

УДК 629.3.02-83-843

Красавин Павел Александрович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, palsecamich@yandex.ru

Шабанов Александр Викторович, канд. техн. наук, научный сотрудник,
Центр испытаний ФГУП «НАМИ», Россия, 141830, Московская обл.,
Дмитров-7, Посёлок Автополигон, saaha-1955@mail.ru

Шабанов Андрей Александрович, инженер, директор,
ООО «Сириус», Россия, 127572, Москва, Илимская ул., 2, saaha-1955@mail.ru

К ВЫБОРУ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ КАТЕГОРИИ М1

Аннотация. В статье приведены результаты исследования алгоритма управления силовой установкой гибридного автомобиля Toyota Prius разных серий выпуска. В имеющейся технической литературе отсутствуют общепринятые критерии, по которым можно выбрать параметры и тип силовой установки при проектировании автомобилей с комбинированной энергетической установкой (КЭУ). Об этом свидетельствуют различия в выборе конструкторских решений, а также различные экспериментальные результаты по топливной экономичности у разработанных образцов автомобилей с КЭУ. Рассмотрены критерии выбора алгоритма управления силовой установкой и её параметры. Проанализирована принципиальная схема силовой установки автомобиля Toyota Prius и её конструктивные особенности. Проведённый анализ функционирования силовой установки показал, что для реализации оптимального, с точки зрения экономичности, алгоритма работы КЭУ необходим правильный подбор мощности электродвигателя, который обеспечит движение на электротяге в широком диапазоне её работы. Рассмотрена работа аккумуляторной батареи и критерии, обеспечивающие её оптимальное функционирование в составе силовой установки. Приведена сравнительная оценка топливной экономичности гибридного автомобиля Toyota Prius разных серий относительно аналога – автомобиля Toyota Corolla.

Ключевые слова: силовая установка, гибридный автомобиль, автомобиль Toyota Prius, закон управления, максимальная эффективность, зарядная энергия, аккумуляторная батарея.

Krasavin Pavel A., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, palsecamich@yandex.ru

Shabanov Alexander V., Ph. D., researcher,
NAMI's Testing Centre, pos. Avtopoligon (Autorange),
Dmitrov district, Moscow Region, 141830, Russia, saaha-1955@mail.ru

Shabanov Andrej A., engineer, director,
LLC «Sirius», 2, Ilimskaya street, Moscow, 127572, Russia, saaha-1955@mail.ru

THE CHOICE OF CONTROL ALGORITHM THE POWER UNIT OF A HYBRID VEHICLE OF CATEGORY M1

Abstract. The article presents the results of a study of control algorithm the power plant of the hybrid car Toyota Prius a different issue. In the existing technical literature, there are no generally accepted criteria by which to select the parameters and type of power plant in the design of vehicles with a combined power unit (KEU). This is evidenced by the differences in the selection of design solutions, as well as various experimental results on fuel efficiency have developed car designs with a hybrid powertrain. Reviewed selection criteria of the control algorithm for the power plant and its parameters. Analyzed schematic diagram of a powertrain of the Toyota Prius and its design features. The analysis of the functioning of the power plant showed that the implementation of optimal, from the point of view of efficiency, the algorithm KEU necessary the correct selection of motor power, which ensures the movement of the electric range in a wide range of her work. The work of the battery and the criteria for ensuring its optimal functioning in the structure of the power plant. Comparative evaluation of fuel efficiency of the hybrid car Toyota Prius of the different series relative to the equivalent – of a Toyota Corolla.

Key words: power plant, hybrid cars, Toyota Prius, control, maximum efficiency, battery energy, battery.

Введение

При разработке новых автомобилей перед конструкторами ставятся задачи достижения высоких показателей по топливной экономичности и низких выбросов вредных веществ с отработанными газами ДВС. Этим требованиям удовлетворяют в большей степени автомобили с электроприводом. Они обеспечивают на 30–50% улучшение топливно-экономических и экологических показателей, а также снижение выбросов CO₂, и выполняют установленные в настоящее время экологические нормы ЕВРО 5 с многократным запасом [1, 2]. Снижение вредных выбросов с отработанными газами у гибридных автомобилей (ГА) осуществляется за счёт увеличения доли работы электромотора на различных режимах, в том числе при пуске при низких температурах и при малых нагрузках ДВС. Благодаря передовым технологиям производство автомобилей с электроприводом во всём мире стремительно развивается. В последние

годы все ведущие автомобильные компании мира освоили производство гибридных автомобилей и представили их на мировой рынок.

