

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАЖИГАНИЕМ

А.А. Дзюбенко, ассистент, ХНАДУ

*Аннотация.* Разработан метод получения оптимальных параметров системы автоматического управления зажиганием. Оптимизация производится по критерию качества, который включает экологические и технико-экономические параметры автомобиля, что позволяет настраивать систему исходя из режима эксплуатации автомобиля.

*Ключевые слова:* система зажигания, экологическая безопасность, математическая модель, оптимальное управление, функционал качества.

## ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАПАЛЮВАННЯМ

О.А. Дзюбенко, ассистент, ХНАДУ

*Анотація.* Розроблено метод отримання оптимальних параметрів системи автоматичного управління запалюванням. Оптимізація проводиться за критерієм якості, що включає екологічні й техніко-економічні параметри автомобіля, це дозволяє налаштовувати систему враховуючи режим експлуатації автомобіля.

*Ключові слова:* система запалювання, екологічна безпека, математична модель, оптимальне управління, функціонал якості.

## PARAMETER OPTIMIZATION OF AUTOMATIC IGNITION CONTROL SYSTEM

A. Dziubenko, assistant, KhNAHU

*Abstract.* The method of optimum parameters obtaining of the automatic ignition control system is developed. The optimization is carried out according to the quality factor which includes ecological and performance characteristics of vehicle that allows to adapt the system coming from the vehicle operative conditions.

*Key words:* ignition system, environmental safety, mathematical model, optimal control, quality factor.

### Введение

Одним из основных направлений повышения экологической безопасности и технико-экономических показателей автомобиля является повышение эффективности рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС). К способам реализации этого направления можно отнести применение современных электронных систем автоматического управления (САУ). Одной из таких систем

является система автоматического управления зажиганием (САУЗ) [1].

Реализация оптимальных законов управления является важным моментом для любой электронной САУ, разработка которых является сложной задачей. Управление автомобильным ДВС зависит от набора управляемых переменных, которые зависят не только от режима работы двигателя, но и от условий эксплуатации автомобиля.

Задача синтеза оптимального управления САУЗ отличается сложностью математического описания. Во-первых, это обусловлено отсутствием требуемой математической модели (ММ) объекта управления, так как существующие модели ДВС разработаны для решения конкретных задач, отличных от поставленной. Во-вторых, параметры объекта управления и возмущающих воздействий системы управления имеют сложную взаимосвязь, подразумевающую большую размерность ММ.

### Анализ публикаций

Существующие системы зажигания в качестве управляемого параметра используют только угол опережения зажигания (УОЗ). На практике для получения оптимальных значений УОЗ проводят испытания двигателя в полном диапазоне скоростей и нагрузок. Из полученных данных формируют характеристические карты, которые заносят в память микроконтроллера блока управления [2, 3].

В работе [4] разработан метод экспериментально-расчетного определения оптимальных законов управления опережением зажигания и на его основе получены исходные данные для программирования микропроцессорных систем управления УОЗ.

### Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы является повышение эффективности рабочего процесса ДВС путем оптимизация параметров САУЗ.

Представим математическую модель ДВС в виде некоторого оператора

$$f: U \mapsto Y, \quad (1)$$

который в соответствие каждому входному вектору

$$u = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ n \\ \dot{n} \\ \Theta \\ \dot{\Theta} \\ f_i \\ \dot{f}_i \\ t_r \\ \dot{t}_r \end{bmatrix}, \quad u \in U \subset \mathbb{R}^{10}, \quad \forall t, \quad (2)$$

с граничными условиями

$$U = \begin{bmatrix} 0 \leq \beta \leq 100 \\ \dot{\beta}_{\min} \leq \dot{\beta} \leq \dot{\beta}_{\max} \\ n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ \dot{n}_{\min} \leq \dot{n} \leq \dot{n}_{\max} \\ \Theta_{\min} \leq \Theta \leq \Theta_{\max} \\ \dot{\Theta}_{\min} \leq \dot{\Theta} \leq \dot{\Theta}_{\max} \\ f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \\ \dot{f}_{i\min} \leq \dot{f}_i \leq \dot{f}_{i\max} \\ t_{r\min} \leq t_r \leq t_{r\max} \\ \dot{t}_{r\min} \leq \dot{t}_r \leq \dot{t}_{r\max} \end{bmatrix},$$

