скорость поршня при ударе возрастает, что приводит к повышению интенсивности удара и, как следствие, к повышению уровней спектра вибрации. Интенсивность удара определяется скоростным режимом, величиной зазора между поршнем и цилиндром, массой поршневых групп, произведением хода поршня на диаметр.

Изменение перечисленных параметров позволяет определить вклад каждого параметра или их комбинации на уровни вибрации двигателей внутреннего сгорания.

Следует отметить, что по мере снижения вибрации машины в результате подавления выявленных основных источников будут выявляться новые основные источники вибрации. Ограничивать этот процесс будут либо отсутствие практической необходимости снижения вибрации конкретной машины, либо технические возможности.

3.12.8.5. Связь между вибрацией и шумом и методы их разделения

Связь между вибрацией и шумом. Машины излучают от 10^{-10} до 10^4 своей мощности. Доля акустической энергии увеличивается по мере увеличения мощности и уменьшения массы.

Почти всегда шум и вибрация вызываются одними и теми же причинами, существуют одновременно и определенным образом связаны друг с другом. На рис. 3.96, 3.97 [56] показаны спектры шума и вибрации одних и тех же механизмов. Обращает на себя внимание практическое совпадение максимумов, свидетельствующее об общем источнике колебаний. Это обстоятельство объясняет, почему шум и вибрация рассматриваются совместно: борьба с ними обычно осуществляется средствами, снижающими как шум, так и вибрацию.

Действительно, поток газа (и жидкости), проходящий вдоль границ твердого тела или контактирующий с ним, неизбежно вызывает колебания элементов твердого тела (часто усиливающиеся из-за резонансных явлений, связанных с конечностью элементов конструкций). С другой стороны, вибрация конструкций механизмов, обладающих определенной площадью соприкосновения с воздушной средой, вызывает излучение звуковой энергии в воздух. Из-за сложных кинематических процессов, происходящих при работе механизмов, не всегда возможно определить первопричину образования колебаний. Часто первоначально возникает вибрация в твердотельных конструкциях механизмов (например, удары тел в кинематических парах), по мере ее распространения по конструкциям, обладающим заметной площадью излучения, возникает воздушный шум (см. рис. 3.96, 3.97). Могут быть и обратные случаи, (например, при протекании воздушных потоков в трубах вентиляционных каналов машин), когда интенсивная вибрация возникает при контакте элементов конструкции с воздушным потоком.

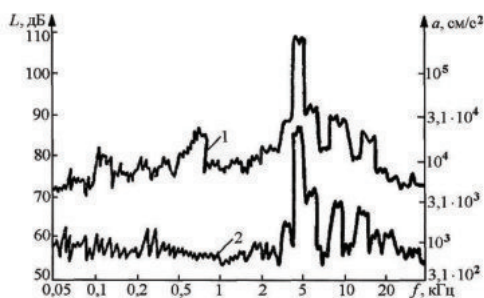


Рис. 3.96. Спектры шума (1), дБА и вибрации (2), дБ нагнетательного трубопровода компрессора газотурбинной установки

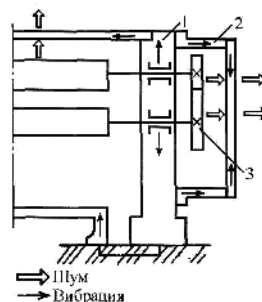


Рис. 3.97. Пути передачи вибрации и шума, возникающих в редукторах:
1 – станина; 2 – кожух; 3 – зубчатая передача

В реальных механизмах условия для возникновения шума и вибрации существуют во многих элементах практически одновременно, тесно связаны между собой и зачастую переходят из одного вида в другой. Например, вибрация зубчатых передач вызывает колебания кожуха, при этом возникает воздушный шум, распространяющийся в соседнее помещение и вызывающий вибрацию стекол помещения, в силу резонанса начинающих интенсивно дребезжать, то есть снова излучать шум.

Корреляционные исследования, позволяющие проводить количественную оценку связи между процессами, свидетельствуют о высокой степени корреляции между измеренным шумом механизма и вибрацией его отдельных элементов. По мере удаления от первоначального источника колебаний указанная взаимосвязь слабеет, причем степень ослабления увеличивается с повышением частоты. Указанное обстоятельство объясняется сложностью путей распространения колебаний по конструкции, влиянием резонансных колебаний и постоянных преобразований в ограниченных конструкциях колебаний одного типа в другие. Это обстоятельство должно учитываться при определении информационных мест измерения шума и при разработке методов диагностирования состояния элементов машин по шумовым характеристикам.

Наличие тесной связи между шумом и вибрацией должно самым тщательным образом учитываться при проектировании агрегатов и машин, разработке способов крепления механизма, определении мест его установки.

Особенностью шумового поля, создаваемого работающим механизмом в воздухе, является относительно малое изменение характера шума при перемещении приемника в близко расположенные точки. Соотношение между максимумами спектра вибрации, измеренными в соседних точках механизма, отличаются обычно более резко. Такая картина характерна для тех случаев, когда первичным источником служит вибрация. Шум в точке приема возникает от ряда вибрирующих элементов, локальное положение которых в конструкции различно, а следовательно различны и уровни вибрации этих

элементов, даже если они расположены близко (на малых волновых расстояниях) друг от друга.

Методы разделения источников вибрации и шума. Источники вибрации и шума взаимосвязаны, могут иметь различную природу и проявляться на одной частоте.

Рассмотрим методы разделения источников вибрации и шума на примере асинхронного двигателя, возбуждающего вибрацию и шум механического, аэродинамического и электромагнитного происхождения.

Выделение вентиляционного шума обдуваемого электродвигателя производится по результатам испытаний:

- а) в комплектной сборке при пониженном напряжении до 50-100 В;
- б) без кожуха с вентилятором при пониженном напряжении;
- в) без вентилятора с кожухом при номинальном напряжении;
- г) без вентилятора и без кожуха при пониженном напряжении;
- д) без вентилятора и без кожуха с пониженным значением напряжения питающей сети;
- е) с закрытыми входными и выходными люками в любом режиме (для продуваемых двигателей).

Данные измерений по п. «в» сравнивают с данными, полученными по п. «а». Для выявления шума, обусловленного резонансными вибрациями кожуха, производят сравнение данных, полученных по п. «д» с данными измерений по п. «в». Частоты шума магнитного происхождения совпадают с частотами магнитной вибрации. Кроме того, они могут быть определены сравнением результатов измерения по п.п. «а», «д» с данными, полученными при определении спектров вибрации при номинальном напряжении. Составляющие шума, не обусловленные магнитными и аэродинамическими силами, вызываются механическими источниками. Для обдуваемых машин они определяются результатами измерения по п. «д». Шум, обусловленный подшипниками качения, может быть более точно определен после замены подшипников качения подшипниками скольжения и измерений по п. «д».

Задача отделения высокочастотной случайной вибрации конкретного исследуемого источника вибрации от всех других в объеме колебательной системы достаточно просто решается установкой вибропреобразователя непосредственно в области данного источника. Сигналы высокочастотной вибрации от других источников слабо влияют на измеряемый уровень из-за потерь на контактирующих поверхностях при распространении вибрации. Кроме того, в высокочастотном участке спектра вклад периодических составляющих в уровень вибрации мал и не влияет на результаты анализа модулированного сигнала.

Еще один способ решения задачи разделения сигналов вибрации дают направленные приемники виброакустических сигналов. Такие приемники воспринимают вибрацию или шумы, идущие только в данном направлении. К таким измерениям относятся спектры вибрации в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Ориентируя датчики вибрации или микрофоны поочередно на каждый из источников, можно определить вклады каждого источника в общее поле. Применимость этого способа ограничивается конст-

рукциями объектов, по которым распространяются виброакустические сигналы от источника к месту наблюдения.

Приступая к решению задачи о разделении источников вибрации и шума, следует сначала испробовать перечисленные выше простые способы. К сожалению, число практических задач, решаемых таким способом, невелико. Чаще всего приходится иметь дело с источниками, работающими только совместно – генерирующими сигналы с перекрывающимися спектрами.

Другой способ решения – спектральный. Если разные источники дают вклад в различных частотных диапазонах, то спектральная плотность мощности виброакустического сигнала в точке наблюдения в каждом частотном диапазоне определяется только одним источником. Для полного решения задачи здесь достаточно произвести обычный спектральный анализ вибрационных или шумовых характеристик в источниках и точке наблюдения.

Вибрация электромеханических систем представляет, собой сумму детерминированных и случайных составляющих, создаваемых различными источниками возмущающих сил. Для разделения этих составляющих, как правило, используют частотные моды, в частности, узкополосную фильтрацию; однако, их полного разделения не происходит. В ряде случаев при разложении суммы периодических сигналов на составляющие необходимо измерять начальные фазы кратных гармоник. При одновременной амплитудной и частотной модуляциях одной модулирующей частотой спектр модулированного сигнала несимметричен. Спектр сигнала на входе амплитудного детектора содержит постоянную составляющую и составляющую с частотой амплитудной модуляции, а после частотного детектора – постоянную составляющую с той же частотой угловой модуляции. Процессы модуляции сигналов вибрации машины несут большие неравномерности температурных полей и сгорания, меняется качество смазочных материалов в подшипниках, образуются зазоры в сопряжениях. Причинами изменения технического состояния машин при осмотрах и ремонтах могут служить замены отдельных деталей или способов их крепления, изменение взаимного положения деталей в узлах, регулирование зазоров.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы демпфирования вибрации?
2. Какой способ демпфирования вибрации более рациональный, если вынужденная частота (как источник высокой вибрации) выше резонансной частоты?
3. Какие существуют методы перераспределения энергии вынужденной вибрации с целью отстроить от собственной частоты технической системы?
4. Какие существуют способы улучшения динамических свойств конструкции?
5. Какими конструктивными способами можно отстроить вынужденные частоты от собственных частот вибрации?
6. Какие существуют методы разделения источников вибрации, возбуждаемой рабочими режимами и процессами в двигателе?
7. Какие существуют методы последовательного исключения источников вибрации?

8. Как конструктивными способами можно снизить вибрации подшипниковых узлов?
9. Привести способы разделения источников шума и вибрации.

3.13. Методы и средства контроля электрических и электронных систем управления двигателем автомобиля

3.13.1. Объекты и методы распознавания неисправностей отдельных элементов и блоков систем

Многообразие моделей двигателей с различными программами управления и базами данных требует обязательного уменьшения типажа средств контроля работоспособности электронных систем.

Основными объектами электронных систем диагностирования (контроля) являются: работоспособность ЭВМ системы, содержание ЭВМ, цифровые системы автоматического управления, электронные блоки управления и передача данных между блоками, элементами управления и бортовых систем контроля и диагностирования. Диагностирование электронных систем двигателя автомобиля начинают с проверки исправности аккумуляторной батареи.

Основными методами диагностирования единичных неисправностей в электрических и электронных системах являются: достоверность максимальных и минимальных значений напряжения, тока, сопротивления, формы, уровня, периодичности и длительности сигнала, амплитуды и частоты. Поиск неисправностей осуществляется путем замены элементов, шунтированием, подачей сигнала и контролем его прохождения, контролем электрических проводов, индикацией вида неисправности с помощью индикаторной лампы, повторной пайкой, настройкой обходной цепи, индикацией вида неисправности с помощью прибора для сканирования, индикацией неисправности с помощью тестера осциллографа. Типичными неисправностями являются: сбой в работе, замыкание, нарушение заземления, обрыв цепи, нарушение разъемов и ослабление креплений.

