DOI 10.15593/24111678/2016.01.05

УДК 629.3.018

И.В. Попов, П.В. Толмачев, Р.Н. Хмелев

Тульский государственный университет, Тула, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Статья посвящена исследованию экономических и экологических показателей гибридной силовой установки автомобиля при различных режимах эксплуатации. Приведена классификация и рассмотрены основные преимущества гибридных автомобилей. Эксперименты проводились на стенде GNFA HE-3020 «Гибридный автомобиль», имитирующем работу гибридного автомобиля Peugeot 3008 с системой Hybrid4, со следующими характеристиками: мощность дизельного двигателя – 120 кВт, электрического мотора – 27 кВт, суммарный крутящий момент – 500 Н·м (300+200). Рассмотрены возможности и интерфейс программного обеспечения стенда. На стенде проведены исследования движения гибридного автомобиля в режиме ZEV (Zero Emission Vehicle – автомобиль с нулевыми выбросами), на основании которых установлены закономерности влияния скорости движения на путь, пройденный автомобилем только за счет электротяги, в сравнении с данными завода-изготовителя. Проанализировано влияние рекуперативного торможения на заряд аккумуляторной батареи. Установлены закономерности влияния скорости автомобиля, при которой начинается рекуперативное торможение, на эффективность заряда аккумуляторной батареи. Испытания на стенде проводились при трех различных дорожных условиях: ровная поверхность, подъем и спуск с уклоном 5 %. Проведен аналогичный эксперимент по исследованию влияния скорости движения и режимов работы гибридной силовой установки на средний расход топлива и среднюю эмиссию CO₂. На основе полученных результатов в статье приведены графические зависимости среднего расхода топлива и средней эмиссии CO₂ от скорости движения гибридного автомобиля для различных дорожных условий. Сделаны выводы о перспективности и целесообразности использования гибридных автомобилей, определены области их применения.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, расход топлива, экологичность, электродвигатель, система Hybrid4, имитационный стенд.

I.V. Popov, P.V. Tolmachev, R.N. Khmelev

Tula State University, Tula, Russian Federation

THE RESEARCH OF THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF THE HYBRID POWER PLANT OF THE VEHICLE IN DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

The article is devoted to the research of the economic and environmental performance of the hybrid power plant of the vehicle in different operating conditions. The classification and the main advantages of hybrid vehicles were considered. The experiments were conducted using of the stand GNFA HE-3020 “Hybrid vehicle”, simulating the operation of the hybrid vehicle Peugeot 3008 with Hybrid4 system, with the following characteristics: diesel engine power – 120 kW, electric motor – 27 kW, the total torque – 500 N·m (300+200). The possibilities and the interface of stand software were consid-

ered. On the stand made a motion study of a hybrid vehicle mode ZEV (Zero Emission Vehicle – a car with zero emissions), on the basis of which the regularities of the influence of speed on the path traversed by the vehicle only on the electric drive train in comparison with the data of the manufacturer. The influence of regenerative braking on the battery were analyzed. The regularities of influence of vehicle speed, at which begins the regenerative braking on the efficiency charging of the battery, were fixed. The stand tests were conducted at three different road conditions: smooth surface, ascent and descent with a slope of 5 %. Conducted a similar experiment on the effect of speed and power modes of the hybrid power plant on average fuel consumption and average CO₂ emissions. On the basis of the results the article presents graphic dependences of the average fuel consumption and average CO₂ emissions on the speed of movement of the hybrid car for different road conditions. The conclusions about the prospects and the feasibility of using hybrid vehicles were made, the areas of their application were identified.

Keywords: hybrid vehicle, hybrid power plant, fuel consumption, ecology, electromotor, the Hybrid4 system, imitation stand.

За последние несколько лет существенно возросло количество автомобилей с гибридными силовыми установками (ГСУ) – автомобилей, в которых в качестве первичного источника энергии используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС), а вторичным является электрический накопитель энергии, сопряженный с электромеханической системой привода ведущих колес [1].