где  $\beta$  – угол положения дроссельной заслонки;  $n$  – частота вращения коленчатого вала двигателя;  $\Theta$  – УОЗ;  $f_i$  – частота искрообразования;  $t_r$  – длительность серии разряда;

$$\dot{\beta} = \frac{d\beta}{dt}; \quad \dot{n} = \frac{dn}{dt}; \quad \dot{\Theta} = \frac{d\Theta}{dt}; \quad \dot{f}_i = \frac{df_i}{dt}; \quad \dot{t}_r = \frac{dt_r}{dt},$$

ставит выходной вектор

$$y = \begin{bmatrix} \Delta N_e \\ g'_e \\ E' \end{bmatrix}, \quad y \in Y \subset \mathbb{R}^3, \quad \forall t, \quad (3)$$

с граничными условиями

$$Y = \begin{bmatrix} \Delta N_{e\min} \leq \Delta N_e \leq \Delta N_{e\max} \\ g'_{e\min} \leq g'_e \leq g'_{e\max} \\ E'_{\min} \leq E' \leq E'_{\max} \end{bmatrix},$$

где  $\Delta N_e = N_e - N'_e$  – потери эффективной мощности двигателя;  $N_e$  – эффективная мощность двигателя при штатной системе зажигания;  $N'_e$  – эффективная мощность двигателя при САУЗ;  $g'_e$  – удельный расход топлива;  $E'$  – обобщенный экологический показатель автомобиля, т.е.

$$y = f(u). \quad (4)$$

Задача оптимального управления заключается в поиске наилучших, в смысле выбранного критерия, показателей системы в условиях заданных ограничений на управляющие воздействия и переменные состояния. Для оценки качества системы при решении указанной

задачи введем в рассмотрение функционал качества

$$J = \int_{t_1}^{t_2} (k_{N_e} \cdot \Delta N_e + k_{g_e} \cdot g_e' + k_E \cdot E') dt, \quad (5)$$

где  $k_{N_e}$ ,  $k_{g_e}$ ,  $k_E$  – весовые коэффициенты выходных параметров, входящих в состав критерия качества.

Математические модели ДВС в виде системы дифференциальных уравнений, полученных на основе анализа термодинамических процессов в камере сгорания, впускном и выпускном коллекторах, особенностей взаимодействия систем смесеобразования и зажигания, кинематических связей между различными узлами и агрегатами и т.д. оказываются чрезвычайно сложными и громоздкими. Линеаризация таких уравнений приводит к существенному возрастанию ошибки выходов модели объекта при необходимости использования модели в широком диапазоне эксплуатационных режимов ДВС.

Более предпочтительными оказываются ММ, полученные в результате описания статических экспериментальных характеристик ДВС, которые снимают в результате стендовых испытаний двигателей. В этом случае размерность входного вектора модели (2) сокращается

$$u = \begin{bmatrix} \beta \\ n \\ \Theta \\ f_i \\ t_r \end{bmatrix}, \quad u \in \tilde{U} \subset \mathbb{R}^5, \quad \forall t, \quad (6)$$

с граничными условиями

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} 0 \leq \beta \leq 100 \\ n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ \Theta_{\min} \leq \Theta \leq \Theta_{\max} \\ f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \\ t_{r\min} \leq t_r \leq t_{r\max} \end{bmatrix},$$

а математическая модель (4) принимает вид

$$y = F(u) = F(\beta, n, \Theta, f_i, t_r). \quad (7)$$

Тогда функционал качества (5) перепишем в векторной форме

$$J = \begin{bmatrix} k_{N_e} \\ k_{g_e} \\ k_E \end{bmatrix} \cdot [\Delta N_e \quad g_e' \quad E'] = k^T \cdot F(u), \quad (8)$$

где  $k = [k_{N_e} \quad k_{g_e} \quad k_E]$  – вектор весовых коэффициентов.