Интегрированная в блок управления система диагностики относится к основным электронным системам управления работой двигателя. Алгоритмы контроля тестируют входные и выходные сигналы во время штатной работы двигателя. Кроме того, вся система проверяется на ошибки и неисправности, при этом распознанные ошибки фиксируются в памяти блока управления. При диагностике автомобиля на станции технического обслуживания эти сведения считываются через последовательный интерфейс и помогают быстро распознать неисправность и произвести ремонт.

Электронный блок управления, как правило, принимает электрические сигналы от датчиков, обрабатывает их и генерирует управляющие сигналы, которые поступают на исполнительные механизмы. Программы для замкнутого контура управления заложены в память блока управления. Реализацию программ осуществляет микроконтроллер. Компоненты блока управления называются аппаратными средствами. Блоки управления содер-

жат все алгоритмы замкнутого и разомкнутого контуров управления, необходимых для реализации процессов управления двигателем (зажигания, смесеобразования, впрыска и т. д.) другими агрегатами машин.

Датчики, исполнительные механизмы и источники электропитания подключаются к блоку управления посредством многополюсного штекерного разъема. Датчики, наряду с исполнительными механизмами, образуют периферию блока управления, соединяющую между собой двигатель автомобиля и центральный процессор.

Кроме центрального процессора микроконтроллер содержит каналы входа и выхода, таймеры, модули памяти, серийные интерфейсы и другие периферийные устройства, расположенные на микрочипе. Периферийные устройства, поддерживающие работу микроконтроллера, обычно имеют возможность связи с ним. Это осуществляется посредством адресной шины и шины данных.

Электрические сигналы датчиков поступают в блок управления по кабельной разводке и штекерному разъему. Исполнительные механизмы преобразуют электрический сигнал в физические величины, например, степень открытия клапанов.

Контроль входных сигналов. Контролируются входные сигналы датчиков, соединительные провода, ведущие к блоку управления, сбои в работе датчиков, короткое замыкание на аккумуляторную батарею и на «массу», а также обрыв проводов. Пример части контролируемых параметров сигналов датчиков приведен в табл. 3.28 [38].

Таблица 3.28

Контроль основных входных сигналов

Сигнальная цепь	Контроль
Датчик положения педали газа	Контроль напряжения и диапазона сигналов
	Достоверность избыточного сигнала
	Достоверность сигнала торможения
Датчик частоты вращения коленчатого вала	Контроль диапазона сигналов
	Достоверность сигнала датчика числа оборотов распределительного вала
	Повторный контроль временных изменений (динамичная достоверность)
Датчик температуры охлаждающей жидкости	Контроль диапазона сигналов
	Логическая достоверность сигнала в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и величины подачи топлива, а также, соответственно, от нагрузки на дизель
Концевой выключатель тормозной педали	Достоверность сигнала избыточного тормозного контакта
Сигнал скорости	Повторный контроль диапазона сигналов
	Логическая достоверность сигнала в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и величины подачи топлива, а также, соответственно, от нагрузки на дизель
	Перепроверка на короткие замыкания и обрыв проводов
Исполнительный механизм рециркуляции ОГ	Регулирование рециркуляции ОГ
	Повторный контроль реакции системы на управление клапаном рециркуляции ОГ

Сигнальная цепь	Контроль
Датчик атмосферного давления	Повторный контроль диапазона сигналов
	Логическая достоверность сигнала датчика давления во впускном тракте
Напряжение аккумуляторной батареи	Повторный контроль диапазона сигналов
	Логическая достоверность сигнала в зависимости от частоты вращения коленчатого вала (в настоящее время только у бензиновых двигателей)
Датчик температуры топлива	Повторный контроль диапазона сигналов (в настоящее время только у дизелей)
Датчик давления наддува	Повторный контроль напряжения питания и диапазона сигналов
	Достоверность сигнала датчика атмосферного давления и (или) следующих (дальнейших сигналов)
Исполнительное устройство регулирования давления воздуха	Повторный контроль на короткие замыкания и обрыв проводов
	Отклонение в регулировании давления наддува
Измеритель массового расхода воздуха	Повторный контроль напряжения питания и диапазона сигналов
	Достоверность логики
Датчик температуры всасываемого воздуха	Повторный контроль диапазона сигналов
	Логическая достоверность сигнала датчика давления во впускном тракте
Датчик сигнала сцепления	Достоверность показаний скорости движения

Функционирование систем обеспечивается посредством:

- контроля подачи напряжения к датчику;
- анализа зарегистрированных данных на соответствие установленному диапазону измеряемых значений;
- проведения контроля на достоверность регистрируемых данных при наличии дополнительной информации работы узлов (например, частоты вращения коленчатого и распределительного вала);
- дублирования особенно важных датчиков, в связи с чем их сигналы могут корректироваться и сравниваться между собой (особенно датчика положения педали газа).

Контроль выходных сигналов осуществляется по работе исполнительных механизмов, а также их проводных соединений с блоком управления, исключением ошибок в работе исполнительных механизмов, дефектов соединений и коротких замыканий.

При контроле за передачей данных между блоками управления, бортовыми контроллерами связи (CAN) и блоками управления, как правило, включаются механизмы распознавания неисправностей, что позволяет проверять эту информацию перед тем, как сигналы будут сняты с чипа контроллера. Так как большинство сообщений (CAN) от каждого блока управления осуществляется через регулярные промежутки времени, то выход из строя любого из боков управления может быть обнаружен путем контроля этих временных промежутков. Избыточная информация используется для

контроля принимаемых сигналов таким же способом, каким и проверяются все входные каналы.

Контроль внутренних рабочих функций блоков управления. Контроль блоков управления осуществляется заложенными в него функциями аппаратного и программного обеспечения (отдельными компонентами внутри блока). Ряд этапов контроля поводится сразу после включения блока управления. Другие этапы контроля повторяются через регулярные интервалы времени при нормальном режиме работы автомобиля для того, чтобы выявить выход из строя любого его элемента во время эксплуатации.

Распознавание сбоев в работе. Цепь сигнала определяется дефектной (неисправной) если погрешность в показаниях сохраняется в течение определенного времени. За окончательный вид дефекта принимаются последние зафиксированные данные. Повторный контроль осуществляется с помощью специального сигнала.

Каждый сбой в работе системы в виде кода неисправности регистрируется в энергонезависимой памяти с дополнительными данными: рабочего режима и условий окружающей среды на момент сбоя в работе (например, вращение коленчатого вала, температуры); вида неисправности (например, короткое замыкание, разрыв провода), а также статус неисправности – постоянный дефект или единичный сбой в работе.

Считывание хранящихся в памяти кодов неисправностей может проводиться с помощью электронного тестера или прибора для сканирования (табл. 3.28). Связь между блоками управления и тестерами может осуществляться посредством шины бортового контроллера связи (CAN).

Таблица 3.29

Некоторые источники вносимого шума

Внешние источники	Типичные значения	Способы борьбы
Источники питания с частотой 60/50 Гц	100 пА	Экранирование, исключение паразитных контуров заземления, изолирование источников питания
Импульсные источники питания с частотой 120/100 Гц	3 мкВ	Фильтрация
Всплески напряжения на частоте 180/150 Гц от трансформаторов, работающих на частоте 60/50 Гц	065 мкВ	Переориентация компонентов
Радиостанции	1 мВ	Экранирование
Искрение при переключении	1 мВ	Фильтрация частоты 5-100 МГц, исключение паразитных контуров заземления и экранирование
Вибрации	10 пА (10-100 Гц)	Внимание к механическим соединениям, удаление проводов с большим напряжением от входных портов и датчиков
Вибрации кабеля	100 пА	Использование маложужащих кабелей
Платы (токи утечки)	0,01-10 пА ниже 10 Гц	Тщательная очистка платы, использование тефлоновых изоляторов

Сложные элементы электронных систем проверяются на достоверность создаваемых сигналов и наличие дефекта (неисправности) в электро-схеме, на их функциональные возможности по разным критериям (эмпирических данных). Соответствующие данные обычно доступны для считывания через интерфейс системы диагностики.

Индикаторная лампа неисправностей бортовой системы указывает водителю на неисправное состояние любого элемента системы.

Собственные шумы, как правило, подчиняются закону Гаусса, чего нельзя сказать о вносимых помехах, которые часто трудно описать статистическими методами. Вносимые шумы могут быть периодическими, нерегулярно повторяющимися и просто случайными. Обычно их удается существенно снизить, применяя меры борьбы с электростатическими и электромагнитными наводками от источников питания, радиостанций, механических ключей, а также с всплесками напряжения и тока, возникающими из-за процессов переключений в реактивных цепях. К таким мерам относятся: фильтрация, развязка электрических цепей, экранирование проводников и компонентов, применение ограждающих потенциалов, исключение паразитных контуров заземления, физическая переориентация проводников и компонентов, установка гасящих диодов параллельно катушкам реле и моторов, выбор как можно более низких импедансов и использование малошумящих источников питания и опорного напряжения. В табл. 3.29 приведены некоторые источники вносимых помех, их типичные значения и способы борьбы с ними.

Чаще всего электрические помехи попадают в схему через паразитные емкости, существующие практически везде. Например, человек, стоящий на диэлектрическом покрытии, и земля формируют емкость, равную приблизительно 700 пФ, а емкости между выводами разъема и между эмиттером и детектором оптрона составляют приблизительно 2 пФ. На рис. 3.98 [57] показана емкостная связь между источником электрического шума и внутренним импедансом Z датчика через переходной конденсатор C_s . Импеданс датчика может быть чисто резистивным или комбинированным, состоящим из резисторов, конденсаторов, катушек и нелинейных элементов, например, диодов. Напряжение на импедансе Z зависит от частоты шума, величины паразитной емкости C_s и импеданса Z . Например, внутренний импеданс пироэлектрического детектора можно представить в виде параллельного соединения конденсатора 30 пФ и резистора 50 ГОм. Если такой датчик через конденсатор 1 пФ присоединить к движущемуся человеку, тело которого обладает поверхностным электростатическим зарядом, может возникнуть статическое напряжение величиной до 1000 В. Если предположить, что частота движений человека составляет 1 Гц, наводка на датчике при этом будет равна 30 В, что в 3-5 раз выше величины полезного сигнала датчика, вырабатываемого в ответ на тепловое излучение от тела человека. Поскольку некоторые датчики и почти все электронные схемы имеют в своем составе нелинейные компоненты, высокочастотные наведенные сигналы, часто назы-

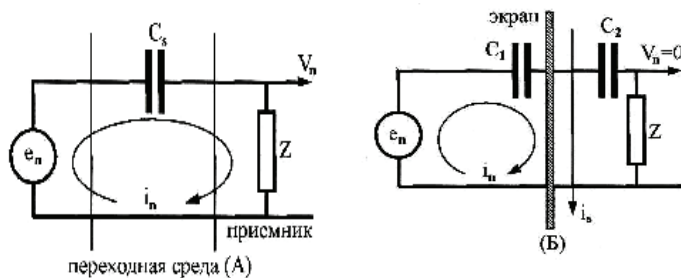


Рис. 3.98. Емкостная связь (А) и электрическое экранирование (Б)

ваемые электромагнитной интерференцией (ЭМИ), могут оказаться выпрямленными и появиться на выходе в виде постоянного или медленно меняющегося напряжения.

