

УДК 62-235

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

главный научный сотрудник

E-mail: krasnevski_l@tut.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20.01.2020.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НА ГИБРИДНЫХ И БАТАРЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ. ЧАСТЬ 1

Дана оценка перспектив применения автоматических трансмиссий (АТ) на гибридных и батарейных электромобилях, которая базируется на анализе их текущего состояния и стратегий ведущих производителей. Проведен анализ прогнозируемых до 2030 года объемов производства и применения в странах Северной Америки и Европы этой техники с различными типами АТ, опубликованных данных об их технических характеристиках и технико-экономических показателях. Прогнозируется значительное увеличение производства основных видов гибридов, а значит, и применяемых в них АТ. Показано, что применение АТ позволяет повысить энергоэффективность электромобилей. По гибридам это подтверждается опытом массовой эксплуатации легковых автомобилей и коммерческого транспорта. Приведены данные о создании компанией ZF Friedrichshafen AG новой генерации восьмиступенчатых АТ для средних, полных и подзаряжаемых гибридов в диапазоне мощностей 24–160 кВт по созданной ею модульной технологии. По оценке компании, к 2030 году по крайней мере 70 % всех новых автомобилей будут иметь двигатель внутреннего сгорания (ДВС). И здесь — перспективы для применения подзаряжаемых гибридов. Показано, что коммерческие батарейные электромобили становятся одним из главных направлений электрификации дорожного транспорта. Следующий возможный шаг в их развитии — использование многоступенчатых АТ для повышения энергоэффективности, над которым работает все больше производителей автомобилей и трансмиссий. Рассматриваются новые технологии выбора архитектуры и топологии гибридной силовой установки (ГСУ) с комбинаторным генерированием множеств вариантов, полным их перебором и отбраковкой, которые фактически выполняют синтез схем, а на последующих этапах — комплексную оптимизацию, которая включает выбор размерностей компонентов, минимизацию расхода топлива и энергии. Они позволяют автоматизировать оптимальное проектирование ГСУ. Статья состоит из двух частей.

Ключевые слова: автоматические трансмиссии, гибридные электромобили, батарейные электромобили

Введение. Начало третьего тысячелетия в области транспорта ознаменовалось стремительным развитием ГСУ автомобилей как эффективного средства снижения потребления мировым сообществом жидкого углеводородного топлива и загрязнения окружающей среды. Их внедрение стало главным направлением технического прогресса автомобилестроения и привело к созданию принципиально новых технологий автомобилей с гибридными (комбинированными) и электрическими силовыми установками (ГСУ и ЭСУ), в том числе с ГСУ на водородных топливных элементах (ТЭ). За последние два десятилетия пройден путь от первого в мире серийного японского автомобиля Toyota Prius (1997) до массового производства многочисленных типов и моделей машин с ГСУ.

Общим ключевым компонентом этих технологий — ГСУ, ЭСУ и установок на ТЭ — является электропривод. Его применение дает возможность рекуперации кинетической энергии автомобиля

при торможении. Она применяется и в ЭСУ, которые также могут быть отнесены к ГСУ. Совместное использование этих трех технологий позволяет повысить в таких установках КПД использования химической энергии топлива до 75 % (при том что КПД ДВС не превышает 50 %). А ГСУ с ДВС дает экономию топлива до 20–30 % (в отдельных случаях до 50 %) в зависимости от особенностей эксплуатации.

Ожидалось, что такие процессы в недалеком будущем могут привести к кардинальному изменению производственных технологий как в самом автомобилестроении, так и в смежных отраслях. Судя по событиям последних 2–3 лет, это уже происходит. К настоящему времени практически все мировые производители (и даже некоторые страны) огласили планы крупномасштабного увеличения производства автомобилей с ГСУ и ЭСУ.

Один из главных факторов, ставший ведущим стимулом перехода к электромобилям с ГСУ

и ЭСУ, — перманентное ужесточение международных требований к топливной экономичности и снижению загрязнения окружающей среды.

Однако и сами электромобили имеют ряд проблем, которые потребуют решения в процессе дальнейшей глобализации их применения. Уникальная характеристика тягового электродвигателя (максимальный крутящий момент начиная с нулевой скорости) позволила успешно применять простую структуру ЭСУ с одноступенчатым редуктором привода ведущих колес, ставшую классической. Отсутствие традиционной полно-размерной трансмиссии существенно упростило конструкцию, снизило вес, габариты и стоимость привода, повысило его КПД. Вместе с тем анализ результатов большого числа опубликованных теоретических исследований динамики и экономики автомобилей с ГСУ и ЭСУ (особенно возросшего в последние 2–3 года) показывает, что автоматическое регулирование передаточного числа и расширение диапазона его регулирования дают существенный положительный эффект по ряду направлений. Таким образом, *де-факто, речь идет о применении в ЭСУ АТ, адаптированных к данным объектам.*

В то же время АТ изначально являются неотъемлемым компонентом практически всех ГСУ. Имеется широкий спектр типов, моделей и модификаций применяемых в них АТ (как адаптированных, так и общего назначения).

Учитывая очевидную актуальность данной тематики и отсутствие соответствующей русскоязычной информации, далее в статье рассматриваются эти проблемы с позиций перспектив и масштабов ожидаемого роста производства и применения гибридных и батарейных электромобилей.

Но прежде о терминологии. В соответствии с предложением Технического комитета 69 Международной Электротехнической комиссии (The International Electrotechnical Commission's Technical Committee 69 — Electric Road Vehicles) все транспортные средства, имеющие два или более типа источников энергии, ее накопления или конверсии, рассматриваются как «гибридные электрические транспортные средства», если хотя бы один из источников — электрический. Этому определению соответствует много возможных комбинаций: ДВС и батарея, батарея и маховик, батарея и суперконденсаторы, батарея и топливные элементы и т. д. Все эти комбинации в соответствии с данной терминологией получили свои названия, которые широко используются как специалистами, так и потребителями [1]. Вместе с тем, под электромобилем (будем далее использовать этот русскоязычный термин, более компактный по сравнению с переводом английского) очень часто понимают все его конфигурации, содержащие тяговый электропривод. Обозначают их общей аббревиатурой

EV (Electric Vehicle), как в названии [1]. В ней отмечается, что в таких случаях термин EV включает следующие перечисленные выше категории:

- Battery Electric Vehicle (BEV) — батарейный электромобиль;
- Hybrid Electric Vehicle (HEV) — гибридный электромобиль;
- Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) — электромобиль с подзарядкой;
- Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) — электромобиль на топливных элементах.

Таким образом, данная терминология вносит ясность в структуру этой быстро развивающейся инновационной области техники. На наш взгляд, ценно и в том, что становится очевидной органическая связь всех ее видов, основой которых является электропривод.

1. О безопасности электропривода (на примере ГСУ компании Toyota). Причиной обращения к тематике данной статьи послужила публикация в американском издании Providence Journal [2] 4 мая 2018 года с информацией об «электрических дефектах, вызывающих остановку Toyota Prius» (оригинальный перевод). Сообщается, что, согласно документам компании, менее чем за два месяца этого года в США более 800 дефектных электрических компонентов были возвращены изготовителю после выхода из строя электрических систем автомобилей Toyota Prius нескольких модификаций.

Эти отказы приводили к внезапной остановке автомобиля в результате «потери мощности» (lost of power), т. е. прекращения работы электропривода. В одном из приведенных примеров авария произошла в 2017 году на загруженной четырехполосной автостраде. Внезапная остановка машины на скорости 55 миль/ч привела к наезду на него следовавшего сзади автомобиля. В результате водитель Toyota Prius был госпитализирован с многочисленными травмами.