Имеющаяся в технической литературе информация свидетельствует о том, что у западных специалистов нет единого подхода по выбору конструкции и алгоритма управления силовой установкой (СУ).

Конструкторские решения и схемы управления СУ зарубежные фирмы на ГА используют разные, и результаты по топливной экономичности на разработанных образцах автомобилей также различные [2, 3].

При выборе алгоритма управления силовой установкой основным критерием оптимальности работы силовой установки является минимальный расход топлива (максимальная энергоэффективность). Снижение расхода топлива у ДВС гибридного автомобиля достигается за счёт работы ДВС в зоне минимальных удельных расходов топлива. Важным является и оптимальный выбор алгоритма включения в работу агрегатов электротяги и использование рекуперации энергии торможения автомобиля. Для получения максимальной энергоэффективности эти режимы ДВС должны быть использованы в алгоритме управления СУ. Следует также учитывать, что для успешного функционирования системы аккумулирования электрической энергии силовой установки и разрядно-зарядного процесса на батарее необходим правильный выбор ёмкости аккумуляторной батареи. При движении автомобиля по испытательным циклам необходимо поддерживать заряд батарей на определённом оптимальном уровне, который определяется зарядной мощностью генератора и тяговой мощностью электродвигателя.

Для реализации оптимального, с точки зрения экономичности, алгоритма важно также на ГА обеспечить необходимую максимальную мощность электродвигателя, которая определяется выбранным алгоритмом работы СУ. Тяговый электродвигатель должен обеспечить весь заданный алгоритмом силовой диапазон нагрузок автомобиля. Правильно выбранная

мощность электродвигателя обеспечит работу СУ на электротяге в широком диапазоне нагрузок городского и магистрального цикла движения. Суммарная мощность гибридной силовой установки может превышать мощность ДВС автомобиля аналога. В данном варианте можно получить эффект улучшения динамических качеств гибридного автомобиля за счёт использования тяговой характеристики электродвигателя, имеющей максимальный крутящий момент на низких частотах вращения приводного вала.

Наилучших показателей в рассматриваемом направлении добились специалисты фирмы Toyota на гибридном автомобиле Toyota Prius, впервые представленном в 1997 г. на мировом рынке ГА [2, 3]. В этой связи интерес представляет анализ алгоритма работы СУ и её принципиальной схемы, а также режимов работы силового агрегата с целью определения критериев управления алгоритмом СУ на проектируемых автомобилях. Определить выбранный закон управления силовой установкой на гибридных автомобилях можно, исследовав режимы работы силовых агрегатов, частоты вращения коленчатого вала и нагрузки ДВС, режимы подключения электротяги, функционирование мотор-генератора и режимы зарядки-разрядки аккумуляторной батареи.

Анализ схемы силовой установки автомобиля Toyota Prius

На рисунке 1 приведены экраны-мониторы работы СУ автомобиля Toyota Prius разных серий выпуска, показывающие направление потока мощности в СУ автомобиля при изменении нагрузочных и скоростных режимов. Они показывают режимы зарядки-разрядки аккумуляторной батареи, режимы включения в работу мотор-генератора и электродвигателя. Рассмотрим более подробно закон управления СУ.



а

б

*Рис. 1: а – экран-монитор гибридной силовой установки;
б – дисплей Eco Drive автомобиля Toyota Prius, применяемый в различных сериях ГА [3]*

На автомобиле применена наиболее сложная смешанная схема силовой установки. Данная конструкция СУ, представленная на рис. 2, может работать как последовательно, так и параллельно. В данной схеме используется планетарный механизм для передачи крутящего момента на трансмиссию автомобиля. Он имеет высокий КПД при передаче энергии от ДВС к ведущим колёсам. Следует отметить, что в практике автомобилестроения на легковых автомобилях с автоматическими коробками передач достаточно широко используется трансмиссия с механическим редуктором планетарного типа. Преимущества этого редуктора заключаются в достаточно компактной его конструкции и возможности передавать относительно большую мощность по сравнению с другими передачами. Планетарный редуктор также отличается от обычной передачи увеличенной долговечностью из-за низких контактных и изгибных напряжений в зацеплении зубьев.