3.13.2. Выбор методов и контролируемых параметров

Определение номенклатуры контролируемых параметров и стратегии поиска неисправности является одной из важнейших задач, которую необходимо решить при диагностике технических систем. Очевидно, что введение дополнительных контролируемых параметров приводит с одной стороны к повышению достоверности диагностики, а с другой – к усложнению алгоритма диагностики, увеличению времени диагностирования и т. п. Уменьшение же количества контролируемых параметров приводит к прямо противоположным результатам. Кроме того, сами параметры имеют различную диагностическую ценность. Естественно при этом необходимо в первую очередь выбирать и контролировать параметры с большей диагностической ценностью, то есть параметры, содержащие больше всего диагностической информации. Поэтому возникает задача обоснованного выбора контролируемых параметров и стратегии поиска неисправности.

Существуют различные подходы к обоснованию выбора контролируемых параметров. Основными являются следующие:

- **метод, основанный на нахождении коэффициентов влияния**, предполагает выявление связи между контролируруемыми параметрами и характеристиками диагностируемой системы, определяющими ее техническое состояние. Такая связь в виде коэффициентов влияния контролируемых параметров на показатели качества системы устанавливается на математической модели или путем физического эксперимента на реальной диагностируемой системе. В качестве информационно-диагностических выбираются те контролируемые параметры, которые имеют наибольшие коэффициенты влияния;

- **метод факторного анализа** дает возможность определить статистическую связь показателей качества диагностируемой системы с ее контролируемыми параметрами. Те параметры, для которых эта связь значима, принимаются в качестве информационно-диагностических;

- **метод математического моделирования** устанавливает информационно-диагностические признаки исследуемой системы, наиболее чувствительные к изменению ее технического состояния. Математическое моде-

лирование может проводиться как на цифровых, так и на аналоговых машинах, а также на цифро-аналоговых комплексах. При этом моделируются различные отказы и режимы работы диагностируемой системы;

- **метод экспертных оценок** предполагает определение номенклатуры контролируемых параметров с привлечением специалистов в той предметной области, к которой относится диагностируемая система;

- **оптимальные методы** обеспечивают выбор контролируемых параметров и стратегии поиска неисправности в соответствии с принятым показателем оптимальности.

3.13.3. Классификация систем контроля и диагностирования

В настоящее время автоматические системы контроля и диагностики решают широкий спектр задач. К ним в первую очередь относятся:

- контроль работоспособности исследуемой системы;
- осуществление реконфигураций в системе, направленных на восстановление ее работоспособности;
- прогнозирование возможных отказов;
- прогнозирование развития отказа и его последствий и др.

Естественно предположить, что все перечисленные задачи должны по возможности решаться системой диагностики в реальном масштабе времени.

Важной характеристикой систем диагностирования является глубина диагностирования. Эта характеристика определяет уровень проводимой диагностики по иерархии технической системы. Можно осуществлять диагностирование до уровня отдельных устройств, которые образуют техническую систему, блоков и элементов. В данном подразделе приведен материал из работы [38].

К настоящему моменту создано большое число типов систем технической диагностики, которые путем выделения ряда существенных отличительных признаков могут быть классифицированы – в соответствии с рис. 3.99.

По назначению системы технической диагностики можно разделить на специализированные и универсальные. Специализированные системы предназначены для диагностики объектов одного типа, причем перечень контролируемых параметров и алгоритмов диагностики жестко задан и не может изменяться. Для реализации таких систем требуется минимум аппаратуры.

Универсальные системы диагностики предполагают возможность оценивания технического состояния различных объектов, контроля большого количества параметров и применения гибких алгоритмов.

В зависимости от задач, решаемых системой диагностики, можно выделить контролирующие, диагностирующие и прогнозирующие системы. Цель контролирующих систем заключается в оценке только работоспособности объекта диагностирования. Это самый простой вид задач, решаемых системой диагностики. Для технических систем, выполняющих жизненно важные функции, такой вид диагностики может оказаться предпочтитель-

ным, так как возможна его реализация в реальном масштабе времени и своевременное принятие мер по переходу на резервные системы. Поиск же неисправности при этом целесообразно осуществить в стационарных условиях.



Рис. 3.99. Классификация систем технической диагностики

Диагностирующие системы позволяют сделать заключение не только о работоспособности объекта диагностики, но и указать отказавшее устройство или элемент. Глубина диагностики зависит от степени детализации объекта диагностирования на отдельные устройства и элементы. Например, при потере мощности карбюраторного двигателя можно указать на неисправность системы питания, а можно и конкретизировать отказ, выявив неисправность системы смесеобразования в карбюраторе.

Система прогнозирующей диагностики позволяет сделать оценку технического состояния исследуемого объекта в будущие моменты времени на основании тенденций в изменениях контролируемых параметров.

По виду конструктивного исполнения системы диагностики могут быть автономными и встроенными. Автономные системы реализуются самостоятельно вне объекта диагностирования. Их связь с объектом осуществляется через специальные линии связи. Например, некоторые системы ракеты в режиме полета контролируются путем соответствующей обработки телеметрической информации, передающейся на землю с помощью радиосигналов. Встроенные системы диагностики являются составной частью объекта диагностирования. Вся обработка диагностической информации в таких системах осуществляется на самом объекте диагностирования. Такие системы носят еще название бортовых.

И, наконец, по форме сигналов и используемого оборудования системы диагностики можно разделить на аналоговые, аналогово-цифровые и цифровые. В тех случаях, когда диагностика осуществляется по небольшому количеству параметров, представляющих собой непрерывные функции

времени и для обработки их используются простые алгоритмы, возможно применение аналоговых систем. Их отличает высокое быстродействие и надежность. Вместе с тем точность работы таких систем сравнительно невысока. Если в системе диагностики для реализации алгоритмов диагностирования используется ЭВМ, то ее связь с датчиками, выходные сигналы которых являются, как правило, непрерывными функциями времени, осуществляется посредством аналогово-цифровых преобразователей. Такие системы диагностики являются аналогово-цифровыми. К чисто цифровым системам диагностики можно отнести либо системы с цифровым сигналом, поступающим от датчика непосредственно в ЭВМ либо системы диагностики самой ЭВМ.

Рассмотренная классификация систем диагностики не является полной. В зависимости от поставленной задачи ее можно и углубить и расширить.

Для построения системы диагностики необходимо:

- определить вид и метод диагностирования;
- установить контролируемые параметры;
- выбрать или разработать алгоритм принятия решения о состоянии системы (алгоритм классификации);
- осуществить техническую реализацию системы диагностики.

3.13.4. Виды диагностики технических систем

Существует три вида оценки работоспособности технических систем. **К первому виду** относится диагностика по состоянию отдельных элементов системы. В этом случае техническое состояние диагностируемой системы определяется в результате прямых, косвенных или совокупных измерений параметров элементов. Схема диагностирования представлена на рис. 3.100.

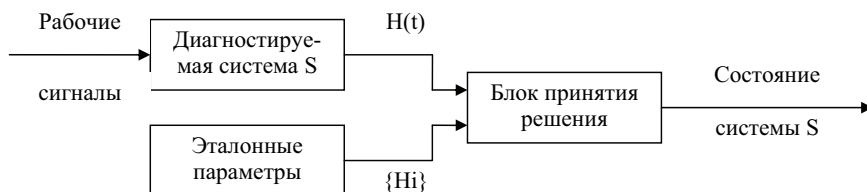


Рис. 3.100. Схема диагностирования

На этом рисунке $H(t)$ – вектор параметров, характеризующий состояние как отдельных элементов, так и системы в целом; $\{H_i\}$ – множество эталонных векторов параметров. В качестве таких параметров могут быть различные параметры электрической цепи (омическое, емкостное или индуктивное сопротивление и т. п.), температура или давление, например, в камере сгорания и т. п.

Во-вторых, диагностика может осуществляться по результатам анализа реакции исследуемой системы. Тогда, в зависимости от способа воздействия на систему диагностирование может быть:

- тестовое;
- функциональное;
- комбинированное.

При тестовом диагностировании на вход исследуемой системы (объекта диагностики) подаются специальные тестовые воздействия. Функциональная схема приведена на рис. 3.101.

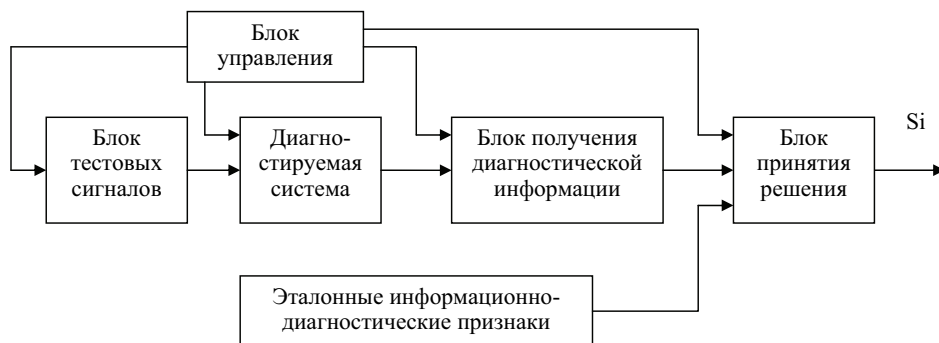


Рис. 3.101. Функциональная схема тестового диагностирования

Как следует из данной схемы, на вход диагностируемой системы подаются тестовые сигналы, а с выхода снимаются сигналы реакции, которые обрабатываются в соответствующем блоке с целью получения диагностической информации. На основе этой информации в блоке принятия решения делается вывод о принадлежности исследуемой системы к состоянию S_i . всей процедурой диагностирования управляет блок управления, который задает режимы функционирования системы, может прекратить или продолжить диагностирование, изменить вид тестовых сигналов и алгоритм принятия решения, и т. п.

Возможно проведение диагностики и без подачи на вход системы тестовых сигналов. Предполагается, что в этом случае диагностируемая система находится в режиме реального функционирования и на ее вход невозможно подавать дополнительные сигналы. Схема диагностирования приведена на рис. 3.102.

На схеме блок управления изменяет режимы функционирования диагностируемой системы, алгоритмы получения диагностической информации и принятия решения.

При комбинированном диагностировании происходит одновременная подача на вход системы как рабочих управляющих, так и тестовых сигналов. Уровень последних должен быть невелик и таковым, чтобы не вывести диагностируемую систему на нежелательные режимы работы. Схема диагностирования изображена на рис. 3.103.

В-третьих, диагностирование технических систем можно проводить путем соответствующей обработки как входных, так и выходных сигналов объектов диагностирования в соответствии со схемой рис. 3.104.

В этом виде диагностики возможны как тестовые, функциональные, так и комбинированные способы диагностики технических систем.



Рис. 3.102. Схема функционального диагностирования



Рис. 3.103. Схема комбинированного диагностирования

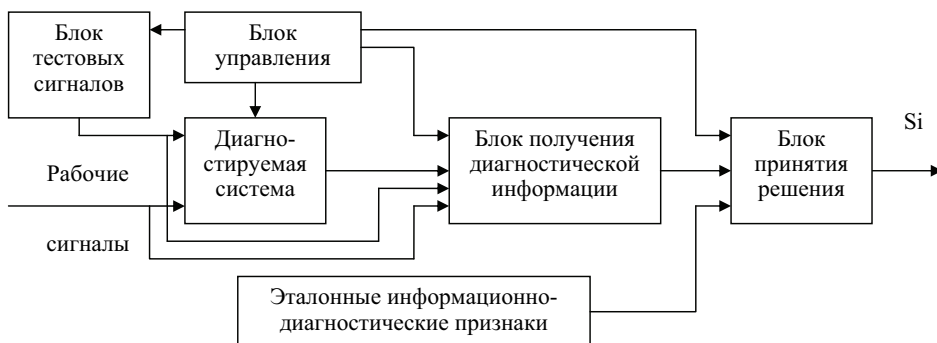


Рис. 3.104. Схема сигналов объектов диагностирования

3.13.5. Методы диагностики технических систем

Методы диагностики технических систем могут быть разделены на три класса:

- аппаратные;

- программные;
- комбинированные.