Считается, что причина — перегрев устройства, контролирующего электрические токи между аккумуляторной батареей и двумя тяговыми электромоторами. Это инвертор, преобразующий постоянный ток высокого напряжения от батареи в переменный ток высокого напряжения к моторам. Транзисторы, выполняющие это преобразование, перегреваются и могут выйти из строя. При этом повышение температуры приводило к оплавлению стенок алюминиевого корпуса электронного блока вплоть до появления в них сквозных отверстий.

Общепринято, что система управления в случае перегрева инвертора, как и других отказов, должна перевести силовую установку на режим «limp-home» — аварийный режим, позволяющий своим ходом добраться до ремонтных служб, двигаясь с малой скоростью. Однако в данном случае этого не произошло. Toyota дала указание дилерам

возвращать ей все отказавшие инверторы или их элементы для замены. При этом компания отмечала, что Prius — одна из самых популярных моделей Toyota, имеющих репутацию безопасных, заслуживающих доверие машин.

Но оказалось, что проблема повреждения ключевых электрических компонентов из-за перегрева беспокоит Toyota уже около 7 лет и находится под контролем Национальной администрации безопасности дорожного движения (NHTSA) и профильной комиссии Сената США. Более того, в связи с этими проблемами Toyota в 2014 году отозвала 800 000 автомобилей Prius различных модификаций выпуска 2010–2014 годов для установки модифицированного программного обеспечения системы управления электроприводом, пытаясь избежать замены инвертора и его главного компонента — «интеллектуального силового модуля». Эта замена стоит 2000 долл., тогда как программное обеспечение — только 80.

Но в число автомобилей, отказавших в 2018 году, попали и некоторые с новым программным обеспечением. В прессе высказывалось предположение, что отказы инверторов происходят при пробегах более 150 000 миль, и поэтому неясно, был ли эффективен отзыв 2014 года как попытка стабилизировать инверторы за счет совершенствования программы управления [2].

В [3] также отмечено, что в 2010 году Toyota подверглась многочисленным судебным искам из-за отказов, вызывавших внезапное ускорение автомобиля Camry, которое стало причиной ряда аварий со смертельным исходом. За что была подвергнута штрафу в размере 1,2 млрд долл. с обязательной информацией NHTSA об исполнении. Только в 2017 году компания освободилась от этого уголовного судебного преследования.

По данным [4], около 260 000 автомобилей (Toyota RAV4 2012 модельного года и Toyota Tacoma, Lexus RX350 2012–2013 гг.) отзывались в связи с неисправностью электронного блока управления, вызывавшей отключение функций контроля стабильности, тягового усилия и антиблокировочного торможения.

Справочно. С подобными проблемами сталкиваются и другие известные производители. Одно из последних сообщений — о случаях пожаров гибридных автомобилей Chrysler после подзарядки батарей [5]. Компания Fiat Chrysler Automobiles отзывает 10 021 минивэнов модели Chrysler Pacifica Hybrid выпуска с 16 августа 2016 по 7 августа 2018 года в связи с опасностью их возгорания после зарядки батарей на зарядных станциях. Причина в том, что данная модель имеет режим работы на электроприводе (пробег до 33 миль). Пользование им упрощено по сравнению с другими машинами. Если во время зарядки органы управления остались на этом режиме, а положение педали газа не изменилось, то после зарядки движение на нем может продолжаться,

пока разряд батареи не снизится до минимума. Однако в отчетах, направленных в NHTSA, говорится следующее. Программное обеспечение системы управления может в этом случае «синхронизировать четырехцилиндровый ДВС с ошибкой 360° по фазе, которая приводит к тому, что электромотор будет продолжать вращать ДВС, в результате некоторое количество несгоревшего топлива попадет в нейтрализатор и может воспламениться». Предполагалось, что отзыв начнется 8 декабря 2018 года. Отмечается, что эта проблема могла быть устранена в ходе недавнего отзыва 4,85 млн машин Chrysler, Jeep, Dodge, в том числе и Chrysler Pacifica Hybrid, у которых не отключался круиз-контроль, и Chrysler хочет обновить ПО, проверить катализатор и при необходимости заменить.

В [5] также отмечается, что Chrysler ранее уже отзывал автомобили Pacifica Hybrid по другим причинам, самая существенная из которых — «повреждение диода в модуле инвертора, которое может иммобилизовать минивэн».

Столь масштабные проявления опасных отказов, непосредственно связанных с тяговым электроприводом автомобилей компании Toyota, снижавшей многолетнюю высочайшую репутацию, вызывают в обществе много вопросов, в том числе и относительно конструкции электропривода. Конечно, все возможные меры принимает она сама. Но следует ожидать, что свои мнения, гипотезы и предложения также выскажет сообщество специалистов и просто потребителей.

В частности, можно отметить, что отказ инвертора сам по себе не приводил бы к таким последствиям. Но в данной ГСУ применяются два МГ с высокоэнергетическими постоянными магнитами в роторах. И если в результате отказа обмотки их статоров были обесточены, то оба МГ перешли в режим генерации, подобный рекуперативному торможению, но неуправляемый. Также здесь в состав электропривода входит электронноуправляемая бесступенчатая трансмиссия («e-CVT», в нашем переводе «гибридная электро-механическая трансмиссия» — ГЭМТ [6]) с двухрядным планетарным механизмом и парой фрикционных. Она, как и все современные АТ, имеет специальный режим на случай аварии («аварийный режим» — «limp home»), на котором привод мог быть отключен от колес. Но он почему-то не включился. Скорости и направления вращения обоих МГ на данном режиме определяются кинематикой планетарного механизма и скоростями его входного и выходного валов (т. е. скоростями ДВС и колес) и могут быть высоки. Об этом в сообщениях ничего нет.

Наряду с преимуществами электромобилей известны и недостатки, препятствующие повсеместному их распространению. Это в первую очередь малые емкость и плотность энергии, высокая стоимость тяговой аккумуляторной батареи, ма-

лый запас хода на одной зарядке, а также привязанность к инфраструктуре зарядных устройств.

К недостаткам, очевидно, следует отнести и те (пока официально не названные), которые привели к описанным выше проблемам Toyota. И здесь следует отметить высокую, возрастающую от модели к модели удельную мощность электропривода ее машин.

В таблице 1 представлены данные о параметрах электропривода пяти последовательных моделей гибридов Toyota, начиная с модели Prius первого поколения (все модели — с двумя мотор-генераторами MG1 и MG2 (далее — МГ1 и МГ2)) по состоянию на 2007 год [7]. Над таблицей заголовок из оригинала. Примерный перевод: «Toyota возглавляет промышленность в достижении плотности мощности электрических машин 4 кВт/кг». В таблице выделена строка скоростей МГ2 с комментарием на выноске внизу: «Ключ к высокой плотности мощности — в конструкциях с существенно более высокими скоростями». И действительно, за период менее 10 лет скорости возросли с 5600 до 14 500 об/мин, а мощность — с 33 кВт при 1040–5600 об/мин до 147 кВт при 5600–13 000 об/мин, т. е. примерно в три раза.

С учетом этих цифр можно предположить, что в числе попавших под отзыв 2018 года — и машины из правой части таблицы 1, выпущенные, как выше упоминалось, в 2010–2014 гг., которые достигли к настоящему времени пробегов более 150 000 миль.

