

УДК 621.313.333

РЕЖИМ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ДВС В КОНВЕРСИОННОМ ГИБРИДНОМ АВТОМОБИЛЕ

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н., Н.Г. Михалевич, доц., к.т.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложен метод управления конверсионным гибридным автомобилем для совместной работы электродвигателя и ДВС, а также предложено устройство для его реализации. Приведено и проанализировано схемотехническое решение. Произведен расчет динамики автомобиля при совместном разгоне.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, вентильный электродвигатель, конверсия автомобиля, электропривод, система совместного разгона.

РЕЖИМ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНА І ДВЗ У КОНВЕРСІЙНОМУ ГІБРИДНОМУ АВТОМОБІЛІ

В.Я. Двадненко, доц., к.т.н., М.Г. Михалевич, доц., к.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано метод керування конверсійним гібридним автомобілем для спільної роботи електродвигуна і ДВЗ, а також запропоновано пристрій для його реалізації. Наведено і проаналізовано схемотехнічне рішення. Виконано розрахунок динаміки автомобіля при спільному розгоні.

Ключові слова: гібридний автомобіль, вентильний електродвигун, конверсія автомобіля, електропривід, система спільного розгону.

COOPERATIVE MODE OF ELECTRIC MOTOR AND INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATION IN THE CONVERSION HYBRID CAR

V. Dvadnenko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), N. Mikhalyevych, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
Kharkov National Automobile and Highway University

Abstract. In the given article the authors proposed a method to control the car, which is converted into a hybrid one. The electric motor and combustion engine operate alternately in the car. They proposed a device for implementing this method and a circuit design for the device in question. They also calculated the dynamics of the vehicle under the joint acceleration.

Key words: hybrid car, BLDC motor, the conversion of the car, electric motor and internal combustion engine, joint acceleration system.

Введение

В условиях интенсивного городского движения автомобиль вынужден двигаться со сравнительно невысокой скоростью, часто останавливаться и затем трогаться с места. Использование двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в автомобиле для старта связано

с необходимостью иметь режим холостого хода, а движение на низких скоростях на сравнительно мощном двигателе приводит к неэкономичным режимам работы такого двигателя. В результате в городских условиях имеет место увеличенный расход топлива и велики вредные выбросы. Переоборудование (конверсия) базового автомобиля в под-

заряжаемый гибридный автомобиль, когда движение на неэкономичных режимах ДВС заменено на движение с помощью электропривода, позволяет существенно улучшить экономичность и экологические параметры автомобиля.

Анализ публикаций

Хорошее соотношение цена/качество на вложенные в доработку простого автомобиля средства дает, как показано в работе [1], введение относительно недорогого электропривода с питанием от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), подзаряжаемой от электрической сети. Это является фактически переоборудованием такого автомобиля в параллельный гибридный автомобиль с внешней подзарядкой (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle) [2]. Для конверсии в подзаряжаемый гибридный автомобиль в качестве базового имеет смысл взять недорогой автомобиль с механической коробкой передач (МКП), установить тяговый электродвигатель и обеспечить кинематическую связь его вала с вторичным валом МКП [3]. При этом целесообразно организовать систему управления гибридного автомобиля так, чтобы сохранить возможность использования этого автомобиля и как обычного бензинового автомобиля. В качестве ТАБ по совокупности параметров наиболее подходят литий-ионные аккумуляторы. Емкость ТАБ (количество энергии, запасенной в ТАБ во время зарядки от сети) может быть оптимизирована и выбирается с учетом наиболее вероятного дневного пробега, который желательно проделать в гибридном режиме. При этом появляется возможность оптимизировать затраты на конверсию с учетом режима эксплуатации конкретного автомобиля [3].