Аппаратные методы предполагают введение в диагностируемую систему дополнительного оборудования, в функции которого входит измерение контролируемых параметров, сравнение их с эталонными значениями и принятие решения о работоспособности исследуемой системы. Достоинствами аппаратных методов является их высокое быстродействие (обычно в реальном масштабе времени), а также возможность обнаружения не только отказов, но и сбоев в работе системы.

Программные методы диагностики применимы в основном для ЭВМ и систем, содержащих ЭВМ, например цифровых систем управления и их развития – информационно-управляющих систем. В этом случае в работу ЭВМ вводится программная избыточность, что связано с увеличением времени обработки информации. Дополнительной аппаратуры для технической реализации диагностирования не требуется.

Комбинированные методы включают в себя как аппаратную, так и программную диагностику. Диагностика современных цифровых информационно-управляющих систем осуществляется именно с применением комбинированных методов.

3.13.6. Аппаратные методы диагностики технических систем

Основными методами аппаратной диагностики являются [38]:

- метод допускового контроля и диагностики;
- метод сравнения с эталоном;
- метод мажоритарного контроля и диагностики;
- метод контроля и диагностики с использованием корректирующих кодов.

Метод допускового контроля и диагностики предполагает сравнение контролируемых параметров системы с границами поля допуска. Если контролируемый параметр находится в поле допуска, то элемент (система) работоспособен. Если же этот параметр вышел за границы поля допуска, то элемент (система) неработоспособен.



Рис. 3.105. Схема объекта

Объект диагностики имеет вид, схематично представленный на рис. 3.105.

Диагностика сводится к сравнению контролируемых параметров h_1, h_2, \dots, h_n с предельно допустимыми значениями h_{min} и h_{max} , то есть

$$h_{min} < h_i < h_{max} \quad i = \overline{1, n}$$

В этом случае система диагностики должна содержать дополнительные элементы памяти для запоминания поля допуска и элемент сравнения.

Схема допускового контроля может быть построена по схеме, показанной на рис. 3.106.

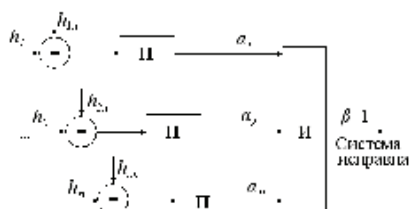


Рис. 3.106. Схема допускового контроля

На схеме

$$h_n = \frac{h_{\min} + h_{\max}}{3}, \quad (3.46)$$

номинальные значения контролируемых параметров: α_i – логические переменные (0 или 1), являющиеся выходами пороговых элементов «П», порог срабатывания которых

$$\Delta h_{i_n} = \frac{h_{\min} - h_{\max}}{2}.$$

Сигнал β на выходе логического элемента «И» определяется уравнением

$$\beta = \alpha_1 \cap \alpha_2 \cap \dots \cap \alpha_n \quad (3.47)$$

и равен 1 тогда, когда все $\alpha_i = 1$, $i = \overline{1, n}$. В этом случае все контролируемые параметры принадлежат своим полям допусков и диагностируемая система исправна.

Если хотя бы один из контролируемых параметров выходит из своего поля допуска, то соответствующая логическая переменная $\alpha = 0$, тогда $\beta = 0$, что говорит о неработоспособности системы.

Этот метод применим для диагностики как цифровых, так и аналоговых систем. Разница лишь в том, что в случае действия аналоговых сигналов в диагностируемой системе номинальные значения контролируемых параметров и пороги срабатывания задаются также в аналоговом виде в форме опорных напряжений (уставок).

В случае же диагностики цифровых устройств этот метод называют методом анализа логических состояний. Номинальные значения контролируемых параметров и пороги срабатывания здесь будут соответствовать некоторым разрешенным и запрещенным кодовым комбинациям. То есть в этом случае говорят не о поле допуска и выходе за него, а о разрешенных и запрещенных кодовых комбинациях.

Для того, чтобы отличить отказ от сбоя, в систему допускового контроля и диагностики должна быть введена временная задержка. В этом случае система диагностики не реагирует на сбои, которые, как правило, являются кратковременными.

В системах допускового контроля и диагностики могут применяться статистические процедуры принятия решения о нахождении контролируемых параметров в поле допуска. Такие процедуры рассмотрены в подразделе 3.6.7.

Метод сравнения с эталоном основан на сравнении реакций на тестовые сигналы диагностируемой и эталонной систем. Схема диагностирования представлена на рис. 3.107.

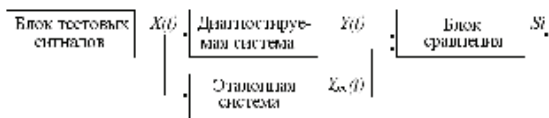


Рис. 3.107. Схема сравнения с эталоном

При технической реализации этого метода основная проблема заключается в создании эталонной системы. В принципе, в качестве таковой может выступать система, аналогичная диагностируемой, факт работоспособности которой установлен заранее.

Обычно в качестве эталонной рассматривается некоторая упрощенная система. В этом случае эталонная система представляет собой некую имитационную модель, приближенно воспроизводящую характеристики исследуемой системы и ее выходные сигналы.

Условие работоспособности диагностируемой системы имеет вид [38]:

$$|Y(t) - Y_m(t)| \leq \Delta. \quad (3.48)$$

В этом выражении $Y(t)$ – реакция диагностируемой системы; $Y_m(t)$ – реакция эталонной системы; Δ – допустимая величина рассогласования. Если указанное условие не выполняется, то это говорит об отказе или сбое в диагностируемой системе, так как эталонная система является более простой и следовательно более надежной.

Подача тестовых сигналов на входы диагностируемой и эталонной систем не является обязательной. В этом случае диагностируемая система функционирует в своем рабочем режиме, а эталонная система будет находиться в горячем резерве. При отказе диагностируемой системы ее функции может взять на себя эталонная система, однако с некоторой потерей качества.

Метод мажоритарного контроля и диагностики иначе можно назвать методом «голосования». Этот метод применяется в мажоритарно резервированных системах, содержащих нечетное количество (обычно три) одинаковых устройств, выполняющих одни и те же информационные функции. Схема метода мажоритарного контроля и диагностики представлена на рис. 3.108.

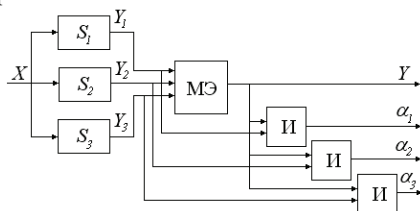


Рис. 3.108. Схема контроля на четность

стируемых систем S_i , сигналы совпадают. Логические схемы «И» сопоставляют сигнал с выхода мажоритарного элемента и сигналы с выходов диагностируемых систем S_i , $i=1, 2, 3$. Отсутствие сигнала на одной из логиче-

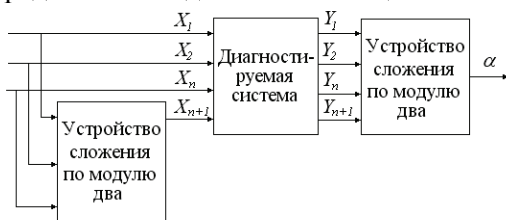
На схеме S_1 , S_2 и S_3 – идентичные системы, которые необходимо диагностировать. МЭ - мажоритарный элемент, работающий по принципу «голосования» (по принципу большинства поступающих на него сигналов). На выходе мажоритарного элемента сигнал появляется лишь в том случае, если на выходах большинства диагностируемых систем

ских схем «И» говорит об отказе соответствующей системы S . Отказ мажоритарного элемента приводит к обнулению всех элементов «И».

Данный метод применим в основном для контроля и диагностики цифровых систем, когда на выходе S_i имеют место некоторые кодовые комбинации и происходит сравнение каждого элемента такой комбинации. Однако, возможно применение метода и для аналоговых систем.

Метод контроля и диагностики с использованием корректирующих кодов применяется для оценки работоспособности цифровых систем передачи, обработки и хранения информации. Метод связан с введением информационной избыточности, которая используется как для обнаружения, так и для исправления ошибок в передаваемой, обрабатываемой или хранящейся информации. Находят применение различные корректирующие коды, простейшим из которых является код с контролем на четность, код Хэмминга и др.

На рис. 3.109 представлена схема реализации контроля на четность передаваемой кодовой комбинации.



Предположим, что объектом диагностирования является либо линия цифровой связи, либо устройство хранения информации. Передается n -разрядный двоичный код X_1, X_2, \dots, X_n .

Рис. 3.109. Схема контроля на четность

На входе диагностируемой

системы происходит сложение передаваемого двоичного кода по модулю два. Причем, к этому n -разрядному двоичному коду добавляется еще один $(n+1)$ -й двоичный разряд X_{n+1} (проверочный разряд), который равен единице, если сумма первых n разрядов передаваемого двоичного кода по модулю два равна нулю и равен нулю, если сумма равна единице.

На выходе диагностируемой системы $(n+1)$ -разрядный двоичный код также складывается по модулю два. Если сигнал $\alpha=1$, то число единиц в принятом двоичном коде является нечетным и, следовательно, n -разрядный двоичный код передан без ошибок. При этом предполагается, что поток ошибок является ординарным, то есть одновременное появление двух и более ошибок является маловероятным.

Если же сигнал $\alpha=0$, то число единиц в принятом коде четно, а это говорит об ошибке при передаче информации. Корректирующий код Хэмминга используют для обнаружения и исправления одиночных ошибок. Схема технического устройства, реализующего код Хэмминга, изображена на рис. 3.110. В этом случае также вводится избыточность, путем добавления к передаваемому двоичному коду некоторого количества проверочных разрядов.