На рисунке 1 [8] показана зависимость КПД МГ2 от крутящего момента и скорости. Область графика от нуля до 2000 об/мин, охватывающая режимы трогания автомобиля с места и разгона до крейсерских скоростей, — область низких значений КПД (менее 86 %). Программа FCVT (Freedom CAR and Vehicle Technologies) устанавливала для этой зоны требование стабильно выдерживать режим пиковых значений крутящего момента МГ 18 с [9]. Следовательно, конструкция должна быть рассчитана на эти уровни, даже если на практике их длительность не превышает 1 с. Для Toyota Prius в данной зоне это мощность 60 кВт, что при низком

Таблица 1 — Параметры электропривода пяти последовательных моделей гибридов Toyota

Table 1 — Parameters of the electric drive of five consecutive models of Toyota HEVs

• Toyota leads industry in electric machine power density → nearing 4 kW/kg

Component	Units	Prius THS-I	Prius THS-II	RX400h	GS450h	Camry
System	V	274	500	650	650	650
MG2	kW	33	50	123	147	(50)
	rpm	1040-5600	1200-1500	4500	5600-13,000	
	Nm	350	400	333	275	
	rpm	0-400	0-1200	0-1500	0-3840	
	Rpm	5600	6500	12,400	14,400	14,500
MG1	kW	12	29	109	134	(30)
	Rpm	6000	10,000	13,000	13,000+	13,000
Max Pwr	kW	73	78	191	254	140
Retention		Conventional Permanent Magnet Retention Method			New Magnet Retention Method	

← The key to high power density is design for significantly higher speeds!

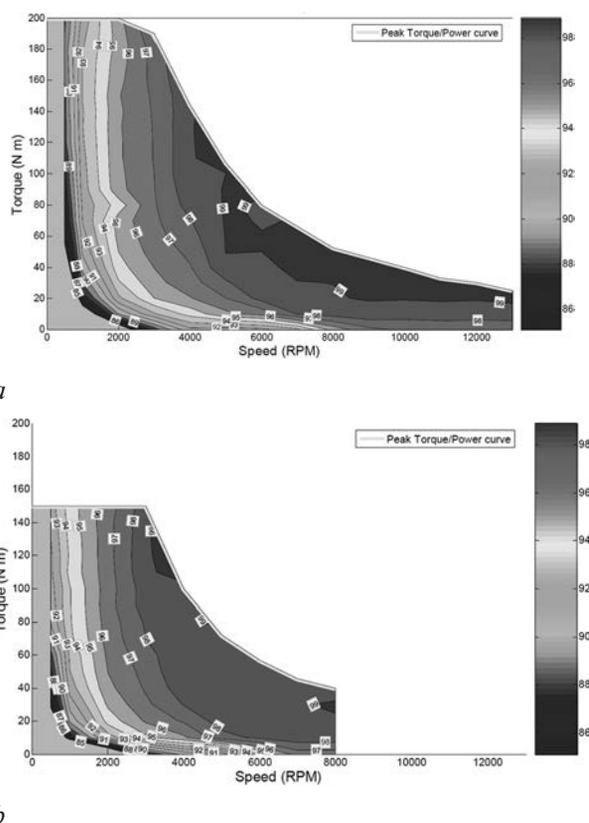


Рисунок 1 — Зависимость КПД МГ2 (а) и инвертора (б) электропривода Toyota Prius 2010 г. от крутящего момента и скорости при напряжении 650 В [8]
Figure 1 — Dependence of the efficiency coefficient of MG2 (motor generator) (a) and inverter (b) of the Toyota Prius 2010 electric drive on the torque and speed at a voltage of 650 V [8]

КПД приводит за 18 с к нагреву обмотки статора до 150°. Как видно на графиках, область максимального КПД мотора (95–96 %) находится в довольно широкой зоне крутящих моментов и скоростей — 30...100 Н·м и 3000...8500 об/мин. Правая граница КПД менее 90 % (светлая зона в левой части графика) начинается с 500 об/мин и крутящего момента 0–60 Н·м. Далее с его увеличением она все круче отклоняется вправо до 3000 об/мин. В то же время область высоких КПД инвертора (97–99 %) занимает большую площадь графика. Но область КПД менее 90 % (темная зона в левой стороне) при скоростях менее 1000 об/мин проходит вертикально, охватывая весь диапазон крутящих моментов.

Таким образом, имеют место области режимов, на которых возможна высокая тепловая нагрузка привода. И это, очевидно, относится ко всем электроприводам данного типа.

Можно предположить, что к данной ситуации привела упомянутая выше уникальная характеристика МГ. И силовая установка первого гибрида Toyota — Prius THS-I — имела простой однорядный планетарный суммирующий механизм. Однако перманентное повышение мощности силовых установок и максимальных скоростей движения достигалось увеличением скоростей МГ (позво-

лявшим сохранять их приемлемые габариты), что наглядно иллюстрирует таблица 1.

И это при том, что, как отмечается в [6], данный электропривод представляет собой ГЭМТ (в оригинале e-CVT), а Toyota первой в мире ввела жидкостное охлаждение применяемого в ней инвертора.

Мало того, введено также жидкостное охлаждение ротора МГ — зон расположения постоянных магнитов, свойства которых ухудшаются при перегреве (рисунки 2 и 3 [10]).

В числе причин перехода на высокие напряжения, скорости, тепловые нагрузки — борьба за получение средствами электропривода диапазона регулирования, необходимого для обеспечения заданной динамики трогания с места и разгона автомобиля до максимальной скорости, что, возможно, еще сложнее для гибридов с одним МГ и одноступенчатым механическим редуктором.

Анализ многочисленных зарубежных публикаций показывает, что эти проблемы давно привлекают внимание исследователей многих стран. Среди них значительное место занимают исследования и предложения по включению в электропривод (в том числе в электромобилях) двухступенчатых,

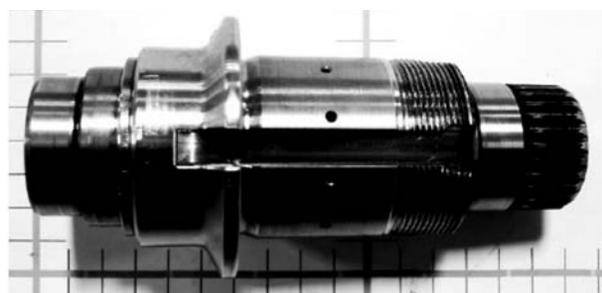


Рисунок 2 — Вал ротора МГ Toyota Prius: видны радиальные отверстия для подачи в ротор охлаждающей жидкости [10]
Figure 2 — Toyota Prius MG rotor shaft: radial holes are visible for supplying cooling fluid to the rotor [10]



Рисунок 3 — Охлаждение ротора МГ Toyota Prius (стрелками показаны направления движения жидкости из вала (см. рисунок 2) по каналам внутри ротора в зоны расположения постоянных магнитов [10])
Figure 3 — Cooling the MG rotor of Toyota Prius (arrows indicate the direction of movement of the liquid from the shaft (see Figure 2) through channels inside the rotor to the location of permanent magnets [10])

трехступенчатых и даже многоступенчатых и бесступенчатых АТ. Следует особо отметить резкий рост числа таких публикаций буквально в последние 3–4 года, что можно рассматривать как результат накопления и критической оценки опыта массовой эксплуатации разнообразной мобильной техники с электроприводом.

Примечание. Нельзя не вспомнить ранние работы по электроприводу — фундаментальную монографию по теории и расчету электромеханических передач [11], предложения по мотор-колесам с двухступенчатыми планетарными редукторами, с гидротрансформаторами и др. [12–13].