Такое переоборудование автомобиля «Ланос-пикап» проведено на кафедре автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Переход в низкоскоростных режимах на электропривод позволяет часть пути, которая при движении на ДВС наиболее неэкономична и сопровождается наибольшими вредными выбросами, преодолевать с помощью электропривода за счет дешевой электрической энергии, взятой из электрической сети [4]. Электропривод конверсионного гибридного автомобиля имеет сравнительно небольшую мощность. Такой выбор обусловлен относи-

тельно небольшим запасом электроэнергии в ТАБ, который, в свою очередь, связан с требованием обеспечить при конверсии невысокую стоимость и небольшой вес дополнительного оборудования. Также для конверсии важно иметь малые габариты электропривода, чтобы его можно было разместить в подкапотном пространстве переоборудуемого автомобиля.

В переоборудованном автомобиле «Ланос-пикап» использован вентильный электродвигатель (ВЭД) на основе синхронной электрической машины Г290 (автомобильного генератора) [5]. Электропривод используется, как правило, для старта и движения при низких скоростях, которые требуют небольших токов от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ). При этом, благодаря отсутствию холостого хода, высокому КПД электродвигателя и максимальному моменту при старте с места, эффективно используется запас дешевой электрической энергии, имеющийся на борту автомобиля, тем самым существенно уменьшая расход бензина.

Цель и постановка задачи

Целью работы является определение качественных и количественных характеристик разгона с места до скорости 40 км/ч конверсионного гибридного автомобиля. Выбор скоростного диапазона учитывает возможности электропривода. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: анализ работы устройства обеспечения совместной работы электропривода и ДВС; доработка уравнения движения автомобиля для возможности анализа совместной работы электропривода и ДВС; решение математической модели и анализ результатов моделирования.

Исследование режима совместной работы ДВС и электродвигателя

Из-за небольшой мощности электропривода в ряде случаев, например на подъеме, при необходимости быстро встроиться в движущийся поток, старт с места на сравнительно маломощном электроприводе может оказаться недостаточно энергичным. В таких случаях старт целесообразно осуществлять при совместной работе электропривода и ДВС. Система управления конверсионного автомобиля должна иметь простое управление

таким стартом, что может обеспечить система старт-стоп, автоматически запускающая ДВС.

Разработанное устройство обеспечения режима совместной работы электропривода и ДВС конверсионного автомобиля имеет функциональную схему, приведенную на

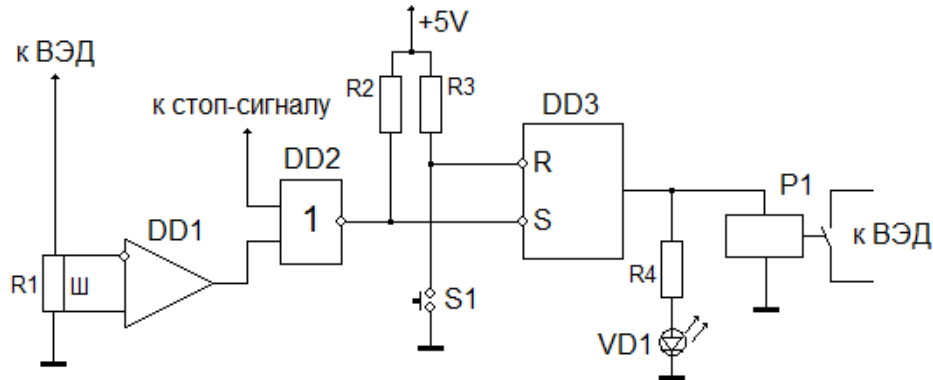


Рис. 1. Устройство обеспечения режима совместной работы электропривода и ДВС: R1 – токоизмерительный шунт в цепи ВЭД; DD1 – компаратор; DD2 – логический элемент «или»; R2, R3 – подтягивающие резисторы; S1 – кнопка управления; DD3 – RS триггер; P1 – реле включения ВЭД; VD1 – контрольный светодиод; R4 – резистор ограничения тока светодиода

Педали акселератора в этом режиме управляет только подачей топлива в ДВС. Одновременно включается и светодиод-индикатор VD1 режима совместной работы электропривода и ДВС, при этом водитель такой разгон производит как обычно, переключая передачи.