В кодовую комбинацию, поступающую на диагностируемую систему, помимо разрядов, несущих информацию X_1, X_2, X_3 включаются проверочные разряды X_{n1}, X_{n2}, X_{n3} , обычно занимающие 1, 2, 4, 8-ю и т. д. позиции в передаваемой кодовой комбинации $X_{n1}, X_{n2}, X_1, X_{n3}, X_2, X_3$. Содержимое прове-

рочных разрядов определяется путем сложения по модулю два соответствующих информационных разрядов:

$$X_{n1}=X_1 \oplus X_2; \quad X_{n2}=X_1 \oplus X_3; \quad X_{n3}=X_2 \oplus X_3 \quad (6.49)$$

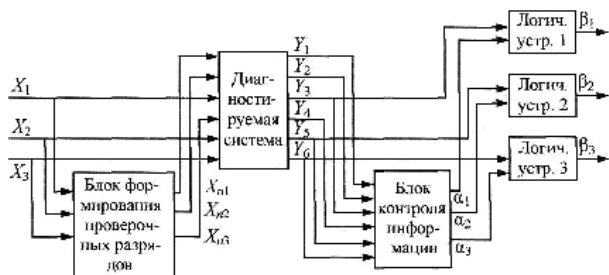


Рис. 3.110. Схема реализации кода Хэмминга

где \oplus - знак операции сложения по модулю два. Число проверочных разрядов k в передаваемой кодовой комбинации должно удовлетворять соотношению

$$2^k \geq n+k+1$$

где n – количество информационных разрядов. Кодовая комбинация на выходе диагностируемой системы анализируется в блоке контроля информации. Такой анализ заключается в последовательной обработке k групп символов из всех $n+k$ разрядов. Сигнал $\alpha_1=1$, если сумма разрядов Y_1 и Y_3 по модулю два равна единице, что говорит об отсутствии ошибки в 1-м разряде передаваемой кодовой комбинации. Если сигнал $\alpha_1=0$, то сумма соответствующих разрядов по модулю два равна нулю и в кодовой комбинации присутствует ошибка. Для сигналов α_2 и α_3 справедливы выражения

$$\alpha_2=Y_2 \oplus Y_5; \quad \alpha_3=Y_4 \oplus Y_6. \quad (3.50)$$

Передаваемая информация принята без искажения если справедливо условие

$$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=1.$$

В этом случае все разряды в передаваемой и принятой кодовых комбинациях совпадают. Исправление ошибок осуществляется в логических устройствах в соответствии со следующими уравнениями:

$$\beta_1 = Y_3 \oplus \bar{\alpha}_1 \quad \beta_2 = Y_5 \oplus \bar{\alpha}_2 \quad \beta_3 = Y_6 \oplus \bar{\alpha}_3 \quad (6.51)$$

Так, например, если $\alpha_2=0$; $\bar{\alpha}_2=1$, что говорит об ошибке во втором информационном разряде, то $\beta_2=1$ и искаженное значение Y_5 заменяется на исправленное. В случае отсутствия ошибки, то есть при $\alpha_2=1$ и $\beta_2=0$ соответствующее значение информационного разряда остается без изменений.

Контрольные вопросы

1. Привести типовые неисправности электрических и электронных систем двигателя.
2. Как контролируют входные сигналы датчиков?
3. Как контролируют выходные сигналы систем управления исполнительными механизмами?

4. Как распознать сбои в работе блоков управления?
5. Какие бывают источники внешних шумов в системе измерения параметров?
6. Какие существуют подходы к обоснованию выбора контролируемых параметров?
7. Дать классификацию существующих систем автоматического контроля и диагностики.
8. Какая важнейшая характеристика системы диагностирования?
9. Какие существуют виды оценки работоспособности технических систем?
10. Рассказать об аппаратных, программных и комбинированных методах диагностирования технических систем.
11. Для каких систем оценки работоспособности применяются методы контроля и диагностики с использованием корректирующих кодов?

Литература

1. Вахламов В. К. Автомобили: Основы конструкции [Текст]: учебник / В. К. Вахламов. – 3-е изд. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 528 с.
2. Системы управления дизельным двигателем. [Текст] / Пер. с нем. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.
3. Система контроля отработавших газов [Текст]: учеб. пособие. Т. 4. TOYOTA MOTOR CORPORATION, 2001. – 84 с.
4. Тюнин А. А. Диагностика электронных систем управления двигателями легковых автомобилей [Текст]: практ. пособие / А. А. Тюнин. – М.: Ремонт и сервис 21: Солон-Пресс, 2007. – 350 с.
5. Пойда А. М. Технічна експлуатація автомобілів з мікропроцесорними системами керування [Текст]: лабор. практикум / А. М. Пойда. – Х.: ХНАДУ, - 2012. – 172 с.
6. Мигаль В. Д. Техническая диагностика автомобилей [Текст]: справ. пособие в 6 т. Т. 5. Средства диагностирования (книга 2) / В. Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2012. – 460 с.
7. Мигаль В. Д. Средства информационных систем автомобиля [Текст]: справ. пособие / В. Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2012. – 444 с.
8. Зенкін Є. Ю. Розробка методу прискореного діагностування автомобільних дизелів з акумуляторними системами паливоподачі [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Є. Ю. Зенкін. – Х.: ХНАДУ, 2010. – 180 с.
9. Губертус Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей. [Текст] / Гюнтер Губертус: пер. с нем. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 176 с.
10. Борщенко Я. А. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей [Текст]: учеб. пособие / Я. А. Борщенко, В. И. Васильев. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2007. – 207 с.
11. Ерохов В. И. Системы впрыска бензиновых двигателей. Конструкция, расчет, диагностика [Текст] : учебник / В. И. Ерохов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 551 с.
12. Смирнов Ю. А. Электронные и микропроцессорные системы управления автомобилем [Текст]: учеб. пособие / Ю. А. Смирнов, А. В. Муханов. – СПб: Лань, 2012. – 612 с.
13. Электронный впрыск топлива [Текст]: учеб. пособие. Т. 5. ТОАМ – «Техническое обучение автомобильному мастерству». Этап 2. – TOYOTA SERVICE TRAINING, 2005. – 121 с.
14. Мигаль В. Д. Техническая диагностика автомобилей [Текст]: справ. пособие в 6 т. Т. 3. Методы диагностирования / В. Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2012. – 548 с.
15. Мигаль В. Д. Техническая диагностика автомобилей [Текст]: учеб. пособие / В. Д. Мигаль, В. П. Мигаль. – М.: ИД «ФОРУМ»-ИНФРА-М, 2014. – 416 с.
16. Мигаль В. Д. Теорія і методи наукової творчості [Текст]: навч. посібник / В. Д. Мигаль. – Х.: ВД «ІНЖЕК», 2007. – 424 с.

17. Мигаль В. Д. Організація, методи та викладання результатів наукових досліджень [Текст]: навч.-методичний посібник / В. Д. Мигаль. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 276 с.
18. Рыжиков Ю. И. Работа над диссертацией по техническим наукам [Текст] / Ю. И. . – СПб: БХВ-Петербург, 2007. – 512 с.
19. Дубровин В. И. Интеллектуальные средства диагностирования и прогнозирования надежности авиадвигателей [Текст]: монография / В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуславов, В. К. Яценко. – Запорожье: ОАО «Мотор-Січ», 2003. – 279 с.
20. Мигаль В. Д. Технічна кібернетика транспорту [Текст]: навч. посібник / В. Д. Мигаль. – Х.: ВД «ІНЖЕК», 2007. – 328 с.
21. Тоценко В. Г. Экспертні системи діагностування і підтримки рішень [Текст] / В. Г. Тоценко. – К.: Наукова думка, 2004. – 126 с.
22. Лукинский В. С. Логика автомобильного транспорта [Текст] / В. С. Лукинский. – М.: Машиностроение, 2000. – 305 с.
23. Кузнецов Е. С. Управление техническими системами [Текст]: учеб. пособие / Е. С. Кузнецов. – М.: МАДИ (ТУ), 2001. – 262 с.
24. Бажинов О. В. Надійність автомобільних поїздів [Текст]: монографія / О. В. Бажинов, О. К. Кравченко. – Луганськ: Ноулідж, 2009. – 412 с.
25. Беляков В. В. Многокритериальная оптимизация в задачах оценки подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностирование сложных технических систем [Текст] / В. В. Беляков, М. Е. Бушуева, В. И. Сагунов. – Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2001. – 271 с.
26. Говорущенко Н. Я. Техническая кибернетика транспорта [Текст]: учеб. пособие / Н. Я. Говорущенко, В. Н. Варфоломеев. – Х.: ХГАДТУ, 2001. – 271 с.
27. Харазов А. М. Методы оптимизации в технической диагностике машин [Текст] / А. М. Харазов, С. Ф. Ивид. – М.: Машиностроение, 1983. – 132 с.
28. Сергеев А. Г. Методологическое обеспечение эксплуатации технических систем [Текст]: учеб. пособие / А. Г. Сергеев. – М.: Изд-во МГОУ, 1994. – 488 с.
29. Антропов Б. С. Диагностирование автотракторных средств [Текст] / Б. С. Антропов. – Ярославль: Ярославский гос. техн. ун-т, 2002. – 54 с.
30. Ярославцев Ю. А. Диагностирование износного состояния энергетических установок по результатам анализа масла [Текст] / Ю. А. Ярославцев, К. Х. Гильфанов. – Казань: Казанский гос. энерг. ун-т, 2006. – 76 с.
31. Холмаков В. М. Диагностика и восстановление моторного масла [Текст] / В. М. Холмаков. – Ульяновск: Изд-во Ульяновской ГСХА, 2006. – 210 с.
32. Наглюк І. С. Концепція оцінки властивостей моторної та трансмісійної оливи транспортних машин за енергетичними параметрами [Текст]: дис. доктора техн. наук: 05.22.20 / І. С. Наглюк. – Х.: ХНАДУ, 2013. – 295 с.
33. Шпаченко А. П. Инфракрасная Фурье-спектроскопия как метод анализа нефтепродуктов, топлива, смазочных масел и присадок [Текст] / Сб.

трудов междун. научно-техн. конференции // СПб: Академия прикладных исследований, 2004. – С. 190-193.

34. Корнев С. В. О работоспособности моторных масел [Текст] / С. В. Корнев // Двигателестроение. - № 5. – 2004. – С. 36-38.

35. Григоров А. Б. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации [Текст] / А. Б. Григоров, П. В. Корножинский, И. С. Наглюк // Автомобильный транспорт. – Вып. 20. – Х.: Изд-во ХНАДУ, 2007. – С. 95-97.

36. Григоров А. Б. Корреляционная зависимость между показателями качества масла и приращением его диэлектрической проницаемости при эксплуатации в автобусах «Богдан А091» [Текст] / А. Б. Григоров, И. С. Наглюк, П. В. Корножинский // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. - № 7 (125). – Луганськ, Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – С. 99-102.

37. Балтинас Р. К. Моторні оливи. Класифікація. Застосування [Текст] / Р. К. Балтинас. - СПб: Альфа-Лаб, 2000. – 146 с.

38. Ивченко В. Д. Диагностика технических систем [Текст]: учеб. пособие / В. Д. Ивченко. М.: Изд-во МГАПИ, 1998. – 206 с.

39. Попков В. И. Виброакустическая диагностика в судостроении [Текст]: 2-е изд., перераб. и доп. / В. И. Попков, Э. Л. Мишинский, О. Н. Попков. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.

40. Мигаль В. Д. Методи нормування експлуатаційної вібрації та класів якісного оцінювання технічного стану трактора [Текст] / В. Д. Мигаль // Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільського госп. Вип. 8. Збірник наук праць «Підвищення надійності відновлених деталей машин». – Х.: ХДТУСГ, 2001. – С. 280-285.

41. Мигаль В. Д. Определение мест и контрольных точек вибрационного диагностирования машин [Текст] / В. Д. Мигаль // Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільського господарства Вип. 24. – Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – Х.: ХДТУСГ, 2004. – С. 323-331.

42. Мигаль В. Д. Основи технічної діагностики автомобілів. Апаратні засоби вібраційного діагностування [Текст]: навч.-методичний посібник / В. Д. Мигаль, І. А. Мармут. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 124 с.

43. Мартин Анжело. Мониторизация механических колебаний машинного оборудования [Текст] / Анжело Мартин // Технический обзор. - № 1. Брюль и Кьер, Нэрум, Дания. – 1987. – 15 с.

44. Генкин М. Д. Виброакустическая диагностика машин [Текст] / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

45. Шавелин В. М. Акустический контроль узлов трения РЭУ [Текст] / В. М. Шавелин, Г. А. Сарычев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.