Актуальность и практическая ценность данного направления представляются очевидными в связи со стремительным ростом производства и применения электромобилей в последние годы. Более того, постановка таких задач представляется логичной и естественной, учитывая преемственность развития машин с электроприводом (подробнее в [6]).

Опубликованные результаты исследований показывают, что введение хотя бы одной дополнительной ступени в одноступенчатый редуктор позволяет уменьшить расход топлива (в электромобилях — электроэнергии), а за счет значительного механического диапазона изменения передаточного числа существенно снизить максимальную скорость МГ (облегчая тем самым решение ряда сопутствующих проблем).

2. Прогнозы мирового развития гибридных и батарейных электромобилей. Стремительный рост производства электромобилей в 2020–2030 годах был ожидаемым. Так, на графике рисунка 4 показан прогноз на 2010–2020 годы суммарного объема продаж электромобилей в 13 странах, составленный в 2010 году Международным агентством энергии (International Energy Agency — IEA) [14]. Здесь укажем зоны только четырех стран: Китай, США, Испания, Япония. Итог 2020 года — примерно 7,5 млн машин (во главе с Китаем).

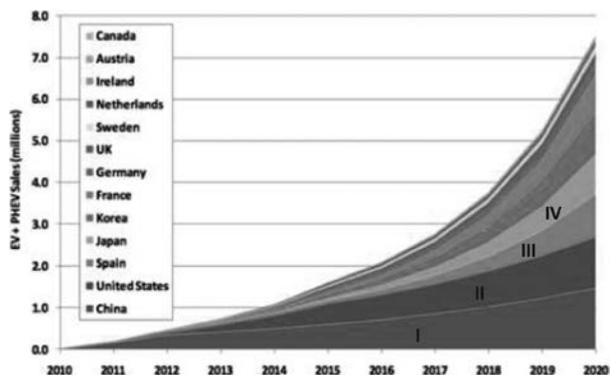


Рисунок 4 — Объем продаж гибридных и заряжаемых электромобилей до 2020 года (прогноз 2010 года [14]): I — Китай; II — США; III — Испания; IV — Япония
Figure 4 — Sales of HEVs and PHEVs through 2020 (estimates of year 2010 [14]): I — China; II — USA; III — Spain; IV — Japan

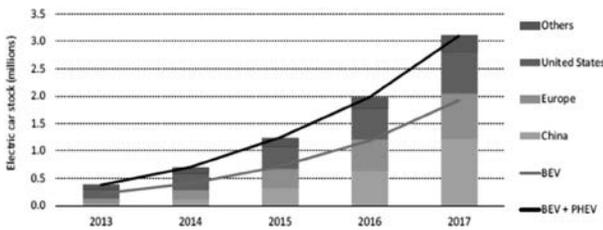


Рисунок 5 — Развитие рынка продаж электромобилей за 2013–2017 гг.
 Figure 5 — Development of the electric vehicle sales market for years 2013–2017

В отчете Международного агентства энергии за 2018 год [16] опубликованы данные о развитии мировых продаж электромобилей (гибридных и батарейных) за 5 лет (2013–2017). На рисунке 5 объемы каждого года изображены колонками, включающими данные по четырем регионам. Снизу вверх: Китай, Европа, США и др. Кроме того, даны две кривые, соответствующие продажам: верхняя — батарейных и заряжаемых (гибридов), а нижняя — только батарейных электромобилей. На основе этих данных в отчете подчеркивается, что в 2017 году суммарный объем мировых продаж электромобилей впервые в истории превысил 3 млн. Добавим при этом, что он за 5 лет вырос почти в 8 раз.

Сравнение этих фактических данных с прогнозом, составленным в 2010 году (см. рисунок 4), показывает, что он был достаточно точен (несколько меньше 3 млн) и был даже превышен, подтверждая бурный рост этого сегмента.

Доказательством продолжения таких темпов роста являются все чаще публикуемые в последние годы планы ведущих компаний по дальнейшему развитию электрификации автомобилей на период до 2030 года. На рисунке 6 показаны планы 21 ведущей автомобильной компании с расшифровкой по годам [16].

Упомянутый в [14, 15] проект «Инициатива по электромобилям» (Electric Vehicles Initiative —

EVI) был разработан в 2010 году консорциумом, включавшим Международное агентство энергии и 8 стран: Китай, Франция, Германия, Япония, ЮАР, Испания, Швеция, США. Отмечалось, что при дальнейшем развитии роста по наметившейся траектории количество электромобилей и гибридов к 2050 году достигнет миллиарда, и тогда, согласно поддержанному правительствами стран консорциума сценарию Голубой Карты IEA, выбросы CO₂ снизятся до уровня 2005 года.

Компания Eaton — известный производитель автомобильных гибридных систем — объявила о программе развития этого бизнеса под названием «eMobility», согласно которой она планирует инвестировать более 500 млн долл. в течение пяти ближайших лет (в том числе 300 млн долл. — в 2018 году) и от 2 до 4 млрд к 2030 году. В число приоритетов программы входят *трансмиссии для средних и тяжелых электромобилей*. Компания заявила, что ее понимание первоочередных задач данного производства базируется на опыте создания трансмиссий и силовой электроники в гибридной области и дает ей преимущества, так как *потребители гибридных систем Eaton коллективно накопили 2 млрд миль пробега при надежном, заслуживающем доверия обслуживании* [17].

Следует отметить, что в числе многочисленных факторов, влияющих на мотивацию приобретения электромобилей, — расходы на бензин. Так, в США была установлена связь роста продаж гибридов с подорожанием бензина. В [18] приведен со ссылкой на [19] график этой зависимости, показанный на рисунке 7.

Здесь гистограмма соответствует объемам продаж гибридов в США по годам и месяцам с декабря 2001 по апрель 2007, а кривая линия — изменение цены бензина. Видна четкая связь между ними. Вертикальная прямая в верхней правой зоне рисунка соответствует введению новых условий кредита на гибриды с 1 января 2006 года.

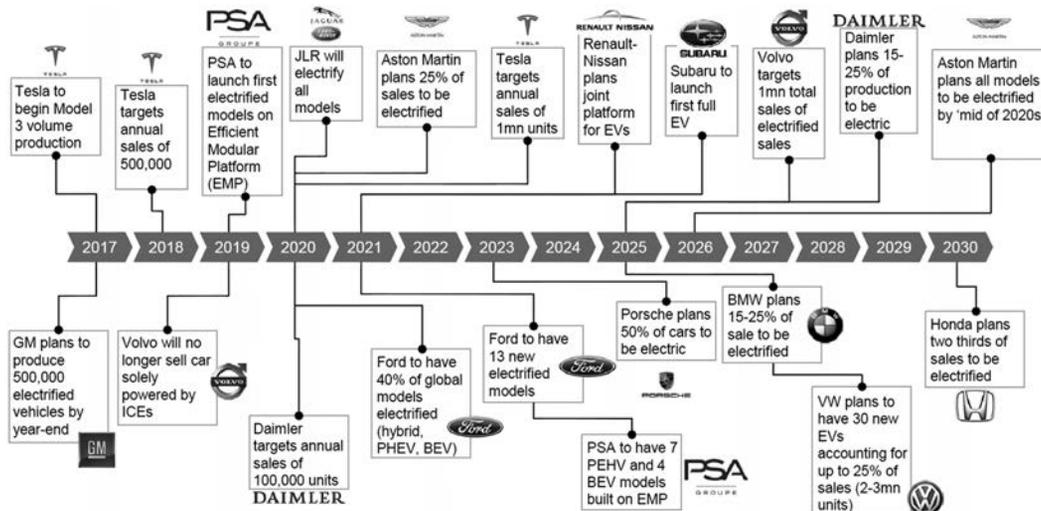


Рисунок 6 — Намерения автомобильных компаний по электрификации выпускаемых автомобилей до 2030 года [16]
 Figure 6 — Automotive companies' intentions to electrify manufactured vehicles by 2030 [16]



Рисунок 7 — Объемы продаж гибридных автомобилей и цена бензина в США [19]

Figure 7 — HEV sales and gasoline prices in the USA [19]

Ряд стран по всему миру озвучили грядущую смерть ДВС. Франция в 2017 году анонсировала свое желание прекратить продажу бензиновых и дизельных ДВС с 2040 года, присоединившись к Индии (2030) и Норвегии (2025) в видении полностью электрического будущего. Автомобилестроители стремятся удовлетворить эти требования. Так, компания Volvo полагала, что все новые модели ее автомобилей с 2019 года будут иметь электромотор.