При последовательной схеме привода ДВС передает энергию только генератору. Механическая энергия ДВС в генераторе преобразуется в электрическую и поступает на электроагрегаты СУ. Поток мощности в редукторе от ДВС может разделяться. Одна его часть идёт

на электродвигатель, а другая поглощается генератором и направляется на заряд батареи. Это позволяет максимально эффективно использовать режимы минимальных расходов топлива ДВС. Электронная система управления PCU Hybrid Synergy Drive координирует весь процесс управления силовой установкой для получения максимальной эффективности использования режимов ДВС и электропривода.

При торможении автомобиля используется режим рекуперации энергии на накопителе – аккумуляторной батарее. Уровень рекуперации энергии на накопитель зависит от интенсивности торможения и степени заряженности тяговой батареи. Процесс замедления и торможения является наиболее эффективным способом зарядки аккумуляторной батареи. При интенсивных и экстренных торможениях энергия торможения в большей степени поглощается механической системой тормозов.

При выключении ДВС потребление энергии электродвигателем осуществляется от аккумуляторной батареи. Управление включением ДВС может осуществляться от датчика заряда (разряда) аккумуляторной батареи. Если мощности ДВС для движения ГА недостаточно, например, при ускорении автомобиля в циклах городского или магистрального движения, то в этом случае дополнительно включается тяговый электродвигатель, потребляя энергию от аккумуляторной батареи, и СУ работает по параллельной схеме. Электромотор включается в работу также на малых нагрузках, осуществляет запуск ДВС при остановках на этапах движения в городском цикле. Это обеспечивает низкий расход топлива автомобилем.

В таблице 1 приведены основные характеристики гибридных автомобилей Toyota и её аналога. На автомобиле Toyota Prius было получено снижение расхода топлива на 55% в европейском городском цикле EU и на 42% в смешанном цикле относительно аналога Toyota Corolla [2, 3].

Таблица 1

Характеристики гибридных автомобилей и их аналогов [3]

Автомобили	Масса автомобиля, кг	Рабочий объём ДВС, л	Мощность ДВС, кВт	Мощность электро-двигателя, кВт	Суммарная мощность СУ, кВт	Расход топлива л/100 км
Toyota Corolla (бензиновый)	1250–1750	1,8	108	–	–	EU 8,7/5,5/6,7
Toyota Corolla (гибрид)	1380–1805	1,8	73	60	100	EU 3,8/3,8/3,8
Toyota Prius (гибрид 3 и 4 серии)	1370–1805	1,8*	73	60	100	EU** 3,9/3,7/3,9 EPA*** 6,2/5,6/5,9

* с 1997 по 2011 гг. на автомобиле устанавливался ДВС с рабочим объёмом 1,5 л, с 2009 г. – 1,8 л.

** EU – европейские испытательные циклы: городской / магистральный / смешанный.

*** EPA – американские, более нагруженные испытательные циклы

Расход топлива q_c в смешанном цикле учитывает время работы автомобиля в городских ($q_{г.}$) и в загородных ($q_{з.}$) условиях. Величина q_c определяется по формуле [4]:

$$q_c = 0,36q_{г.} + 0,64q_{з.}$$

Данные смешанного испытательного цикла наиболее полно соответствуют реальному расходу топлива при эксплуатации автомобиля.