Тенденция к увеличению производства гибридных автомобилей обусловлена принципиальным повышением требований международных стандартов к экологической безопасности и экономичности транспортных средств. В то же время в зависимости от условий эксплуатации расход топлива и выбросы вредных веществ в отработанных газах не всегда совпадают с данными заводов-изготовителей. В связи с этим оценка топливной экономичности и экологичности гибридных автомобилей в различных условиях эксплуатации становится актуальной задачей [2–4].

Установлено, что средний расход топлива гибридных моделей обычно не превышает 6,5 (4,8) л/100 км в городском (загородном) режиме движения. Для полноприводных машин – 10,6 (7,6) л/100 км [5, 6].

Автомобили с ГСУ способны обеспечить выполнение требований наиболее жестких экологических стандартов. При этом расход топлива снижается на 10–80 % (в зависимости от пройденного расстояния и условий движения), а выбросы в атмосферу токсичных компонентов отработанных газов – на 20–90 %, без ухудшения тягово-скоростных характеристик автомобиля [7, 8].

В современных гибридных автомобилях передача энергии от первичного двигателя на ведущие колеса реализована по одной из нескольких схем: последовательной, параллельной и смешанной [9].

Наиболее совершенной является смешанная схема, так как она сочетает в себе преимущества последовательной и параллельной: использование двигателя внутреннего сгорания в режиме максимальной отдачи и высокая мощность благодаря использованию двух ресурсов одновременно [10].

Цель работы заключается в получении и последующем анализе экономических (средний расход топлива) и экологических (средняя эмиссия CO₂) показателей гибридной силовой установки в различных условиях эксплуатации. Экспериментальные данные были получены на стенде GNFA HE-3020 «Гибридный автомобиль», имитирующем работу автомобиля Peugeot 3008 Hybrid4 (рис. 1) [11].

Рис. 1. Общий вид стенда GNFA HE-3020

Система Hybrid4 приведена на рис. 2 и представляет собой объединение двух силовых агрегатов – дизельного двигателя HDi, приводящего в движение передние колеса (т.е. работающего на передний привод), и электрического мотора, вращающего задние колеса (т.е. обеспечивающего работу заднего привода). Эти двигатели могут работать раздельно и в паре – в зависимости от выбранного режима работы гибридного привода и условий дорожного движения. Мощность дизельного двигателя составляет 120 кВт (163 л.с.), а электрического мотора – 27 кВт (37 л.с.). Суммарный крутящий момент – 500 Н·м (300+200) [12].

Рис. 2. Схема гибридной силовой установки
Peugeot 3008 Hybrid4

При проведении исследований использовалось программное обеспечение стенда. Интерфейс программного обеспечения стенда (рис. 3) включает:

1. Мультимедийное окно.
2. Кнопки тест-драйва (слева направо): обновление, уменьшение скорости воспроизведения видео (10-кратное), выбор маршрута тест-драйва, круиз-контроль.
3. Мультимедийные кнопки: генератор переменного тока, коробка передач, аккумуляторная батарея высокого напряжения, главная передача, двигатель внутреннего сгорания, электронная система управления, электродвигатель.
4. Индикатор заряда аккумулятора высокого напряжения.
5. Меню обучающих материалов (слева направо): материалы для самообучения, видео, игра в серьезных условиях.
6. Информационное окно.
7. Окно параметров тест-драйва.

Окно параметров тест-драйва использовалось для определения в режиме реального времени основных показателей работы автомобиля, а именно:

- мощности силовой установки;
- заряда аккумуляторной батареи,

- пройденной дистанции;
- времени работы и остановки двигателей;
- положения педали акселератора и тормоза;
- среднего и мгновенного потребления топлива;
- средней эмиссии CO₂.

Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения стенда HE-3020

Управление работой гибридного автомобиля на стенде осуществлялось при помощи органов управления, идентичных реальному автомобилю. В частности, режимы работы гибридного автомобиля задавались при помощи селектора, приведенного на рис. 1 и включающего четыре режима работы:

1. Auto – в этом режиме система автоматически управляет работой дизеля и электродвигателя в паре и отдельно, с учетом настроек и возможностей автомобиля, условий дорожного движения и стиля вождения.

2. Sport – электродвигатель практически не используется, при этом аккумулятор активно заряжается при торможении.

3. 4WD – дизельный двигатель постоянно работает на передний привод, а электрический – приводит в движение задние колеса.

4. ZEV (Zero Emission Vehicle – автомобиль с нулевыми выбросами) – движение автомобиля обеспечивается только на электрической тяге.

На стенде были проведены исследования и выполнен анализ работы гибридного автомобиля в режиме ZEV [13–15]. Эксперимент заключался в измерении расстояния, пройденного автомобилем в режиме ZEV, до момента автоматического включения в работу ДВС. Эксперимент проводился при постоянных скоростях движения, равных 20, 40 и 60 км/ч, на горизонтальной дороге с асфальтобетонным покрытием. При скорости свыше 60 км/ч в работу автоматически включался ДВС.

На основе полученных результатов построен график зависимости пройденного пути от скорости движения гибридного автомобиля в режиме ZEV (рис. 4). На скоростях движения автомобиля до 60 км/ч ДВС начинал включаться при снижении уровня заряда аккумуляторной батареи ниже 22 %. При скорости 60 км/ч двигатель начинал работать уже при разряде в 49 %.

График, изображенный на рис. 4, имеет нелинейную зависимость. Запас хода при 20 км/ч составил 4,66 км. При скорости в 60 км/ч – 1,81 км, что близко к значению, заявленному заводом-изготовителем и равному 2 км [12].

Рис. 4. Запас хода на электрической тяге

Также на стенде были проведены исследования работы системы рекуперативного торможения гибридного автомобиля. При рекуперативном торможении тяговый электродвигатель переключается в режим генератора; электрическая энергия, вырабатываемая мотор-генератором во время торможения, используется для дополнительной подзарядки тяговой высоковольтной аккумуляторной батареи. Измерения

продолжительности зарядки источника питания проводились при сбросе педали акселератора со скоростей 20, 40, 60, 80 и 100 км/ч до полной остановки автомобиля. Эксперимент проводился при трех различных дорожных условиях: уклон 0 %, подъем и спуск с уклоном 5 %. По результатам эксперимента был построен график зависимости $Z = f(V)$, представленный на рис. 5, где Z – процент заряда аккумуляторной батареи.

Рис. 5. Зарядка аккумуляторной батареи рекуперативным торможением

Эксперименты на стенде по определению среднего расхода топлива и средней эмиссии CO_2 гибридного автомобиля проводились при скоростях 20, 40 и 60 км/ч на маршруте протяженностью 2 км в режиме Auto. Заряд аккумуляторной батареи перед проведением испытаний был равен 20 % от максимальной емкости. Эксперименты проводились при дорожных условиях, рассмотренных ранее. Основные полученные результаты представлены на рис. 6, 7.

Из графиков видно, что с ростом скорости увеличивается как расход топлива, так и эмиссия CO_2 . Однако при движении на спуск со скоростью свыше 40 км/ч данные параметры начинают уменьшаться. Это связано с тем, что заряд аккумуляторной батареи благодаря рекуперативному торможению происходит быстрее и электродвигатель чаще включается в работу.

Рис. 6. Зависимость среднего расхода топлива от скорости движения

Рис. 7. Зависимость средней эмиссии CO_2 от скорости движения

На основе проведенных на стенде GNFA HE-3020 экспериментов можно сделать вывод, что наибольшая эффективность гибридных автомобилей наблюдается при эксплуатации на небольших скоростях (в условиях города), когда расход топлива минимален. Таким образом, наличие гибридной силовой установки на транспортном средстве обеспечивает существенную экономию топлива, значительное сниже-

ние экологически вредных выбросов, уменьшение суммарного времени работы ДВС, что положительно сказывается на потребительских качествах таких автомобилей в сравнении со стандартными автомобилями.