Принципиальное значение для развития электромобилей имеет совершенствование батарей. По словам газеты The Guardian, оно может остановиться без «революции батарей». Литий-ионные батареи, применяемые на большинстве электромобилей, подешевели с 2010 года на 80 %, хотя и остаются дорогими, составляя до 40 % стоимости автомобиля. Полагают, что для снижения этой цены до уровня бензиновых потребуется около 10 лет [20].

Для оценки перспектив развития трансмиссий для электромобилей необходимо учитывать трансформацию их архитектуры в масштабах всего парка. Она представлена на рисунке 8 на период 2016–2030 гг.

На графике представлены прогнозируемые изменения доли различных классов архитектуры в общей структуре парка электромобилей в США. Классы изображены в виде зон различной тональности.

Составы структуры на 2016, 2020, 2025, 2030 годы представлены в цифровом виде столбцами цифр на поле графика над соответствующими годами. Как видно, к 2025 году прогнозируется исчезновение обычных (без элементов электропривода) автомобилей. А в структуре 2030 года ожидается 10 % электромобилей, 10 % гибридов с подзарядкой, 8 % полных гибридов, 65 % микрогибридов и 7 % автомобилей с системой «стоп — старт».

Также представляет интерес прогноз продаж различных типов АТ в автомобильном парке США до 2030 года (легковых и грузовых до 3,5 т), представленный на рисунке 9. Здесь график разбит на 7 зон, каждая из которых соответствует определенному типу АТ. Как и на предыдущем графике,

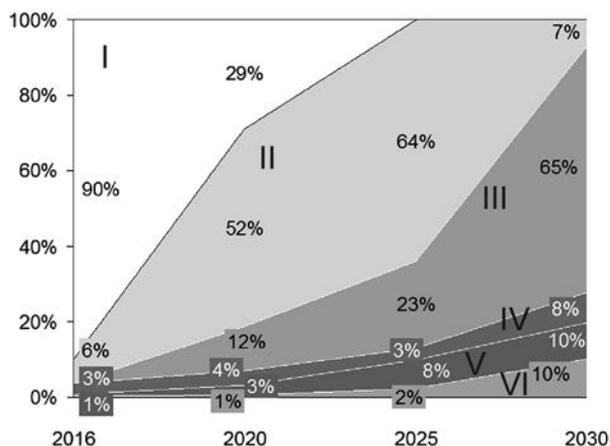


Рисунок 8 — Прогноз изменения архитектуры гибридных и батарейных электромобилей в автомобильном парке США до 2030 года [16]: I — обычные автомобили (только с ДВС); II — системы «стоп — старт» 12 В плюс менеджмент энергии; III — Mild Hybrid («мягкий» гибрид); IV — Full Hybrid (полный гибрид), V — Plug-in Hybrid (гибрид с внешней подзарядкой), VI — Pure electric vehicle (чистые (батарейные) электромобили)

Figure 8 — Prediction of changes in the architecture of HEVs and BEVs in the USA motor vehicle fleet by 2030 [16]:

I — conventional vehicles (only with ICE); II — Stop-Start systems 12 V with energy control; III — Mild Hybrid vehicles; IV — Full Hybrid vehicles; V — Plug-in Hybrid vehicles; VI — Pure electric vehicles

показаны цифры структуры парка трансмиссий в 2016, 2020, 2025 и 2030 годах. Четко видны: многократный рост числа электромобилей, незначительное количество МТ, приверженность аме-

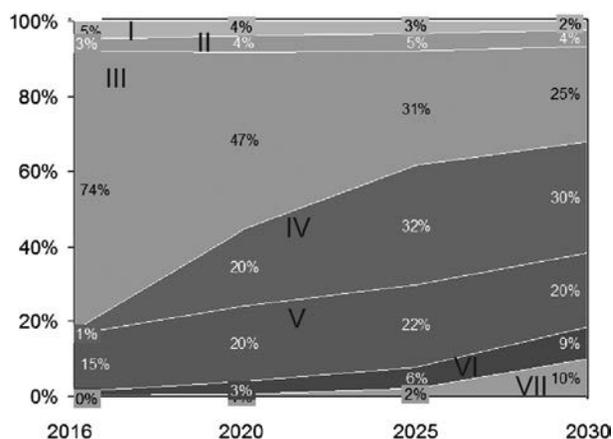


Рисунок 9 — Прогноз применения различных типов АТ в автомобильном парке США до 2030 года [16]: I — МТ (механические трансмиссии); II — ДСТ (АТ с двумя сцеплениями); III — АТ (классические 6-, 7-, 8-ступенчатые ГМТ, а также 3-, 4-, 5-ступенчатые); IV — АТ (9-, 10-ступенчатые ГМТ);

V — бесступенчатые АТ; VI — гибридные (в основном многоскоростные); VII — трансмиссии электромобилей (с одноступенчатым редуктором и многоскоростные)

Figure 9 — Prediction of application of AT various types in the USA motor vehicle fleet by 2030 [16]: I — MT (mechanical transmissions); II — DCT (dual clutch transmissions); III — ATs (traditional 6-, 7-, 8-speed hydromechanical transmissions, as well as 3-, 4-, 5-speed);

IV — ATs (9-, 10-speed hydromechanical transmissions); V — infinitely variable ATs; VI — hybrid (generally multithreaded); VII — transmissions of electric vehicles (with single-speed reducer and multi-speed)

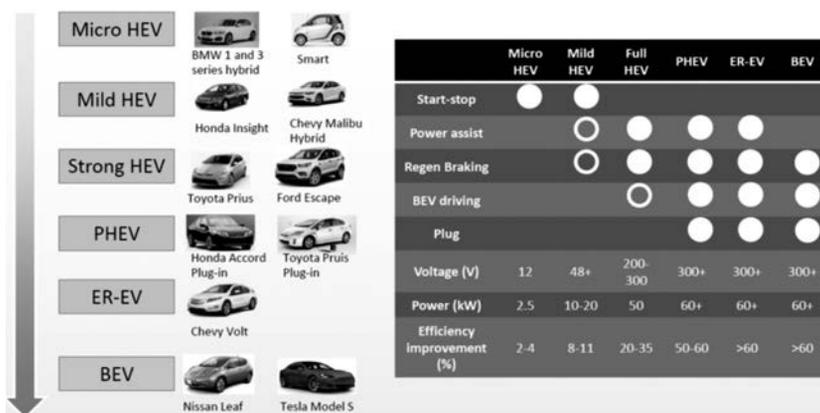


Рисунок 10 — Уровни электрификации электромобилей [21]
 Figure 10 — Levels of electrification of electric vehicles [21]

риканцев классическим многоступенчатым АТ и неприятие ими ДСТ.