Сброс триггера происходит после того, как будет достигнута скорость идеального холостого хода ВЭД (при скорости автомобиля около 40 км/ч) и напряжение на токоизмерительном шунте R1 тока ТАБ сменит полярность. При этом произойдет переключение компаратора DD1, выход которого подключен к одному из входов логического элемента «или» DD2. Выход DD2 подключен ко входу сброса RS триггера, поэтому после достижения скорости около 40 км/ч и сброса триггера режим совместной работы электропривода и ДВС прекращается и дальнейшее движение автомобиля продолжается только на ДВС. Сброс RS триггера произойдет также, если в процессе разгона будет нажата педаль тормоза. При этом напряжение с ламп стоп-сигнала в этом случае будет подано на второй вход логического элемента «или». При сбросе триггера гаснет и светодиод-индикатор режима совместной работы электропривода и ДВС.

рис. 1. В режиме движения на ДВС при старте с места нажатие кнопки S1 взводит RS триггер DD3, который питает обмотку реле, включающего тяговый ВЭД в режиме ограничения максимального тока якоря, что обеспечивает максимальный момент тягового электродвигателя.

Рассмотрим действия водителя и работу такого устройства при необходимости энергичного старта. В гибридном режиме конверсионный автомобиль останавливается с заглушенным ДВС. Чтобы осуществить старт при совместном действии ДВС и ВЭД, водитель выжимает педаль сцепления, включает при неработающем ДВС первую передачу и, не отпуская педаль сцепления, ждет момента, когда можно начинать движение. Для начала движения водитель нажимает кнопку S1 (рис. 1) и нажимает педаль акселератора. В момент нажатия педали акселератора система старт-стоп запускает ДВС, водитель отпускает педаль сцепления и начинает движение на ДВС как обычно. После нажатия кнопки S1 автомобиль начинает движение на электроприводе в режиме, эквивалентном полному нажатию педали акселератора, независимо от ее истинного положения, поскольку в этом режиме она управляет только подачей топлива в ДВС. После разгона на первой передаче водитель включает поочередно последующие передачи, осуществляя энергичный разгон автомобиля. После достижения ВЭД оборотов идеального холостого хода (примерно при 40 км/ч), устройство обеспечения режима совместной работы электропривода и ДВС отключает электродвигатель. При желании электродвигатель можно отключить раньше, для чего нужно

нажать педаль тормоза, чтобы сработал стоп-сигнал.

Возможен другой вариант: после энергичного совместного разгона на первой передаче поставить рычаг МКП в нейтральное положение, отпустить сцепление и продолжать разгон на электроприводе; ДВС при этом

остановится, и ток ВЭД будет регулироваться педалью акселератора.

Принципиальная схема устройства, показанная на рис. 2, работает так. При нажатии на кнопку S1 срабатывает защелка (триггер) на транзисторах Q3, Q4, которая через транзистор Q2 включает реле P1.