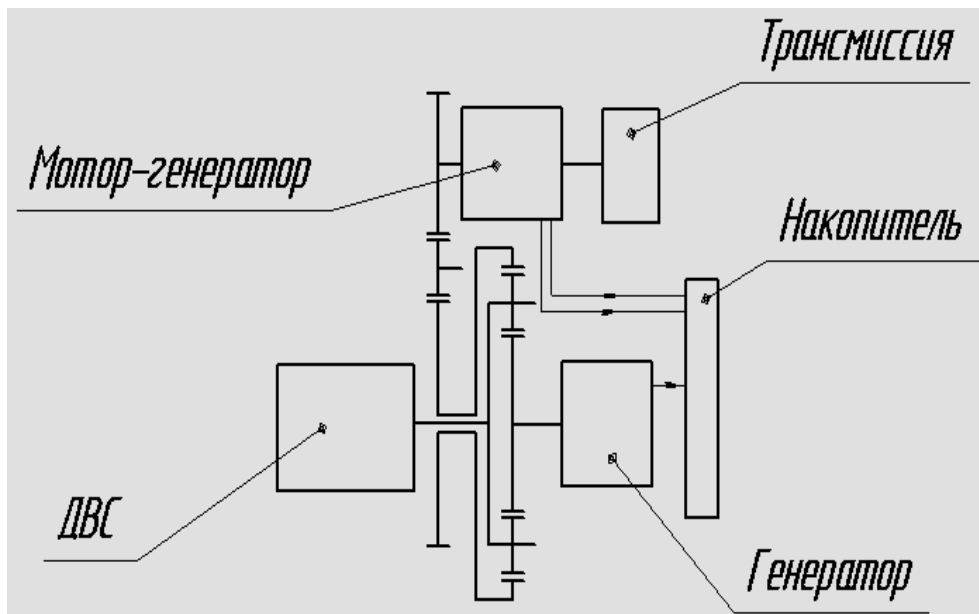
Работа силовых агрегатов автомобиля Toyota Prius

В применённой на названном автомобиле схеме используются датчики скоростного, нагрузочного режима работы и датчики уровня зарядки аккумуляторной батареи. Уровень зарядки батареи (SOS) является одним из важнейших параметров, определяющим алгоритм работы силовой установки. Как показали расчётно-экспериментальные исследования движения ГА по циклам Правил № 83 ООН, для повышения эффективности работы СУ величина SOS в конце испытательного цикла

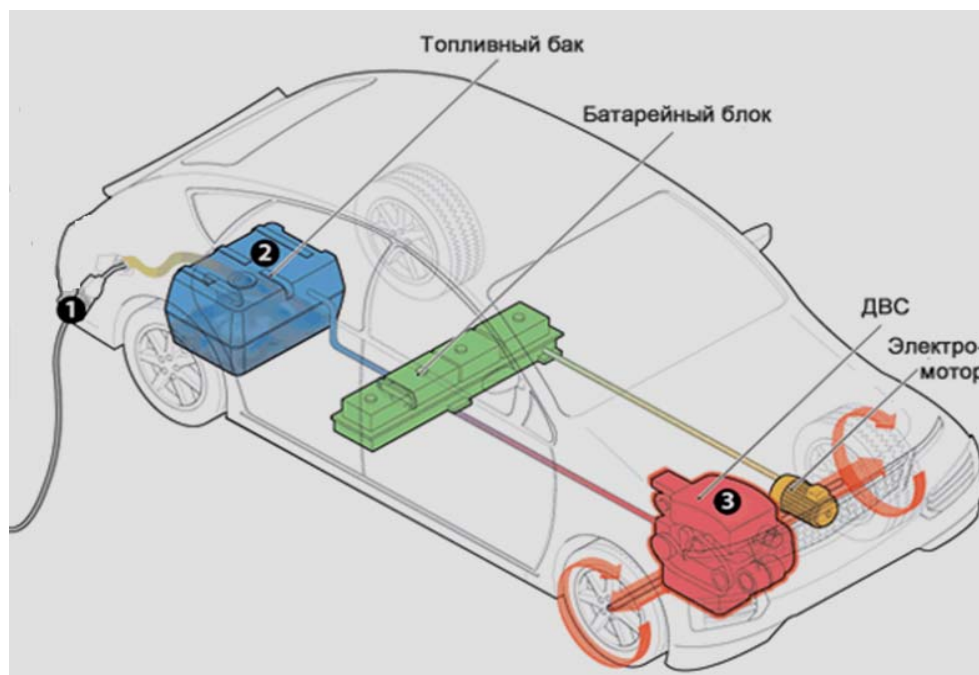
должна быть равна начальному значению. Для этого система управления СУ должна поддерживать равенство разрядной и зарядной энергии на аккумуляторной батарее. Большое значение имеет и уровень зарядки батареи, для того чтобы батарея могла воспринимать заряд от генератора в случае изменения нагрузочных и скоростных режимов автомобиля и обеспечить работу ДВС в зоне минимальных эффективных расходов топлива. За счёт этого можно обеспечить до 40% снижения расхода топлива [2, 5].