3. Концепции построения гибридных и батарейных электромобилей. В ходе стремительного развития процесса электрификации в мире за кратчайший период создано и поставлено на производство большое число типов и модификаций гибридных электромобилей, существенно различающихся по структуре и составу компонентов. Это привело к появлению специального направления исследований, посвященного анализу и синтезу такой структуры и топологии, обобщенно называемого **архитектурой**. Проведено и продолжается большое число теоретических и экспериментальных исследований свойств различных типов архитектуры ГСУ, их достоинств и недостатков. Другое сложившееся направление, привлечение большее число исследователей, — **менеджмент энергии ГСУ**, существенно зависящий от архитектуры.

В последние годы в число объектов таких исследований вошли и батарейные электромобили, поскольку они построены из тех же компонентов, что и ГСУ и, как отмечено в [6], фактически «выросли» из них.

В конечном итоге оба эти взаимосвязанных направления являются необходимым инструментом и основой для выбора концепции построения ГСУ на этапе проектирования.

3.1. Архитектура ГСУ. При всем разнообразии конструкций известны три типовых варианта архитектуры ГСУ — *последовательная, параллельная и комбинированная*. В первой связь между ДВС и ведущими колесами только электрическая, т. е. это, например, обычный дизель-электрический привод, дополненный функцией рекуперации энергии. Две другие позволяют приблизиться к традиционным конструкциям автомобилей массового производства и снизить стоимость. В этих рамках отработано и поставлено на поток много вариантов конструкций гибридов, различия которых определяются, прежде всего, их «уровнем электрификации» (Electrification Level of EVs). На рисунке 10 [21] в левой колонке дан перечень уров-

ней электрификации гибридов — «микро» (Micro), «легкие» (Mild) и «полные» (Strong), что соответствует градации их мощности — очень малой, средней и большой. В этот перечень включены еще две позиции — PHEV (подзаряжаемые), ER-EV (с расширенным диапазоном — Extended Range). Кроме того, включены батарейные электромобили (BEV). Итого шесть уровней.

Напротив каждой позиции этого перечня в средней части рисунка изображены два автомобиля известных марок как представители данного уровня электрификации (что дает представление о получаемом в результате множестве вариантов исполнения гибридов). В таблице справа даны характеристики каждого из уровней. Кружками в шести столбцах таблицы отмечено наличие у них следующих свойств, указанных в строках. Сверху вниз: Stop-Start («стоп — старт»); Power assist (назовем это гибридным разгоном); Regen Braking (регенеративное торможение); BEV driving (движение на батарее); Plug (зарядка от электросети); Voltage (V) — напряжение (В); Power (kW) — мощность (кВт); Efficiency Improvement (%) — улучшение КПД (%).

Уровни электрификации (иногда называемые классами) оценивают также количественно, вычисляя достигаемое улучшение топливной экономичности на каждом из них. Такая зависимость показана на графике рисунка 11 [21, 22]. Здесь ось абсцисс соответствует топливной экономичности, а ось ординат — уровню электрификации. Вдоль кривой, построенной по этой зависимости, изображены таблички, рядом с которыми даны названия уровней, а в самих табличках — безразмерные значения мощности соответствующих силовых установок. Стопроцентный уровень электрификации присвоен батарейным электромобилем, (поскольку они обеспечивают наилучшую экономичность по сравнению с гибридами), а гибридам — в процентных долях от батарейных. На ординатах под табличками указаны цифровые значения соответствующих уровней электрификации.

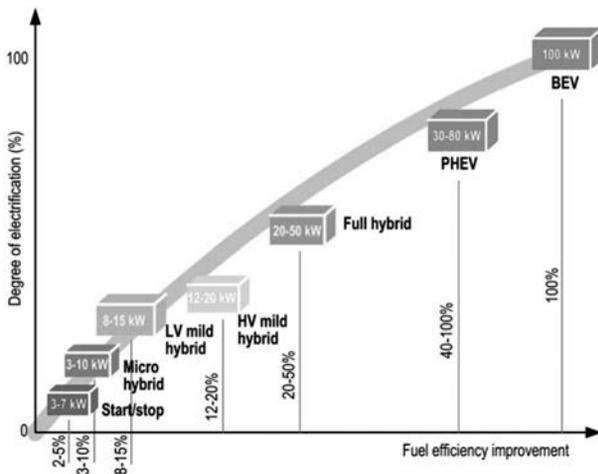


Рисунок 11 — Количественная оценка уровней электрификации [22]
Figure 11 — Quantification of electrification levels [22]

Рассмотрим в качестве примера **параллельную архитектуру** ГСУ с одним МГ как наиболее распространенную. На рисунке 12 представлены четыре ее варианта.

На ранних стадиях развития ГСУ практически все они нашли применение. Так, для переднеприводных легковых автомобилей с АТ предлагались варианты ГСУ с установкой МГ между ДВС и АТ или же на заднем мосту, т. е. конфигурации P2 или P4. Это позволяло превратить в гибриды даже ранее выпущенные автомобили. Конфигурация P1 широко применяется в ГСУ

уровней «микро» и «легкие». Здесь один МГ, расположенный перед ДВС, заменяет обычные стартер и генератор. Это позволяет глушить ДВС на коротких стоянках в городском трафике, что дает существенную экономию топлива, а также возможность применять ограниченное рекуперативное торможение при замедлении и поддержку ДВС при разгоне. Данная архитектура широко используется в гибридах с относительно невысоким уровнем электрификации, но встречается и в других уровнях — от компактных легковых до грузовых автомобилей.

О влиянии архитектуры на показатели ГСУ можно судить по представленной на рисунке 13 и в таблице 2 [23] информации о машинах с ГСУ параллельной архитектуры. На рисунке показана топливная экономичность четырех групп гибридов (компактных, средних, больших и SUV, в каждой по несколько моделей, всего более 20), а в таблице — технические характеристики и годы выпуска тех же моделей. Как видно, самую высокую экономичность (в милях на один американский галлон бензина) имеют компактные легковые автомобили с ГСУ (очевидно, конфигурации P1), а самую низкую — полные гибриды (которые имеют в разы большие массу и мощность). В таблице 2 для тех же моделей указаны мощность и крутящий момент ДВС, мощность МГ, емкость батареи, а также годы их производства в США.

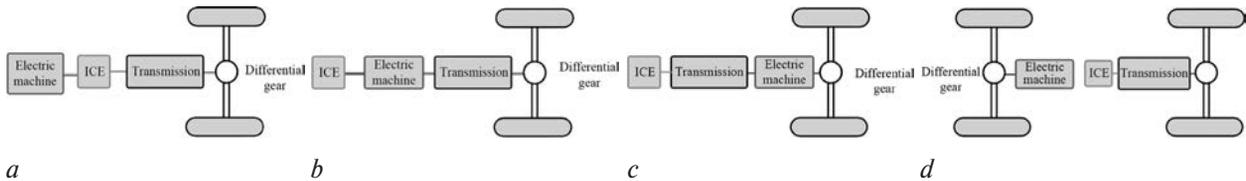


Рисунок 12 — Варианты параллельной архитектуры ГСУ с одним МГ [23]: a — МГ (ISG/BSG) перед ДВС (конфигурация P1); b — МГ после ДВС (конфигурация P2); c — МГ после АТ (конфигурация P3); d — МГ связан с одним мостом, ДВС и АТ — с другим («параллель-через-дорогу» — конфигурация P4) [23]; ISG — интегрированный стартер-генератор, BSG — стартер-генератор с ременным приводом