Список литературы

1. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учеб. пособие / С.В. Бахмутов, А.Л. Карунин, А.В. Круташов [и др.].. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 71 с.
2. Александров И.К., Раков В.А., Щербакова А.А. Перспективы развития транспортных средств с электроприводом // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 4. – С. 65–68.
3. Борисенко А.О. Сравнительный анализ топливной экономичности гибридных автомобилей // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 25–28.
4. Петров Р.Л. Насколько реальны заявленные показатели расхода топлива и эмиссии CO₂ для гибридных автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 2 (91). – С. 45–50.
5. Раков В.А. Развитие парка гибридных автомобилей // Мир транспорта. – 2013. – № 1. – С. 52–59.
6. Раков В.А. Эксплуатация и обслуживание автомобилей с гибридными силовыми установками: моногр. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 143 с.
7. Смирнов О.П. Направления повышения топливной экономичности автотранспортных средств // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 201–204.
8. Бажинов А.В., Двадненко В.Я., Сериков С.А. Повышение экономичности и экологической безопасности транспортных средств с гибридными силовыми установками // Наукові нотатки. – 2010. – № 28. – С. 40–45.
9. Дьяков А.В. Исследование парка гибридных автомобилей как наиболее экологичных серийных транспортных средств. Перспективы его развития // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 2. – С. 147–158.

10. Service Training. Программа самообучения 450. Touareg с гибридным силовым агрегатом. Устройство и принцип действия. – 2011. – 79 с.

11. Академия автомобильной диагностики GNFA [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gnfa-auto.ru> (дата обращения: 20.01.2016).

12. Peugeot [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.peugeot.com/en/products-services/cars/new-3008-hybrid4> (дата обращения: 21.01.2016).

13. Анализ результатов испытаний экспериментального гибридного автомобиля в городском ездовом цикле / С.А. Сериков, В.Я. Двадненко, Ю.Н. Бороденко, Е.А. Серикова // Автомобильный транспорт. – 2014. – № 34. – С. 16–21.

14. Карнаухов В.Н., Тишин М.М. Энергоэффективные и энергосберегающие технологии эксплуатации автомобиля с гибридной силовой установкой // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2012. – С. 181–184.

15. Куликов И.А., Селифонов В.В., Филонов А.И. Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливно-экономических свойств // Известия МГТУ МАМИ. – 2010. – № 2. – С. 44–51.

References

1. Bakhmutov S.V., Karunin A.L., Krutashov A.V. [et al.]. Konstruktivnye skhemy avtomobilei s gibridnymi silovymi ustanovkami [The design scheme of vehicles with hybrid power plants]. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet “MAMI”, 2007. 71 p.

2. Aleksandrov I.K., Rakov V.A., Shcherbakova A.A. Perspektivy razvitiia transportnykh sredstv s elektropivodom [Prospects of the development of vehicles with electric drive]. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2011, no. 4, pp. 65-68.

3. Borisenko A.O. Sravnitel'nyi analiz toplivnoi ekonomichnosti gibridnykh avtomobilei [Comparative analysis of the fuel efficiency of hybrid vehicles]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse”*. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 25-28.

4. Petrov R.L. Naskol'ko real'ny zaiavlennyye pokazateli raskhoda topliva i emissii CO₂ dlia gibridnykh avtomobilei [How realistic is the stated fuel economy and CO₂ emissions for hybrid vehicles]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2015, no. 2 (91), pp. 45-50.

5. Rakov V.A. Razvitie parka gibridnykh avtomobilei [The development of the park of hybrid vehicles]. *Mir transporta*, 2013, no. 1, pp. 52-59.