Следует также напомнить, что для обеспечения высокого ресурса и нормальной работы аккумуляторной батареи требуется не допускать полную разрядку батареи. Остаток энергии в батарее должен быть ~ 20%, а степень заряженности аккумуляторных батарей следует ограничить ~ 90%. Это объясняется тем, что при полностью заряженной батарее происходит деградация электролита литий-ионной аккумуляторной батареи, а при полностью разряженной батарее происходит деградация катода батареи. У никель-металлогидридной аккумуляторной батареи этого не происходит и после полной разрядки они полностью восстанавливаются [7]. Блок автоматики СУ включает зарядку аккумуляторной батареи, если SOS достигает нижней допустимой границы и выключает зарядку при достижении верхнего предела. Подача сигнала на монитор электронной системой позволяет водителю также контролировать ситуацию для обеспечения оптимального функционирования работы аккумуляторной батареи и силовой установки.

Составляющие дорожной нагрузки определяют мощность СУ автомобиля. Применение электротяги в СУ ГА ограничивается мощностью электродвигателя, зарядной энергией и мощностью накопителя энергии. Следует отметить, что если на первых образцах автомобиля Toyota Prius устанавливался электродвигатель мощностью 30 кВт, то на последних моделях его мощность была увеличена до 60 кВт.



а



б

Рис. 2: а – кинематическая схема СУ ГА;
б – схема расположения агрегатов СУ на автомобиле Toyota Prius [3]

На рисунке 3 приведена разрядно-зарядная характеристика аккумуляторной батареи и показана её работа в двух вариантах: с разрядом батареи до нижнего 20%-го предела и при неполном её разряде. В первом случае батарея работает в оптимальном, с точки зрения

энергоэффективности, режиме, а во втором (верхняя кривая) её ёмкость используется не полностью. В работе [6] рассматривался вопрос выбора нижнего предела зарядки аккумуляторной батареи силовой установки гибридного автомобиля. Авторами предлагается ограничить нижний уровень границы зарядки SOS в 30–40%. Однако для оптимизации удельных энергетических и массогабаритных показателей аккумуляторных батарей следует выбирать максимальный рабочий диапазон батареи, расположенный между допустимыми нижним и верхним пределами разрядки и зарядки аккумуляторной батареи.