Figure 12 — Options of the parallel architecture of the HPU with one MG [23]: a — MG (ISG/BSG) before ICE (P1 configuration); b — MG after ICE (P2 configuration); c — MG after AT (P3 configuration); d — MG is connected with one axle, ICE and AT — with another one (parallel-through-the-road — P4 configuration) [23]; ISG — integrated starter generator, BSG — belt-driven starter generator

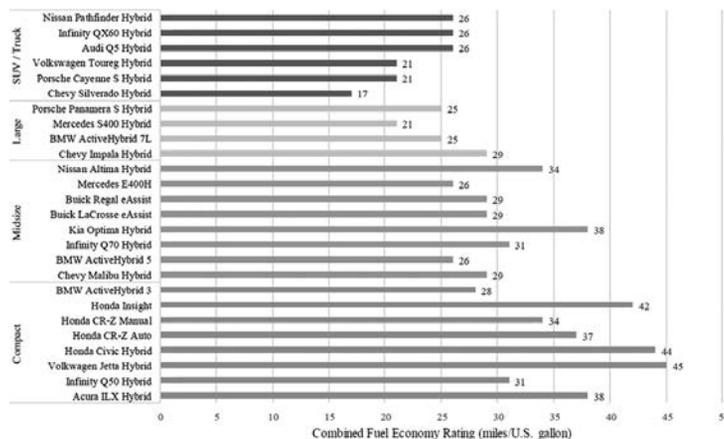


Рисунок 13 — Сравнение топливной экономичности ГСУ параллельной архитектуры различных уровней электрификации [23]
Figure 13 — Comparison of the fuel economy of HPU with parallel architecture of different levels of electrification [23]

Таблица 2 — Модели и спецификация ГСУ параллельной архитектуры с одним МГ [23]
 Table 2 — Models and specification of the HPU of parallel architecture with one MG [23]

Vehicle class	Model	Engine size (L)	Engine power (kW)	Engine torque (Nm)	Electric machine power (kW)	Battery pack capacity (kWh)	US production model years	CO ₂ emissions (g/mile)
Compact	Acura ILX Hybrid	1.5	67	132	17	NA	2013–2014	228
	BMW Active Hybrid 3	3.0	224	407	41	1.35	2012–	314
	Honda Civic Hybrid	1.5	67	131	17	0.6	2012–	196
	Honda CR-Z	1.5	83	144	10	0.6	2011–	238
	Honda Insight	1.3	73	167	10	0.34	2000–2006 2010–2014	209
	Infiniti Q50/M35h Hybrid	3.6	269	290	50	0.6	2012–	286
	Volkswagen Jetta Hybrid	1.4	106	100	20	1.1	2013–	200
Mid-size	Chevrolet Malibu Hybrid	2.4	136	233	15	0.5	2008–2010, 2013–	307
	BMW Active Hybrid 5	3.0	223	406	41	1.35	2012–	246
	Infiniti M / Q70 Hybrid	3.5	226	358	43	0.6	2012–	285
	Buick LaCrosse Hybrid	2.4	136	233	15	0.5	2012–	310
	Buick Regal Hybrid	2.4	136	233	15	0.5	2012–	310
	Mercedes E400H	3.5	225	370	20	0.8	2013–	347
	Nissan Altima Hybrid	2.5	118	220	30	1.46	2007–2011	269
Large	BMW Active Hybrid 7	3.0	235	450	15	1.35	2010–	350
	Chevrolet Impala Hybrid	2.5	146	252	15	0.5	2014–	355
	Mercedes S400HV	3.5	205	225	20	NA	2012–2013	414
	Porsche Panamera S Hybrid	3	245	440	35	1.7	2012–	229
SUV/truck	Audi Q5 Hybrid	2	155	350	40	0.816	2011–	337
	Chevrolet Silverado Hybrid	5.3	220	454	NA	0.84	2005–2007	523
	Infiniti QX60 Hybrid	2.5	186	329	15	0.6	2014–	342
	Nissan Pathfinder Hybrid	2.5	171	330	15	0.6	2014–	342
	Porsche Cayenne S Hybrid	3	245	440	35	1.7	2011–	260
	Volkswagen Touareg Hybrid	3	245	440	35	1.7	2011–	413

Следует отметить, что, в отличие от классических силовых установок с ДВС, в ГСУ могут применяться только АТ, так как здесь ручное управление трансмиссией невозможно в силу ее особенностей. Поэтому следующим логическим шагом стало размещение МГ непосредственно в картере гидромеханической АТ (в свободном пространстве в зоне периферии тора гидротрансформатора). При этом МГ устанавливается без собственного корпуса, что позволяет легко связать его ротор и статор с элементами зубчатых механизмов и с картером АТ. Также обеспечивается его жидкостное охлаждение. Таким образом, начался процесс «гибридизации» АТ (подробнее в [6]).

Как показало будущее, это была поистине революционная идея. Она привела к вытеснению гидротрансформатора из АТ и установке вместо него второго МГ при сохранении других ее компонентов, т. е. к созданию безтрансформаторной гибридной трансмиссии, причем с сохранением компоновки и габаритов исходной АТ. И все ведущие компании — General Motors, Toyota, Ford и др. — в итоге пришли к практически единой *комбинированной архитектуре* — ГЭМТ. Она, как правило, имеет сложную топологию, так как содержит размещенные в едином картере два безкорпусных МГ и двух-трехрядный многоступенчатый планетарный механизм с несколькими (в зависимости от кинематической схемы) многодисковыми фрикционами. В результате электро-механические трансмиссии трансформируются в комбинированные непрерывно-ступенчатые.

Такую архитектуру имеет показанная на рисунке 14 известная ГЭМТ Toyota Prius 2010 Hybrid Synergy Drive (HSD), получившая свое название от одноименной новой технологии управления, обеспечивающей высокую экономичность и комфортабельность [23].

Так же выполнена двухрежимная многопоточная ГЭМТ Allison Hybrid Transmission (AHS) компании Allison (General Motors) по рисунку 15. Здесь имеются два МГ, три планетарных ряда и четыре фрикциона (два тормоза и две муфты). Включая фрикционы в различных комбинациях (таблица 3), можно получить два режима бесступенчатого регулирования передаточного числа ГЭМТ под управлением электронной системы (т. е. режимы e-CVT), а также четыре ступени с фиксированными передаточными числами при отключенных МГ (например, для использования при отказе электропривода).