6. Rakov V.A. Ekspluatatsiia i obsluzhivanie avtomobilei s gibridnymi silovymi ustanovkami [Operation and service of vehicles with hybrid power plants]. Vologodskii gosudarstvennyi universitet, 2014. 143 p.

7. Smirnov O.P. Napravleniia povysheniia toplivnoi ekonomichnosti avtotransportnykh sredstv [Directions of increasing fuel efficiency of vehicles]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 201-204.

8. Bazhinov A.V., Dvadenko V.Ia., Serikov S.A. Povysenie ekonomichnosti i ekologicheskoi bezopasnosti transportnykh sredstv s gibridnymi silovymi ustanovkami [The increasing of fuel economy and environmental safety of vehicles with hybrid power plants]. *Naukovi notatki*, 2010, no. 28, pp. 40-45.

9. D'iakov A.V. Issledovanie parka gibridnykh avtomobilei kak naibolee ekologichnykh seriinykh transportnykh sredstv. Perspektivy ego razvitiia [The research of park of hybrid vehicles as the most environmentally friendly means of transport. The prospects of its development]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Ekologiya i nauchnotekhnicheskii progress. Urbanistika"*. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, vol. 2, pp. 147-158.

10. Service Training. Programma samoobucheniia 450. Touareg s gibridnym silovym agregatom. Ustroistvo i printsip deistviia [Service Training. Self-Study Programme 450. Touareg with hybrid power plant. Design and function]. 2011. 79 p.

11. Akademiia avtomobil'noi diagnostiki GNFA [The academy of vehicle diagnostic GNFA], available at: <http://www.gnfa-auto.ru> (accessed 20 January 2016).

12. Peugeot, available at: <http://www.peugeot.com/en/products-services/cars/new-3008-hybrid4> (accessed 21 January 2016).

13. Serikov S.A., Dvadenko V.Ia., Borodenko Iu.N., Serikova E.A. Analiz rezul'tatov ispytaniia eksperimental'nogo gibridnogo avtomobilia

v gorodskom ezdovom tsikle [The analysis of the results of the experimental hybrid vehicle in urban driving cycle]. *Avtomobil'nyi transport*, 2014, no. 34, pp. 16-21.

14. Karnaukhov V.N., Tishin M.M. Energoeffektivnye i energosberegaiushchie tekhnologii ekspluatatsii avtomobilia s gibridnoi silovoi ustanovkoi [The energy efficient and the energy saving technology of vehicle operation with hybrid power plant]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Problemy funktsionirovaniia sistem transporta"*. Tiumenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet, 2012, pp. 181-184.

15. Kulikov I.A., Selifonov V.V., Filonov A.I. Poisk optimal'nogo upravleniia gibridnoi silovoi ustanovkoi avtomobilia po kriteriiu balansa ego ekologicheskikh i toplivno-ekonomicheskikh svoistv [The search of optimal control for the hybrid power plant of vehicle to the criterion of balance between its environmental and fuel-economy properties]. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*, 2010, no. 2, pp. 44-51.

Получено 12.02.2016

Об авторах

Попов Иван Вячеславович (Тула, Россия) – магистрант кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Тульского государственного университета (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: iv3311@yandex.ru).

Толмачев Павел Владимирович (Тула, Россия) – магистрант кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Тульского государственного университета (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: pvtolmachev@mail.ru).

Хмелев Роман Николаевич (Тула, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Тульского государственного университета (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: aiah@yandex.ru).

About the authors

Ivan V. Popov (Tula, Russian Federation) – Master Student, Department of Motor Transport and Motor Car Industry, Tula State University (92, Lenin av., Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: iv3311@yandex.ru).

Pavel V. Tolmachev (Tula, Russian Federation) – Master Student, Department of Motor Transport and Motor Car Industry, Tula State University (92, Lenin av., Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: pvtolmachev@mail.ru).

Roman N. Khmelev (Tula, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Motor Transport and Motor Car Industry, Tula State University (92, Lenin av., Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: aiah@yandex.ru).