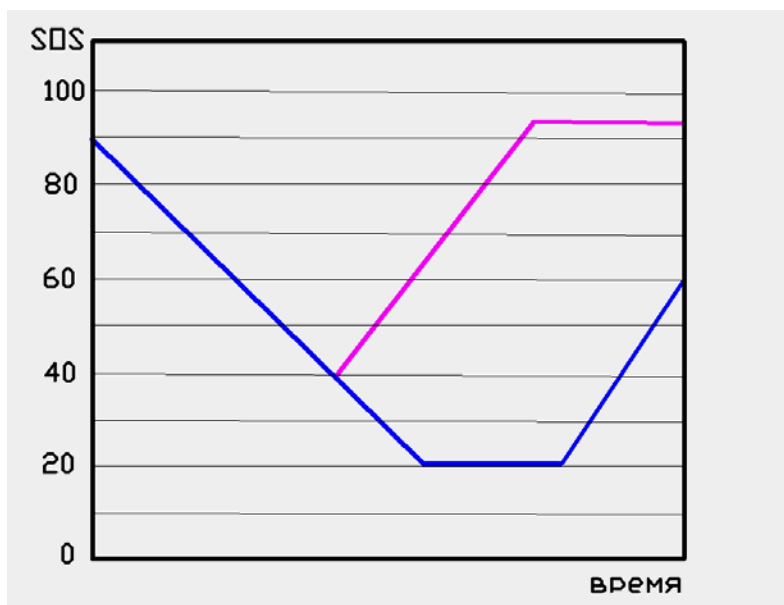


Рис. 3. Разрядно-зарядная характеристика аккумуляторной батареи

Расчёты по составляющим, входящим в уравнения движения автомобиля, показывают, что наибольшее значение на мощность влияют потери при разгоне. Мощность при определённой массе автомобиля и моменте его инерции определяется величиной ускорения и конечной скоростью разгона. Завышенная мощность и соответственно рабочий объём двигателя у обычного автомобиля позволяет иметь достаточно интенсивную разгонную характеристику и большую максимальную скорость автомобиля, но это приводит к существенному увеличению

расхода топлива не только на режимах максимальных нагрузок, но и на малых нагрузках [4]. Правильный подбор мощности силовых агрегатов и выбор оптимального алгоритма работы силовой установки позволяет значительно снизить расход топлива гибридного автомобиля.

На автомобилях Toyota Prius применяются никель-металлгидридные аккумуляторные батареи (Ni-MH) емкостью 0,4 кВт·ч [3, 7]. Батарея состоит из 28 модулей, в которые входят 168 аккумуляторов напряжением по 1,2 В. С 2013 года на подзаряжаемом гибриде Toyota Prius Plug-in стали устанавливаться аккумуляторы большей ёмкости – 6,5 кВт·ч. Удельная ёмкость батареи составляет $qEm = 0,055$ кВт·ч/кг, а передаваемая электродвигателю мощность 27 кВт. На автомобилях последней модели Toyota Prius Plug-in также устанавливаются Li-Ion аккумуляторы, которые имеют в два раза большую удельную плотность энергии, поэтому ёмкость у них снижена до 4,4 кВт·ч, но передаваемая мощность батарей осталась на прежнем уровне. Для её полного заряда достаточно 90 минут. Запасаемой аккумуляторной батареей энергии хватает на преодоление расстояния в 24 км. На автомобиле имеется три режима работы СУ: это режим электромобиля – EV; экологический режим ECO, уменьшающий скорость отклика дроссельной заслонки при энергичных нажатиях на педаль акселератора, и динамичный режим – PWR, при котором чувствительность педали газа увеличивается, что позволяет развивать большую мощность, чем в обычном режиме.

Расчёты нагрузок городского и магистрального циклов по Правилам № 83 ООН показывают, что энергии и мощности батареи достаточно для движения автомобиля по циклам в режиме электротяги. Автомобиль Toyota Prius Plug-in отличается от предыдущих моделей тем, что КЭУ по времени намного больше работает в последовательном режиме, что позволило почти в два раза снизить расход топлива на автомобиле.