В рассматриваемом случае эффективность статических моделей практически не уступает эффективности динамических, поскольку постоянные времени физико-химических процессов, протекающих в двигателе, малы по сравнению с постоянной времени автомобиля.

Рассмотрим задачу поиска оптимального вектора управления  $u^* = [\Theta \quad f_i \quad t_r]$ , который минимизирует величину  $J$  во всем диапазоне изменений вектора  $u^{**} = [\beta \quad n]$  при заданных ограничениях, т.е.

$$u^* = \arg \min J. \quad (9)$$

### Особенности построения математической модели

Поставленную задачу можно разделить на две самостоятельные подзадачи. Решение первой заключается в определении зависимостей, описывающих взаимосвязь параметров входного и выходного вектора (7); второй – решение оптимизационной задачи (9).

Обобщенный экологический показатель  $E$  состоит из трех показателей удельных выбросов вредных компонентов

$$E = k_{NO_x} \cdot g_{NO_x} + k_{CO} \cdot g_{CO} + k_{CH} \cdot g_{CH}, \quad (10)$$

где  $g_{NO_x}$ ,  $g_{CO}$ ,  $g_{CH}$  – удельные выбросы компонентов  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH$  ( $г/(кВт \cdot ч)$ );  $k_{NO_x}$ ,  $k_{CO}$ ,  $k_{CH}$  – весовые коэффициенты соответствующих удельных выбросов.

Весовые коэффициенты удельных выбросов рассчитаны в соответствии со значениями коэффициентов вредности компонентов выхлопных газов [5].

$$k_{NO_x} = \frac{v_{NO_x}}{v_{NO_x} + v_{CO} + v_{CH}}; \quad (11)$$

$$k_{CO} = \frac{v_{CO}}{v_{NO_x} + v_{CO} + v_{CH}}; \quad (12)$$

$$k_{CH} = \frac{v_{CH}}{v_{NO_x} + v_{CO} + v_{CH}}; \quad (13)$$

где  $v_{NO_x} = 70$  – коэффициент вредности  $NO_x$ ;  $v_{CO} = 1$  – коэффициент вредности  $CO$ ;  $v_{CH} = 2$  – коэффициент вредности  $CH$ .

Исходя из выше сказанного, для решения первой задачи необходимо провести идентификацию нелинейных зависимостей параметров выходного вектора от параметров входного

$$\begin{cases} N_e = f(\beta, n, \Theta, f_i, t_r) \\ g_e = f(\beta, n, \Theta, f_i, t_r) \\ g_{NO_x} = f(\beta, n, \Theta, f_i, t_r) \\ g_{CO} = f(\beta, n, \Theta, f_i, t_r) \\ g_{CH} = f(\beta, n, \Theta, f_i, t_r) \end{cases} \quad (14)$$

Количество параметров входного вектора и диапазон их изменения подразумевают большую размерность задачи с большой областью поиска оптимума. Это затрудняет использование градиентных методов численной оптимизации из-за наличия локальных минимумов, а также требует больших вычислительных ресурсов.

Для упрощения решения сформулированной задачи целесообразно провести декомпозицию. Декомпозиционный подход позволяет заменить некоторую сложную задачу несколькими другими задачами, каждая из которых содержит часть неизвестных и управляющих воздействий исходной задачи и совместное решение которых даст тот же результат, что и решение сложной исходной задачи.

Пусть при определенных значениях параметров  $\Delta\Theta, f_i, t_r - \text{const}$  САУЗ полностью идентична штатной системе зажигания, тогда выходные параметры полностью определяется вектором  $\mathbf{u}^{**}$  (рис. 1)

$$\begin{cases} N_e = h(\beta, n) \\ g_e = h(\beta, n), \text{ при } \mathbf{u}^{**} - \text{const} \\ E = h(\beta, n) \end{cases} \quad (15)$$

При изменении значений параметров вектора  $\mathbf{u}^*$  значения вектора выходных параметров будут изменяться на некоторую величину  $\Delta\mathbf{u}$

$$\begin{cases} \Delta N_e = h(\Delta\Theta, f_i, t_r) \\ \Delta g_e = h(\Delta\Theta, f_i, t_r), \text{ при } \mathbf{u}^* - \text{const} \\ \Delta E = h(\Delta\Theta, f_i, t_r) \end{cases} \quad (16)$$

А конечное значение выхода достигается вследствие композиции значений выходных параметров и их отклонений, определяемых вектором  $\mathbf{u}^*$ .