46. Оле Дэссинг. Испытание конструкций. Часть 1. Измерение механической подвижности [Текст] / Дэссинг Оле. – Брюль и Кьер, Нэрум, Дания. – 1989. – 46 с.

47. РД 50-644-87. Методические указания: Вибрация. Комплекс нормативно-технической и методической документации. Основные положения. – Введ. 01.01.89. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 6 с.

48. РД 50-638-87. Методические указания: Вибрация. Порядок разработки и правила нормирования вибрации машин и оборудования. – Введ. 01.01.89. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 16 с.

49. Папуша А. И. Собственные колебания одно- и многослойных цилиндрических втулок ДВС [Текст] / А. И. Папуша, А. И. Пригунов // Двигателестроение. - № 9. – 1990. – С. 9-12.

50. Баширов З. А. Вибрационный анализ конструктивных элементов [Текст]: монография / З. А. Баширов, П. В. Купершмидт, А. Л. Овчинников. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2002. – 103 с.

51. Мигаль В. Д. Вибрация и повышение качества проектируемых тракторов [Текст] / В. Д. Мигаль // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - № 7. – 2000. – С. 36-38.

52. Мигаль В. Д. Снижение уровней вибрации и повышение ресурса подшипниковых узлов качения трактора рациональным конструированием [Текст] / В. Д. Мигаль // Вестник машиностроения. - № 3. – 2001. – С. 8-11.

53. Мигаль В. Д. Вибрационные принципы доводки машин до заданного ресурса [Текст] / В. Д. Мигаль // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. - № 7 (77), част. 1. – Луганськ, Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2004. – С. 186-192.

54. Бершадский С. А. Снижение вибрации и шума поршневых компрессоров. - Л.: Судостроение, 1990. – 262 с.

55. Жук Н. В. Трактор МТЗ-82: виброактивность основных узлов трансмиссии [Текст] / Н. В. Жук, А. С. Скороходов, Н. А. Частный, П. А. Стецько, В. А. Семенов, А. В. Воробьев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - № 3. – 1995. – С. 17-21.

56. Колесников А. Е. Шум и вибрация [Текст] / А. Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1988. – 246 с.

57. Фрейден Д. Современные датчики [Текст]: справочник / Д. Фрейден. – М.: Техносфера, 2006. – 520 с.

58. Гребенников А. С. Диагностирование автотракторных двигателей динамическими методами [Текст] / А. С. Гребенников. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002. – 196 с.

59. Мигаль В. Д. Вибродиагностика машин при эксплуатации [Текст] / В. Д. Мигаль. Х.: ХГПУ, 1997. – 293 с.

60. Мигаль В. Д. Вибродиагностика при проектировании и изготовлении машин [Текст] / В. Д. Мигаль. Х.: ХГПУ, 1996. – 244 с.

61. Мигаль В. Д. Техническая диагностика автомобилей [Текст]: справ. пособие в 6 т. Т. 4. Средства диагностирования (Книга 1) / В. Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2012. – 596 с.

62. ОСТ.23.3.23-88 ССБТ. Дизели тракторные и комбайновые. Предельные значения шумовых и вибрационных методов определения. Отраслевой стандарт. Срок действия с 01.01.90 до 01.01.95. – 47 с.

63. Мигаль В. Д., Животовський М. А., Федорова Л. Н. Вібраційне діагностування турбокомпресорів двигуна [Текст] / В. Д. Мигаль, М. А. Животовський, Л. Н. Федорова // Техніка АПК. - № 1, 1996. – С. 20-21.

64. Мигаль В. Д. Вибрация и надежность транспортных машин [Текст] / В. Д. Мигаль, В. М. Мищенко, В. П. Волков, С. А. Гаврилов, А. В. Мищенко: под ред. В. Д. Мигалья. – Х.: Изд-во ХНАДУ, 2007. – 384 с.

Предметный указатель

- автоконтроль** 323, 324, 325
акселерометр 191, 394, 398, 411, 413
алгоритм(ы) 47, 98, 117, 119, 122, 130, 132, 139, 149, 158, 169, 179, 198, 201, 210, 212, 220, 224, 230, 235, 236, 237, 239, 290, 322, 324, 327, 330, 331, 332, 333, 373, 397, 409, 429, 430, 434, 435, 437, 438
алгоритмизация 194, 203, 218
амплитудно-временной анализ 120, 196, 372, 374
амплитудно-частотные характеристики 392, 403, 409, 410, 419
атомно-абсорбционный метод 283
атомно-резонансное поглощение 283, 284
АЭ-система 387
биспектр 374, 381
вакуумметр 213
вентиляция:
 - топливного бака 44, 45, 51, 136, 137, 141
 - картера 211, 273, 289**верхняя мертвая точка (ВМТ)** 13, 14, 26, 27, 29, 31, 68, 72, 95, 131, 350, 420, 421
вибратор 396, 398, 404, 409, 414
виброанализатор 257, 350, 352, 356, 358, 362, 364, 371, 377, 400, 401, 405
вибрация 18, 25, 60, 183, 196, 209, 211, 245, 246, 257, 263, 318, 345, 346, 348, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 403, 404, 405, 406, 407, 409, 410, 411, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 432
виброметр 358, 360, 385, 386, 401
вибропреобразователь 362, 381, 407, 408, 427
вибростенд 394, 398, 399, 401, 402, 404, 405, 423
влагомер 280
впрыск(ивание):
 - Common Rail 38, 72, 73, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 97, 99, 102, 107, 108, 171, 179, 183
 - UIS 82, 104, 105, 106
 - UIS P1 106
 - UPS 82
 - во впускной тракт 47, 49, 51, 53, 65, 126, 127, 139, 140, 146, 147, 148, 156
 - гомогенный 66, 137, 158
 - двухгрупповой 163
 - двухфазный 71, 72, 177
 - индивидуальный 160
 - многократный 107
 - многоступенчатый 89, 183
 - независимый 163
 - непосредственный 21, 47, 53, 54, 57, 58, 65, 70, 72, 76, 77, 78, 126, 137, 139, 140, 141, 146, 147, 148, 149, 155, 156, 157, 158, 171, 174, 175, 176, 183
 - основной 162
 - одновременный 43, 53, 56, 128, 130, 162
 - односточный 126, 134
 - попарно-параллельный 53
 - последовательный (фазированный) 43, 52, 53, 56, 59, 128, 133, 135, 155
 - послыйный (FSI) 147, 148, 158, 169
 - предварительный 30, 77, 89, 94, 97, 103, 106, 175, 177
 - распределенный 39, 43, 47, 51, 52, 53, 56, 64, 77, 79, 126, 128, 133, 134, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 155
 - с внешним смесеобразованием 133, 134, 146
 - с внутренним смесеобразованием 133, 146
 - с программным управлением 144
 - центральный 43, 47, 48, 56, 64, 69, 111, 126, 128, 143, 144, 145, 159, 160
 - электронный 133, 135, 155, 161, 162, 179, 188**газоанализ** 44
газоанализатор 195, 298
газораспределительный механизм (ГРМ) 18, 19, 27, 28, 29, 30, 193, 246, 248, 258, 264, 268, 273, 275, 350, 352, 354, 366, 373, 374, 385, 421
герметичность 20, 44, 50, 185, 211, 225, 226, 232, 239, 254, 268, 282, 339, 341, 342
гидравлический топливный аккумулятор 48, 49, 50, 51, 57, 61, 62, 64, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 108, 138, 140, 141, 142, 146, 147, 148, 157, 158, 159, 170, 173, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 188, 196, 197, 226, 240, 374

гидротестер 340**датчик:**

- вибрации 394, 427
- ВМТ 95, 131
- воды 91
- давления 23, 24, 38, 39, 44, 48, 50, 51, 61, 62, 63, 80, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 98, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 147, 148, 157, 158, 159, 170, 180, 181, 182, 185, 186, 187, 188, 279, 287, 431
- давления наддува 23, 24, 95, 173, 174, 176, 189
- движения иглы распылителя форсунки 95, 174, 176
- детонации 136, 137, 138, 154, 157
- индуктивный 17, 78, 90, 113, 118, 152
- кислорода (лямбда-зонд) 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 51, 130, 131, 132, 134, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 157, 167, 168, 169, 187
- массового расхода воздуха 35, 36, 38, 78, 86, 90, 106, 131, 133, 138, 139, 143, 159, 166, 174, 176
- оборотов 17, 51, 141, 189, 376, 430
- обратной связи 73
- положения дроссельной заслонки 39, 40, 62, 63, 130, 131, 133, 135, 138, 156, 159, 160, 166, 173, 176, 179
- положения педали акселератора 67, 78, 86, 90, 95, 106, 115, 136, 137, 156, 173, 174, 186, 188, 190, 430, 431
- разрежения 39
- силы 398, 404, 405
- скорости 51, 135, 173, 174, 176, 186, 188
- температуры 23, 24, 34, 35, 37, 38, 40, 42, 45, 51, 78, 85, 88, 89, 90, 95, 106, 133, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 157, 166, 167, 172, 173, 174, 176, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 320, 341, 430, 431
- угла поворота вала ТНВД 78, 95
- уровня топлива 93, 95, 187
- ускорений кузова 136, 137
- ускорения 371, 404
- фазы (угла поворота) 17, 29, 38, 51, 86, 131, 135, 136, 137, 138, 141, 157, 180, 186, 189
- Холла 17, 28, 77, 90, 94, 112, 152, 154
- частоты вращения коленчатого вала 42, 45, 78, 135, 136, 137, 157, 173, 174, 176, 180, 183, 186, 190, 341, 430

динамическая:

- вязкость 303

- деформация 409

- жесткость 344, 396

- модель 213, 394

- надежность 395, 396

- неуравновешенность 372

- перестройка 388

- податливость 396

динамические:

- исследования 403

- нагрузки 350

- параметры 357

- показатели 185

- процессы 345, 381

- свойства 356, 379, 392, 395, 398, 401, 411, 414, 415, 416

- силы 351, 379, 394, 398, 420, 421, 424

- системы 397

- характеристики 196, 351, 371, 379, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 399, 400, 401, 403, 406, 409, 411, 414, 418, 421

динамический:

- диапазон 381, 409

- диапазон работы (ДДР) 54, 55, 56

- режим 343, 345

- ряд 217

динамическое:

- поведение 397

- состояние 196, 299, 354, 355

диэлектрическая проницаемость 196, 278, 279, 280, 306, 307

дымность 183, 184, 194, 240, 243, 256, 257

зазор(ы) 17, 18, 19, 25, 28, 29, 32, 52, 97, 153, 212, 226, 246, 256, 262, 263, 264, 268, 316, 317, 318, 320, 321, 339, 346, 350, 352, 355, 363, 371, 373, 392, 393, 400, 416, 417, 421, 425, 428

закоксование 26, 30

иммобилайзер (EWS) 51, 114, 115, 138, 141, 151, 178

индикаторные показатели:

- КПД 14, 16, 196, 298, 348

- мощность 14, 15, 196

- среднее давление 14, 268, 298

- удельный расход топлива 14, 196

кепстр 376, 377, 378, 381

кепстральный анализ 196, 364, 372, 376, 378

кепстральная функция 377

кинематическая вязкость 195, 279, 300, 301, 303, 304

компрессия 18, 404

компрессометр 213

компьютер 82, 115, 150, 151, 256, 333, 334, 388

контроль:

- бортовой 260
- вибрации 358, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 373, 384