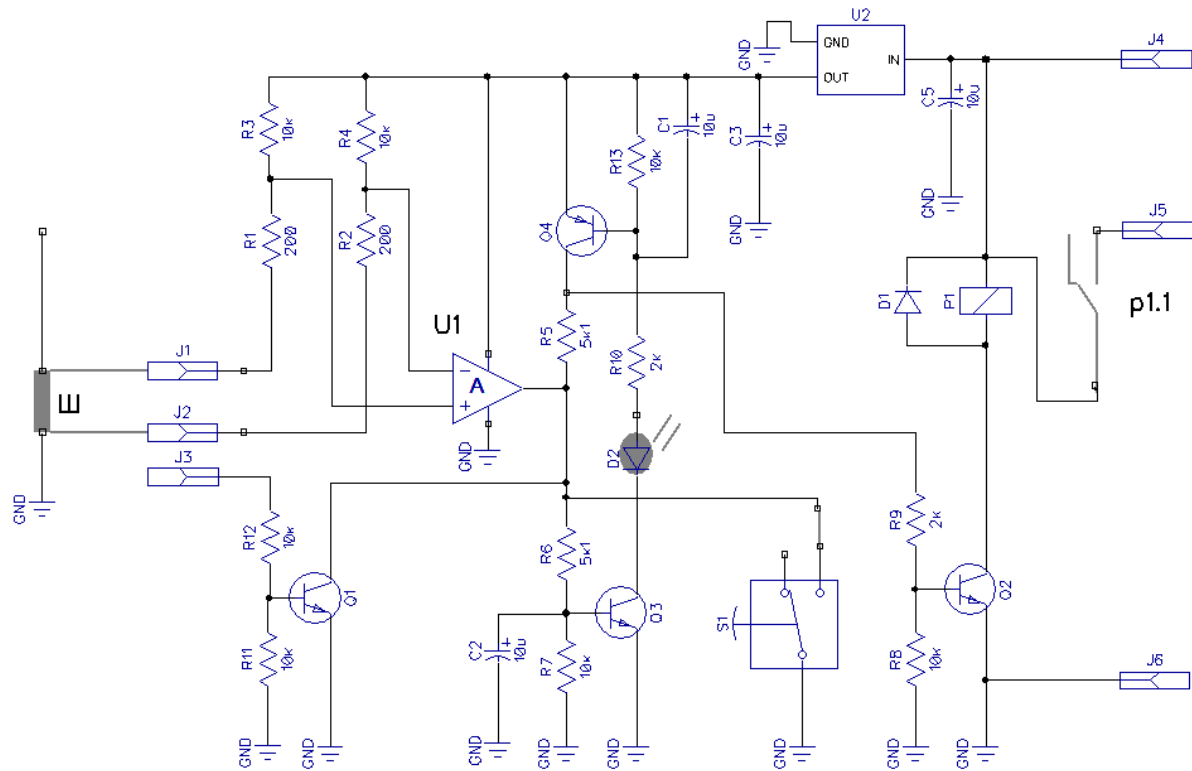


Рис. 2. Схема устройства для обеспечения режима совместной работы электропривода и ДВС

Контакты реле P1.1 включают питание на преобразователь обмотки возбуждения ВЭД и одновременно подают питание на реле, расположенное возле контроллера ВЭД. Это реле обеспечивает режим ВЭД, эквивалентный полностью нажатой педали акселератора. Светодиод D2 подсвечивает кнопку S1 при сработавшей защелке.

На разъем J3 подается напряжение с лампы стоп-сигнала, для того чтобы при нажатии на педаль тормоза через транзистор Q1 сбросить защелку. На разъемы J1 и J2 подается напряжение с измерительного шунта тока ТАБ. Компаратор на операционном усилителе U1 при смене полярности этого напряжения (смене при скорости 40 км/ч режима разряда ТАБ на режим заряда) сбрасывает защелку.

Делители напряжения на резисторах R1, R3 и R2, R4 нужны для вывода входов операционного усилителя на рабочие участки. На транзисторах Q1, Q3, Q4 и резисторах R5–R7, R10–R13 собрана схема защелки (RS триггера). На транзисторе Q2 и резисторах R8, R9 собран ключ обмотки реле P1. Диод D1 предотвращает повышение напряжения на обмотке реле P1 при ее отключении.

Конденсаторы C1 и C2 повышают помехозащищенность. Стабилизатор напряжения на микросхеме U2 и конденсаторах C3, C5 обеспечивает питание схемы напряжением 9В, независимо от перепадов напряжения в бортовой сети. Напряжение бортовой сети 12 В подается на разъемы J4 и J6.