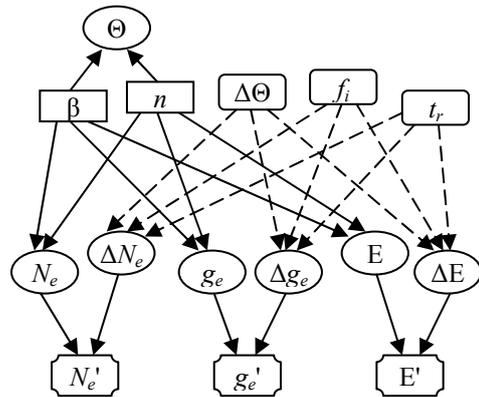


Рис. 1. Структурная схема декомпозиции исходной задачи

Такой подход позволяет сузить область локализации оптимума и применять более простые способы решения, такие как градиентный спуск, не опасаясь попасть в область локального минимума.

Существующие аналитические зависимости процессов, протекающих в ДВС, имеют весьма упрощенный характер с большим количеством допущений. К тому же влияние параметров САУЗ, составляющих вектор управления, не могло учитываться ранее ввиду новизны разработки. На практике при построении ММ ДВС используют большие массивы экспериментальных данных, которые посредством математического описания позволяют получить приближенные аналитические выражения.

Получение экспериментальной базы данных требует больших временных и материальных затрат. Решение задачи идентификации нелинейных зависимостей систем (15) и (16) осуществляется посредством систем нечеткого вывода, с использованием методов обучения нечетких систем, опираясь на знания экспертного сообщества и результаты экспериментальных исследований. Более подробно эта часть модели описана ранее в работе [6].

### Выводы

Разработанная ММ позволяет получать зависимости параметров САУЗ ( $\Theta = f(\beta, n)$ ,  $f_i = f(\beta, n)$ ,  $t_r = f(\beta, n)$ ), оптимальные в смысле выбранного критерия качества. В критерий качества включены экологические и технико-экономические параметры автомобиля, что позволяет настраивать САУЗ исходя из режима эксплуатации автомобиля, посредством изменения вектора весовых коэффициентов  $k$ .

Формализация знаний экспертного сообщества правилами нечетких продукций позволяет в значительной мере упростить процесс синтеза ММ. Разработанный метод синтеза, основанный на объединении методик моделирования классической оптимальной САУ и САУ на основе нечеткой логики и экспертных систем, является довольно универсальным и может быть использован при оптимизации различного рода систем.

### Литература

1. Дзюбенко А.А. Разработка многоискровой системы зажигания с регулированием энергии разряда // Транспорт, экология – устойчивое развитие. – Варна, 2008. – С. 258–263.
2. Трантер А. Руководство по электрическому оборудованию автомобилей. – СПб.: Наука, 2001. – 282 с.
3. Соснин Д.А. Автотроника. Электрооборудование и системы бортовой автоматики современных легковых автомобилей. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 272 с.
4. Трифонов А.С. Усовершенствование управления углом опережения зажигания в двигателе с применением микропроцессорной системы зажигания: Автореферат дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.04.02. «Тепловые двигатели». – М.: МАДИ, 1986. – 16 с.
5. <http://www.autogas.com.ua/?pid=346>. К вопросу о безопасности газового топлива. – Институт автомобильного транспорта Минтранс России, 2008.
6. Сериков С.А., Дзюбенко А.А. Идентификация математической модели двигателя внутреннего сгорания с использованием системы нечеткого вывода // ДВС / Всеукраинский научно-технический журнал, ВНТУ «ХПИ». – 2009. – №1. – С. 14–18.

Рецензент: В.И. Клименко, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2009 г.