- визуально-оптический 194, 195, 212, 257, 258

- давления топлива 49, 98

- дроссельной заслонки 156

- жидкостей 197, 347

- износа 195, 232, 258, 259

- качества масла 194, 195, 212, 257, 267, 275, 278, 285, 294, 302, 306, 308

- качества топлива 278, 279

- на четность 442, 443

- перегрева 194

- пробуксовки колес 239

- системы зажигания 243

- системы смазки 212

- состава ОГ 46, 112, 139

- состава смеси 113, 195

- состояния нейтрализатора 47, 169

- температуры 320

- тепловой 252, 259

- электрических и электронных систем 197, 429

коррекция:

- впрыска 163, 165, 167

- напряжения 168

- подачи топлива 46, 56, 169, 173

- программы 334

- топливно-воздушной смеси 47, 132, 168, 169

коэффициент(ы):

- вариации 381, 384, 385

- вязкости 310

- глубины модуляции 369

- демпфирования 395

- диагностический 289, 290

- динамичности 264, 396

- долговечности 310

- избытка воздуха 20, 40, 41, 43, 45, 46, 47, 92, 132, 133, 135, 155

- интенсификации изнашивания 316

- качества масла 303, 305, 308, 309, 310, 311

- концентрации ионов водорода 310

- коррекции впрыскиваемого топлива 167

- корреляции 244, 245, 248

- коррозионной агрессивности 310

- массообмена 290

- мультипликации 108

- наполнения 148

- поглощения 257

- пропорциональности 286

- пропуска пыли 282

- светопропускаемости 310

- содержания железа 310

- температурный 37

- технической готовности 263

- трения 314

- усиления 286

- эксцесса 380, 381

кривошипно-шатунный механизм

(КШМ) 18, 30, 193, 196, 246, 248, 258, 260, 264, 268, 273, 275, 284, 319, 352, 366, 374, 424

круиз-контроль 155, 156, 178, 188, 189

манометр 33, 213, 242, 298, 339, 341

методы диагностирования:

- автоматизированные 322

- акустические 194, 195, 187, 232, 260, 339, 341, 342, 366

- акустической эмиссии 196, 372, 385, 387, 388, 389,

- амплитудно-фазовых характеристик 196, 197, 232, 339, 344

- виброакустические 195, 196, 197, 225, 232, 240, 259, 339, 345, 346, 350, 352, 381

- волновой 341, 344

- временной 230, 343, 344, 345, 346

- газоаналитические 195, 232

- гидрогазоаэродинамические 196

- дисперсный анализ 299, 300

- индикации инородных примесей 197, 342, 347

- инструментальные 193, 209, 212, 215, 224, 227, 228, 235, 276

- интеллектуальные 193, 197, 198, 228

- калориметрический 262, 282

- кинематический 197, 232, 339, 343

- контроль жидкостей 197, 226, 230, 347

- контроль износа 195, 232, 258, 259, 262

- контроль электрических и электронных систем 194, 197, 230, 232, 235, 429

- контроля состава (качества) масла 18, 194, 195, 226, 245, 257, 259, 262, 267, 284, 285, 287, 289, 308

- КШМ 18

- неразрушающий контроль 194, 211, 232, 255

- нормированных параметров 344, 345, 348
- опорных спектров-масок 385, 389, 390
- оптические 194, 213, 232, 252, 254, 255, 256, 257
- пик-фактора 196, 368, 372, 385, 386
- по геометрическим параметрам 226
- по параметрам вибрации 372
- по параметрам колебательных процессов 225
- по параметрам масла 285, 287, 289
- по параметрам отработавших газов 298
- по параметрам рабочей жидкости 347
- по параметрам рабочих процессов 224
- по параметрам системы охлаждения 298
- по параметрам смазочной системы 298
- по параметрам сопутствующих процессов 225
- по спектрам вибросигнала 365, 366
- по спектрам огибающих 366
- податливости конструкций 406, 421
- программно-логические 232, 322
- радиоактивный 231, 259, 262, 282, 301
- распознавание 17, 94, 168, 194, 197, 198, 203, 218, 243, 244, 249, 251, 344, 352, 357, 363, 397, 410, 429, 431, 432
- резонансный 306
- рентгенографический 195, 262, 283
- силовой 342, 343, 344
- собственных частот вибрации 406, 415
- спектрального анализа 232, 256, 281, 289, 290, 291, 342
- теоретические 193, 198, 199, 201, 203
- тепловые 194, 195, 197, 225, 232, 239, 252, 253, 259, 341, 346
- трибодиагностика 195, 260, 261
- физико-химические 195, 224, 226, 260, 262, 275, 298, 300, 311
- физические 60, 150, 195, 224, 226, 227, 228, 230, 252, 260, 298, 330
- форм деформации резонансов 406
- эвристические 193, 198, 202, 203, 215, 216, 218, 235
- электрооптический 260
- эмпирические 193, 204, 222, 223, 224, 243, 295

- энергетические 196, 348
- эталонных зависимостей 225, 230, 238, 242, 243, 344, 345, 440
- микро-ЭВМ** 120, 122, 207, 327, 333, 335
- микроконтроллер** 121, 122, 123, 124, 148, 160, 161, 177, 180, 181, 182, 429, 430
- микроскоп** 211, 213, 252, 255, 257, 260, 300, 347
- микрофон** 211, 213, 252, 427
- насос-форсунка(ки)** 24, 31, 32, 72, 73, 82, 83, 93, 98, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 146, 177, 184
- негерметичность** 284, 289, 342
- нейтрализатор** 40, 42, 47, 131, 132, 138, 140, 148, 157, 169, 177, 187
- нижняя мертвая точка (НМТ)** 13, 14, 31, 26, 27
- нутромер** 213
- обогащение** 20, 40, 148, 167, 169, 185
- октанометр** 280
- отработавшие газы (ОГ)** 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 38, 40, 41, 44, 46, 47, 59, 64, 68, 77, 82, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 97, 106, 110, 112, 124, 125, 128, 131, 132, 133, 135, 138, 139, 140, 143, 144, 145, 147, 148, 152, 154, 155, 157, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 195, 197, 211, 226, 232, 238, 239, 240, 243, 245, 246, 256, 257, 265, 273, 277, 298, 430
- пик-фактор** 196, 368, 372, 385, 386, 409
- податливость** 379, 395, 396, 399, 400, 406, 409, 411, 412, 413, 417, 418, 421
- преобразование Фурье** 119, 364, 376
- преобразователь(ли):**
 - аналого-цифровой 38, 112, 118, 120, 121, 123, 437
 - измерительный 118, 123, 346
 - импульсно-цифровой 123
 - кодов и сигналов 118, 119
 - магнитострикционный 55
 - нормирующий 118
 - пьезоэлектрический 55, 387
 - цифро-аналоговый 123
 - электродинамический 55
 - электромагнитный 55
 - электромеханический 54, 55, 60, 108, 161, 183
 - электронно-оптический 194, 235
- продолжительность (длительность):**
 - включения привода 55

- впрыска 40, 42, 43, 49, 52, 57, 67, 82, 83, 92, 97, 108, 128, 132, 133, 159, 160, 162, 163, 165, 168, 177, 180, 181, 182

- открытия форсунки 35, 54, 56, 94, 127, 128, 136, 143

- подачи топлива 108, 268

- работы масла 295, 300, 305, 309, 311

распыление топлива 30, 64, 68, 69, 89, 87, 145, 147, 242, 268П

расход:

- воздуха 28, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 48, 63, 70, 106, 131, 139, 159, 184, 186, 190, 191

- горючей смеси 160

- масла 25, 243, 250, 274, 304, 314, 320, 354

- охлаждающей жидкости 19

- рабочей жидкости 340

- топлива 14, 20, 21, 22, 23, 30, 49, 50, 54, 61, 66, 77, 80, 85, 89, 91, 92, 93, 103, 105, 107, 110, 125, 128, 139, 146, 147, 152, 154, 156, 158, 160, 169, 170, 176, 177, 182, 183, 185, 186, 196, 197, 225, 230, 240, 243, 245, 250, 265, 268, 277, 298, 320, 323

- электрической энергии 60, 169, 240

расходомер 34, 35, 36, 39, 40, 51, 95, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 163, 164, 166, 185, 190, 213, 298, 340

регулятор:

- давления наддува 24, 25, 185, 187

- давления топлива 20, 48, 49, 51, 60, 61, 62, 70, 77, 84, 85, 88, 89, 90, 94, 97, 126, 133, 134, 138, 140, 141, 142, 159, 160, 171, 180, 181, 190

- закручивания потока воздуха 25

- механический 83, 172

- опережения зажигания 152, 155

- подачи топлива 50, 81, 82

- рециркуляции выхлопа 141, 185

- с центробежными грузами 74, 77, 78

- с электромагнитным клапаном (EDC) 74, 77, 91

- скорости автомобиля 174, 176, 186

- холостого хода (PXX) 51, 140, 141, 142

- частоты вращения коленчатого вала 33, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 171, 172, 340

- электронный 171

режим:

- аварийный 173, 178

- автоматический 361

- без обратной связи 44, 45

- вибрационного возбуждения 401

- гомогенно-антидетонационный 65, 68, 158

- гомогенно-обедненный 65, 66, 158

- гомогенно-послойный 65, 67, 158

- гомогенно-раздельный 65, 68

- гомогенный 65, 66, 140, 158

- диагностирования 236, 237, 341, 345, 391

- диалога 287

- динамический 343, 345

- замкнутой ООС 99

- защиты двигателя 106

- изнашивания 261

- кипения 294

- малых нагрузок 128, 157

- малых частот вращения 24, 25

- нагрузочный 110, 225, 267, 271, 274, 275, 278, 282, 319, 320, 323, 402, 419

- нестационарный 110

- полной нагрузки 80, 128, 169

- полной подачи топлива 106

- послойный 65, 66, 68, 158

- послойный-нагрев катализатора 65, 68

- послойный стартовый 65, 68

- предохранительный 50

- пуска двигателя 100, 128

- работы масла (смазки) 305, 317

- разомкнутой ООС 99, 167

- резервный 63

- резкопеременный 353

- с обратной связью 41, 43

- самозагрузки 341

- скоростной 24, 40, 110, 184, 225, 267, 271, 274, 275, 278, 282, 319, 320, 323, 419, 420, 425

- стационарный 345

- тактовый 52

- температурный (тепловой) 16, 254, 274, 319, 320, 323

- ускорения 128

- холостого хода 70, 99, 106, 128, 178, 402, 410, 422

резонанс 392, 397, 398, 401, 403, 405, 410, 411, 415, 416, 420, 423, 426

резонансная вибрация 350, 355, 395, 399, 400, 401, 403, 418, 427

резонансная частота 370, 371, 372, 375, 391, 395, 411, 418

рециркуляция 24, 30, 38, 51, 73, 87, 91, 94, 95, 106, 136, 137, 138, 139, 141, 148,