Для проверки максимальных возможностей разгона конверсионного гибридного автомобиля при совместной работе ДВС и тягового

электропривода в дифференциальном уравнении силового баланса обычного автомобиля с механической коробкой передач добавим слагаемое, представляющее собой силу

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{\frac{M_{ed}u_{et}u_0\eta_{et}\eta_0}{r_d} + \frac{M_e u_i u_0 \eta_{kp} \eta_0}{r_d} - \frac{C_x \rho F V_a^2}{2} - m_a g \psi}{m_a \delta_i}, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент дорожного сопротивления; $V_a = (\omega_e r_d) / (u_i u_0)$ – скорость автомобиля; $M_e = f(n_e, \alpha_e)$ – крутящий момент ДВС; $M_{ed} = f(I_{ed})$ – крутящий момент электродвигателя; ω_e – угловая скорость электродвигателя; r_d – радиус ведущего колеса, m_a – масса автомобиля; δ_i – коэффициент учета вращающихся масс на i -й передаче; α – угол наклона дороги; α_e – угол поворота дроссельной заслонки ДВС; u_i – коэффициент передачи коробки передач на i -й передаче; u_0 – коэффициент главной передачи; η_{et} – КПД передачи момента от электродвигателя к главной передаче; η_0 – КПД главной передачи; I_{ed} – ток якоря электродвигателя; g – ускорение свободного падения; t – время; C_x – коэффициент обтекаемости; ρ – плотность воздуха; F – лобовая площадь автомобиля.

Проведено численное решение дифференциального уравнения (1), поскольку крутящий момент ДВС переоборудованного автомобиля задан в виде набора точек, полученных экспериментальным путем [6]. Параметры ВЭД переоборудованного автомобиля «Ланос-пикап» получены по методике, описанной в работе [5]. Расчет произведен для разгона по внешним механическим характеристикам обоих двигателей.

На рис. 3 приведены полученные с помощью этого расчета зависимости скорости от времени при разгоне только на ДВС и при разгоне с совместной работой ДВС и электродвигателя. Поскольку при разгоне работа ВЭД происходит только до скорости 40 км/ч, расчет произведен тоже до этой скорости.

Как видно из рис. 3, кривая для ВЭД + ДВС идет выше кривой для ДВС, скорость 40 км/ч достигается на 0,8 с раньше, и, кроме того, во время переключения передач скорость при движении только на ДВС падает, а при движении с ДВС и ВЭД растет. Это повышает

тяги, действующую на оси ведущих колес и обусловленную вращающим моментом электродвигателя, переданным на вторичный вал коробки передач автомобиля.

комфорт при переключении передач. Практически ускорения при движении в городе существенно меньше, поскольку приходится подстраиваться к движению потока и, кроме того, даже если впереди есть некоторое пространство, нецелесообразно постоянно производить резкие разгоны и резкие торможения [7].

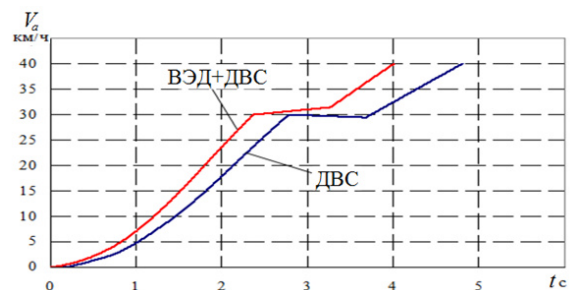


Рис. 3. Расчетные зависимости скорости автомобиля от времени

Экспериментальные исследования конверсионного гибридного автомобиля «Ланос-пикап» с ДВС МЕМ3-307 в городских условиях проведены в процессе нормального движения. Движение автомобиля происходило без нажатия педали акселератора до упора и набора оборотов ДВС, близких к максимальным. При этом получены следующие усредненные значения: длительность разгона до 40 км/ч только на электроприводе – 20 с, на ДВС – 11 с и совместный разгон ДВС + ВЭД – 9 с.