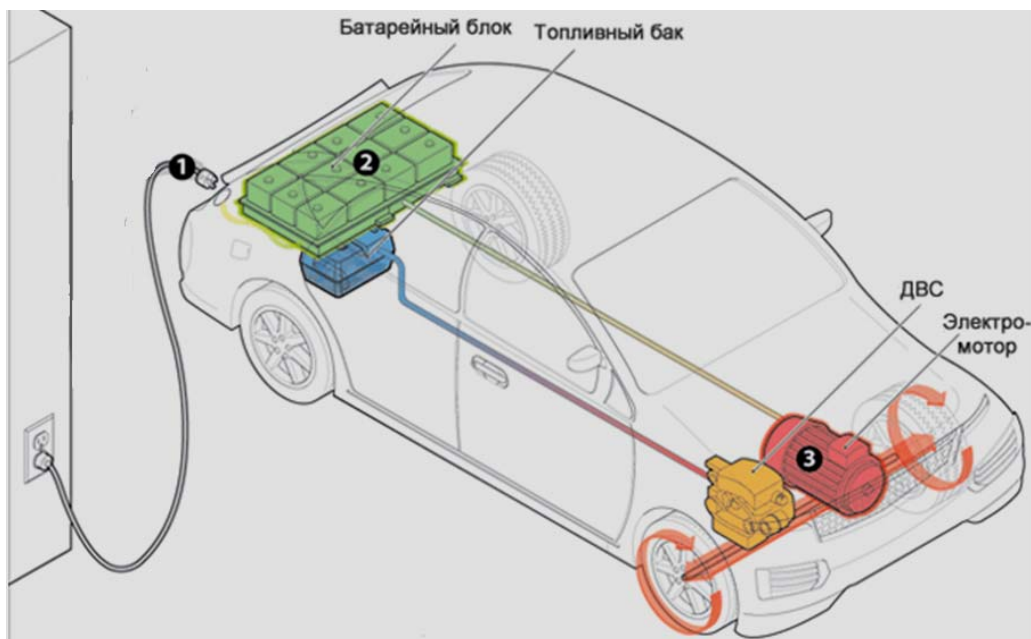


Рис. 4. Расположение силовых агрегатов на автомобиле Toyota Prius Plug-in

Испытание по определению расхода топлива по Правилам № 101 ООН проводят на двух режимах: с полностью заряженной батареей и при минимальной её зарядке, поэтому при минимальной зарядке батареи в городском цикле используется ДВС и расход топлива автомобиля составляет 2,1 л/100 км [8].

Заключение

Таким образом, проведённый анализ показал, что выбранная схема и алгоритм управления силовой установкой автомобиля Toyota Prius позволяют ДВС работать в оптимальной зоне многопараметрической характеристики. Для реализации оптимального, с точки зрения экономичности, алгоритма выполнен правильный подбор мощности электродвигателя и разрядной мощности аккумуляторной батареи. Это обеспечивает работу на электротяге в широком диапазоне работы силовой установки, что позволяет значительно снизить расход топлива гибридного автомобиля. Использование электроэнергии на автомобиле в несколько раз выгодней, чем нефтяного топлива. Поэтому на последней модели

автомобиля Toyota Prius Plug-in применяется батарея большей мощности, которая имеет подзарядку от стационарного источника питания.

Список литературы

1. Гибридные автомобили. Пути повышения их энергетической эффективности / Д.А. Загарин [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2016. – № 1. – С. 4–7.
2. Гибрид идёт на обгон / Д.А. Загарин [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2013. – № 9–10. – С. 28–30.
3. Каталоги автомобилей 2009–2015 гг. *Automobil revue*.
4. Шабанов, А.А. Выбор мощности для гибрида / А.А. Шабанов // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2013. – № 11–12. – С. 83–86.
5. Шабанов, А.А. Режимы экономичного движения / А.А. Шабанов // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2013. – № 11–12. – С. 87–89.
6. Monaco C., Golecki C., Sattler B. Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2014. August 17–20, 2014, Buffalo, New York, USA.
7. Загарин, Д.А. Аккумуляторные батареи автомобилей с электроприводом / Д.А. Загарин, В.И. Сальников, А.В. Шабанов // Автомобильная промышленность. – 2016. – № 5. – С. 24–27.
8. Правила № 101ЕЭК ООН. Приложение 8.

References

1. Zagarin D.A., Sal'nikov V.I., Shabanov A.V., Lomakin V.V., Shabanov A.A. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2016, no. 1, pp. 4–7.
2. Zagarin D.A., Shabanov A.V., Lomakin V.V., Krasavin P.A., Shabanov A.A. *Jenergojeffektivnost' i jenergosberezhenie*, 2013, no. 9–10, pp. 28–30.

3. *Katalogi avtomobilej 2009–2015 gg. Automobil revue* (Directories car 2009–2015. Automobil revue).
4. Shabanov A.A. *Jenergojeffektivnost' i jenergosberezhenie*, 2013, no. 11–12, pp. 83–86.
5. Shabanov A.A. *Jenergojeffektivnost' i jenergosberezhenie*, 2013, no. 11–12, pp. 87–89.
6. Monaco C., Golecki C., Sattler B. Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2014. August 17–20, 2014, Buffalo, New York, USA.
7. Zagarin D.A., Sal'nikov V.I., Shabanov A.V. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2016, no. 5, pp. 24–27.
8. *Pravila № 101EJeK OON. Prilozhenie 8* (Regulation No. 101EЭК UN. Annex 8).