- 155, 173, 174, 175, 176, 178, 183, 184, 185, 187, 190, 430
- самоконтроль** 122, 197, 349
- светопрозрачность** 257, 310
- системы:**
- «Kugelfisher» 146
 - CAN 115, 116
 - K-Jetronic 134
 - KE-Jetronic 135
 - L-Jetronic 134, 135
 - LH-Jetronic 134, 135
 - M-Motronic 123, 135, 136, 137, 140, 155
 - ME-Motronic 137, 138, 140, 155, 156
 - MED-Motronic 137, 138, 140, 155, 156, 157
 - MONO-Jetronic 137, 144, 145
 - MONO-Motronic 137, 144
 - Motronic 136
 - Motronic MED 9.5.10 39
 - OBD-II 44
 - «Вектор» 254
 - «ДВС-трансмиссия» 320, 393, 395
 - «Прогноз-1» 254
 - авиационные 342
 - автоконтроля 323, 324, 325
 - автоматизированные 194, 212, 343, 357, 358, 362
 - автоматического регулирования 70, 171
 - анализа состава ОГ 44
 - аналого-цифровые 436, 437
 - аналоговые 197, 436, 437, 441, 443
 - антиблокировочные (ABS) 116, 123
 - бортовые 112, 138, 210, 211, 230, 261, 323, 330, 356, 358, 360, 389, 429, 433, 436
 - вентиляции 44, 45, 158, 211, 289
 - вероятностные 218
 - вибрационные 392
 - вибродиагностические 350
 - вихревых заслонок 92
 - воздухоочистки 282, 289
 - впрыска 30, 35, 39, 44, 48, 49, 51, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 64, 73, 75, 78, 79, 80, 81, 82, 86, 87, 88, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 133, 134, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 155, 159, 160, 161, 162, 163, 171, 172, 174, 175, 176, 179, 182, 183, 184, 188, 191
 - выпуска ОГ 44, 47, 86, 138, 183, 211
 - высокого давления 32, 50, 88, 146, 170, 180, 181
 - гетерогенные 299
 - гидравлические 92, 226, 232, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 347
 - ГРМ 19, 28, 30, 128, 193
 - двигателя 13, 18, 124, 212, 350, 351, 358, 391
 - детерминированные 218
 - диагностирования 95, 118, 138, 174, 178, 195, 198, 206, 208, 209, 210, 211, 214, 224, 236, 237, 239, 240, 241, 242, 245, 261, 323, 324, 325, 333, 363, 389, 429, 433, 435, 436, 437, 440, 441
 - динамические 397
 - дисперсные 299, 300
 - дозирования 126
 - допускового контроля 324
 - зажигания 18, 20, 21, 43, 58, 117, 144, 151, 152, 153, 154, 191, 242, 243, 268
 - измерительно-информационные 118, 120, 121, 122, 197
 - измерительные 325
 - исчисления 244
 - интеллектуальные 193, 210, 249
 - информационные 120, 197, 335, 440
 - карбюраторные 64, 133
 - кибернетические 292, 293
 - колебательные 372, 395, 412, 427
 - компьютеризованные 97, 327, 356, 357
 - кондиционирования воздуха 145, 176, 191
 - круиз-контроля 189
 - курсовой устойчивости (ESP) 115, 116, 156, 178, 189
 - линейные 394, 395, 406
 - логические 218
 - математические 243
 - механические 13, 27, 28, 30, 31, 125, 134, 146, 171, 193, 196, 232, 235, 238, 253, 258, 291, 323, 392, 395, 397, 398, 401, 403, 412, 416, 419
 - микропроцессорные 60, 64, 65, 90, 92, 117, 119, 146, 153, 154, 155, 184, 197, 214, 20, 356
 - наддува 22, 193
 - нейтрализации вредных веществ в ОГ 177
 - низкого давления 32, 96, 169
 - оптические 244
 - охлаждения 18, 19, 30, 117, 149, 190, 191, 193, 197, 240, 284, 298, 320

- очистки масла 274, 312, 315
- питания 18, 19, 20, 22, 32, 33,34, 38, 47, 48, 62, 89, 240, 254, 268, 436
- подачи воздуха 40, 41, 42, 136, 137, 140, 162, 175, 176, 183
- подогрева топлива 91
- прогнозирования 216, 435
- полидисперсные 299
- противобуксовочные (TCS) 112, 115, 116, 156, 157, 176, 178, 189
- противоугонные 173
- распознавания 243, 244, 249, 251
- регулирования расхода топлива 169, 170, 196
- регулирования скорости 191
- регулирования температуры ОЖ 190
- резервирования 325
- резервные 436
- рециркуляции ОГ 30, 38, 73, 91, 106, 139, 174, 184
- самодиагностики 106, 197
- смазки 16, 18, 19, 25, 29, 30, 211, 212, 240, 263, 265, 271, 272, 273, 274, 277, 292, 298, 305, 311
- смесеобразования 45, 46, 64, 191, 193, 436
- специализированные 435
- спорадического контроля 324
- структурные 218
- технические 11, 118, 197, 206, 207, 208, 211, 232, 327, 358, 372, 392, 418, 434, 435, 437, 438, 439, 440
- топливные (топливоподачи) 22, 32, 49, 50, 57, 62, 64, 70, 71, 72, 73, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 102, 107, 117, 125, 129, 131, 132, 138, 146, 147, 151, 158, 160, 162, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 185, 186, 187, 193, 195, 196, 197, 211, 226, 240, 263, 268, 350, 352
- тормозные 226
- трибодиагностики 261
- универсальные 435
- управления 21, 27, 32, 33, 40, 41, 42, 43, 55, 59, 60, 63, 65, 66, 70, 72, 75, 82, 83, 85, 87, 89, 94, 95, 97, 98, 106, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 118, 121, 123, 129, 130, 131, 132, 135, 137, 143, 153, 154, 155, 157, 159, 162, 169, 171, 173, 175, 177, 178, 179, 183, 184, 186, 187, 188, 189, 190, 193, 195, 197, 198, 254, 268, 271, 330, 332, 333, 343, 344, 429, 440
- управления АКП 176

- фильтрации 91, 171, 281
- фотоэлектронные 253
- цифровые 197, 327, 332, 429, 436, 437, 440, 441, 443
- ЦПГ 30, 193
- человеческие 206, 207, 208, 210
- экспертные 214, 218
- электрические 196, 254
- электромеханические 32, 125, 135, 422, 428, 322
- электронной остановки автомобиля 176
- электронные 21, 40, 50, 59, 60, 63, 72, 75, 82, 83, 85, 95, 98, 110, 111, 112, 114, 115, 117, 118, 123, 125, 171, 327, 429, 433
- электрооборудования 122
- эрготехнические 210
- эталонные 442

слуховая трубка 211, 213

смесеобразование 20, 21, 30, 46, 48, 53, 56, 64, 65, 67, 68, 69, 89, 124, 127, 128, 133, 134, 145, 146, 148, 156, 157, 158, 159, 160, 430, 436

спектр вибрации 351, 358, 360, 361, 363, 364, 365, 366, 370, 371, 372, 373, 374, 378, 379, 383, 389, 391, 393, 401, 414, 418, 419, 420, 422, 423, 424, 425, 426, 427

спектральный анализ 120, 195, 196, 197, 209, 226, 232, 256, 259, 262, 277, 281, 283, 284, 285, 287, 289, 290, 291, 293, 300, 339, 342, 358, 366, 368, 370, 372, 374, 376, 420, 428

срок службы

- агрегата 315
- двигателя 265, 363
- детали 266
- коленчатого вала 264
- масла 269, 270, 271, 275, 303
- узла 266
- элемента 263

стенд(ы):

- испытания моторных масел 296
- с беговыми барабанами 225, 257, 323, 398, 399, 401, 402
- ресурсных испытаний 401
- электродинамический 403
- эталонный 242

степень сжатия 13, 14, 17, 20, 33, 58, 111, 147, 148

стетоскоп 213, 339, 350, 352, 353, 357

такт:

- выпуска 22, 26, 27, 29, 30, 31, 65, 67, 68, 158
- выпуска 26, 27, 29, 31
- рабочего хода 13, 26, 27, 31
- рабочий 101, 103
- сжатия 21, 26, 27, 29, 30, 31, 58, 65, 66, 67, 68, 127, 158, 350
- тахометр** 339
- тепловизор** 252, 253, 254
- тепловой зазор** 17, 19, 28, 29, 246
- ТНВД** 22, 32, 61, 62, 88, 92, 93, 95, 97, 98, 104, 112, 114, 148, 171, 182, 183, 188, 190, 197:
 - автономный 86
 - звездообразного типа 84
 - индивидуальный 31, 71, 72, 73, 82, 83, 171
 - многоплунжерный 73, 74, 86
 - модели VE 71, 73, 174
 - распределенного типа 71, 73, 75, 76, 77, 78, 82, 116, 171, 174, 175, 176, 178, 180
 - роторный 71, 79, 116
 - рядный 71, 73, 74, 75, 82, 171, 172, 178
 - с аксиальным движением плунжера 78, 79
 - с гидравлическим приводом 181
 - с дополнительной втулкой 74, 75, 172
 - с механическим приводом 181
 - с пневматическим приводом 181
 - с радиальным движением плунжера 78, 79, 80, 86, 116, 175
 - с электромагнитным клапаном 83, 84, 94, 175, 176
 - с электронным регулированием 78, 79
 - типа PE 74
 - шестеренного типа 91
- токсичность ОГ** 20, 30, 144, 245, 298
- трибосистема** 321
- турбокомпрессор** 24, 25, 30, 95, 185, 190, 361, 373, 379
- турбонаддув** 22, 90, 141
- утечка(и):**
 - газов 26
 - в гидроагрегатах 339, 341, 342
 - масла 25
 - тока 432
 - топлива 97, 101
- фирма:**
 - «Акахи» 352
 - «Брюль и Кьер» 352, 362, 364, 371, 387, 400

- «Шенк» 352
- AVL List 58
- Bosch 35, 49, 53, 55, 58, 73, 81, 84, 89, 100, 108, 109, 127, 135, 144, 161, 180, 181
- Cummings 276, 277
- Carinthian Tech Research 58
- Caterpillar 276, 277
- Delphi 81, 100
- Detroit Diesel 276, 277
- General Motors 112, 298
- Ford 112
- Hewlett Packard 352
- KOMATSU 279
- MTU 279
- Rande&Schwarz 352
- Siemens 50, 56, 80, 102, 103, 109, 149, 162
- Therma 254
- ИРТИС 254
- форсунка(ки)** 20, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 39, 40, 41, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 64, 65, 68, 74, 75, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 126, 127, 128, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 166, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 188, 190, 196, 242, 256, 266, 268, 343, 350, 374
- Фурье-спектр** 295
- Фурье-спектрометр** 285, 294, 295
- Фурье-спектроскопия** 294
- ход поршня** 13, 14, 26, 31, 425
- экономичность** 13, 14, 16, 44, 57, 64, 70, 90, 92, 110, 124, 130, 144, 146, 177, 239, 241, 242, 265
- электронный блок управления (ЭБУ)** 24, 35, 37, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 48, 63, 72, 79, 80, 84, 85, 89, 92, 94, 97, 98, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 121, 122, 124, 128, 129, 130, 132, 133, 135, 140, 141, 142, 143, 145, 149, 150, 151, 154, 156, 158, 159, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 171, 174, 178, 179, 184, 189, 429
- эндоскоп(ы)** 194, 211, 213, 254, 255, 256
- эффективные показатели:**
 - мощность 14, 15, 17, 196, 384
 - КПД 16
 - среднее давление 14, 15, 177, 269

Учебное издание
Мигаль Василий Дмитриевич
ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
Учебное пособие

В 3-х томах

Том 1

Объекты и методы диагностирования

В авторской редакции
Технический редактор Жадан А. И.
Компьютерная верстка и дизайн обложки Жадан А. И.

Підписано до друку 08.08.2014. Формат 70x100/16.
Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 28,75. Наклад 300 прим. Зам. № 14-65.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК № 1002 від 31.07.2002 р.

Видання і друк ТОВ «Майдан»
61002, Харків, вул. Чернишевська, 59
Тел.: (057) 700-37-30