Выводы

Предложено техническое решение, реализующее совместный режим работы ДВС и тягового электродвигателя в автомобиле «Ланос-пикап», переоборудованного в гибридный. Произведено сравнение расчетной динамики автомобиля при разгоне по внешней механической характеристике для режимов только с ДВС и при совместном режиме работы ДВС и электродвигателя. Показано, что при совместном режиме работы ДВС и

электродвигателя конверсионного гибридного автомобиля за счет непрерывного подвода мощности к колёсам улучшается его динамические качества и повышается комфортабельность разгона (становится менее заметным переключение передач). Время разгона до скорости 40 км/ч уменьшается на 0,8 с. Подтверждают это также приведенные экспериментальные данные.

Литература

1. Бажинов О.В. Конверсія легкового автомобіля в гібридний / О.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, М. Хакім. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 200 с.
2. Ник Гиббс. Плагин-гибриды будут преобладать среди автомобилей с электрофицированным приводом в Европе / Ник Гиббс // Automotive News Europe // Журнал Автомобильных Инженеров. – 2015. – № 6 (95). – С. 20–21.
3. Бажинов О.В. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двадненко. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
4. Говорущенко Н. Я. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – Х.: Вища школа, 1984. – 312 с.
5. Двадненко В.Я. Расчет основных характеристик тягового вентильного электродвигателя на базе автомобильного генератора / В.Я. Двадненко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 35. – С. 80–86.
6. Михалевич М.Г. Аналіз динаміки розгону швидкісного автомобіля класу Е-8, оснащеного різними варіантами трансмісії / М.Г. Михалевич // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2015. – Вып. 37. – С. 111–115.
7. Бажинов А.В. Экспериментальное исследование бензинового автомобиля, конвертированного в гибридный / А.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, С.А. Серіков // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 67. – С. 63–68.

Referencis

1. Bazhynov O.V., Dvadnenko V.Ia., Khakim M. *Konversiiia lehkovoho avtomobilia v hybrydnii*. [The conversion of the car in Hybrid Vehicles]. Kharkiv, KhNADU Publ., 2014. 200 p.
2. Nik Gibbs *Plagin-gibridy budut preobladat' sredi avtomobiley s yelektrofi-cirovannym privodom v Evrope*. [Plug-in hybrids will be dominated among electric vehicles]. Automotive News Europe. *Zhurnal Avtomobil'nyh Inzhenerov* [Magazine of Automotive Engineers]. 2015. no. 6 (95). pp. 20–21.
3. Bazhynov O.V., Smyrnov O.P., Sierikov S.A., Dvadnenko V.I. *Synerhetychnyi avtomobil. Teoriia i praktyka* [Synergetic vehicle. Theory and practice]. Kharkiv, KhNADU Publ., 2011. 236 p.
4. Govorushenko N.Ja. *Tekhnicheskaja yeksp-luatacija avtomobiley*. [Technical operation of the vehicle]. Kharkov, Vysha shkola Publ., 1984. 312 p.
5. Dvadnenko V.Ia. *Raschet osnovnykh harakteristik tjavogogo ventil'nogo yelekt-rodivigatelja na baze avtomobil'nogo gene-ratora*. [Calculation of the main characteristics of the traction valve electric motor based on automobile generator]. *Avtomobil'nyi transport* [Automobile transport], 2014. Vol. 35, pp. 80–86.
6. Mykhalevych M.H. *Analiz dynamiky rozghonu shvydkisnoho avtomobilia klasu E-8, osnashchenoho riznymy variantamy transmisii*. [Analysis of acceleration of class e-8 race car equipped with various transmission options]. *Avtomobylnyi transport* [Automobile transport], 2015. Vol. 37, pp. 111–115.
7. Bazhinov A.V., Dvadnenko V.Ia., Sierikov S.A. *Yeksperimental'noe issledovanie benzinovogo avtomobilja konvertirovan-nogo v gibridnyi* [Experimental research of the gasoline car converted to Hybrid Vehicles]. *Vestnik KhNADU* [Bulletin KhNADU]. 2014. Vol. 67. pp. 63–68.

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