Сравнение типов архитектуры (рисунок 16 [23]) показывает, что параллельные ГСУ обеспечивают повышение топливной экономичности

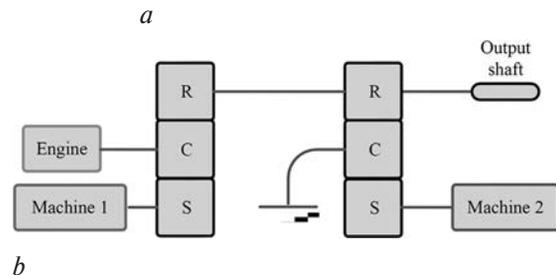
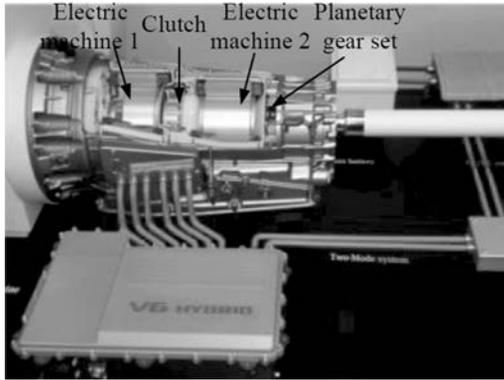


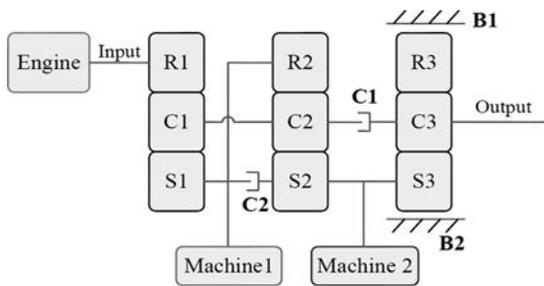
Рисунок 14 — ГСУ Toyota Prius 2010 г. Hybrid Synergy Drive: a — общий вид; b — архитектура [23]
 Figure 14 — HPU of Toyota Prius 2010 Hybrid Synergy Drive: a — general view; b — architecture [23]

Таблица 3 — Рабочие режимы двухрежимной многопоточной ГЭМТ AHS по рисунку 15 [23]
 Table 3 — Operating modes of the dual mode multithreaded hybrid electromechanical transmission AHS according to Figure 15 [23]

		Brake B1	Clutch C1	Brake B2	Clutch C2
Continuously variable transmission modes	Input-split	○			
	Compound-split		○		
Fixed gear ratio modes	1st Fixed gear				○
	2nd Fixed gear	○	○		
	3rd Fixed gear		○		○
	4th Fixed gear	○	○	○	



a



b

Рисунок 15 — Двухрежимная многопоточная ГЭМТ Allison Hybrid Transmission: a — общий вид; b — архитектура [23]
 Figure 15 — Dual mode multithreaded hybrid electromechanical transmission of Allison Hybrid Transmission: a — general view; b — architecture [23]

и снижение эмиссии без существенного усложнения конструкции. Они дают самое простое и недорогое решение для электрификации на основе обычных силовых установок и поэтому широко

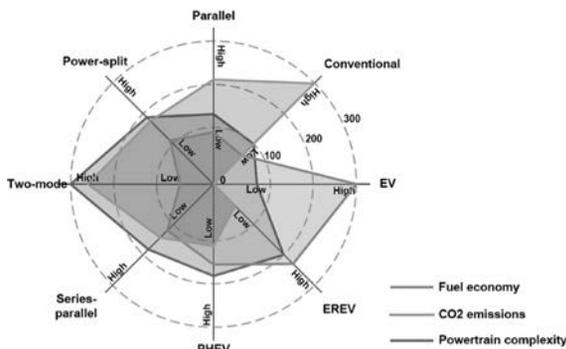


Рисунок 16 — Сравнение различных типов архитектуры ГСУ по топливной экономичности, эмиссии CO₂ и сложности конструкции [23]
 Figure 16 — Comparison of various types of HPU architecture by fuel economy, CO₂ emissions, and design complexity [23]

применяются большим числом производителей (что видно из приведенных выше таблиц).

3.2. Архитектура батарейных электромобилей.

Выше приведен анализ влияния архитектуры на показатели и свойства всех классов электромобилей, созданных и коммерциализированных на американском рынке. Показательно, что в их число включены и батарейные электромобили, что подчеркивает их конструктивное родство и единство.

Архитектура абсолютного большинства батарейных электромобилей предельно проста: МГ — высокоскоростной редуктор — межколесный дифференциал (рисунок 17 [23]). Вместе с тем, отмечается, что по сравнению с традиционными бензиновыми в его архитектуре еще есть большое неисследованное пространство. Это оставляет возможность дальнейшего поиска [24]. В указанной работе рассматриваются четыре варианта то-

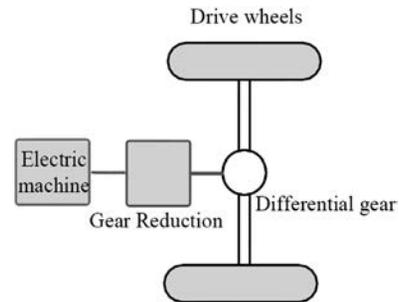


Рисунок 17 — Конфигурация силовой установки батарейного электромобиля [23]
 Figure 17 — Configuration of the power unit of the BEV [23]

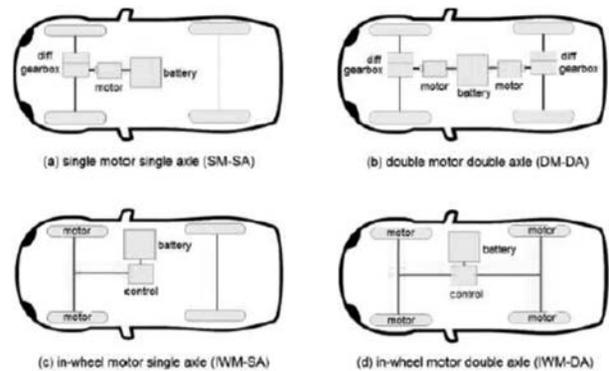


Рисунок 18 — Четыре варианта топологии батарейного электромобиля [24]
 Figure 18 — Four variants of the BEV topology [24]

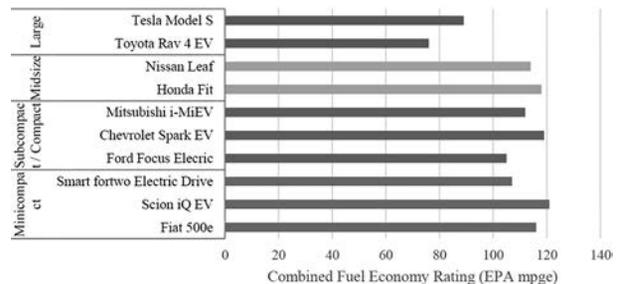


Рисунок 19 — Сравнение топливной экономичности силовых установок гибридных и батарейных электромобилей [23]
 Figure 19 — Comparison of fuel economy of power units of HEVs and BEVs [23]

Таблица 4 — Модели и спецификации электромобилей по рисунку 19 [23]
Table 4 — Models and specifications of electric vehicles according to Figure 19 [23]

Vehicle class	Model	Electric machine power (kW)	Electric machines torque (Nm)	Electric range (km)	Battery capacity (kWh)	US production model years	CO ₂ emissions (g/mile)
Minicompact	Smart for two Electric Drive	30	120	101	16.5	2013–	0
	Scion iQ EV	47	163	80	12	2013	0
	Fiat 500e	83	147	140	24	2013–	0
Subcompact/compact	Mitsubishi i-MiEV	47	180	100	16	2012–2014	0
	Chevrolet Spark EV	97	443	132	21.3	2013–	0
	Ford Focus Electric	107	245	122	23	2011–	0
Mid-size	Nissan Leaf	80	280	121	24	2010–	0
	Honda Fit EV	92	256	132	20	2013–2014	0
Large	Tesla Model S	310	600	335/426	60/85	2012–	0
	Toyota Rav4 EV	115	296	166	41.8	2012–2014	0

Таблица 5 — Сравнение числа компонентов силовых установок электромобилей различных уровней электрификации [23]
Table 5 — Comparison of the number of components of electric vehicle power units of different levels of electrification [23]

Components count	Engine	Battery	Electric machine	Transmission gearbox	Additional gear set	Additional clutch	Fuel tank	Charger
Conventional	1	1	0	1	0	0	1	0
Parallel	1	1	1	1	0	0/1	1	0
Power-split	1	1	2	0	1/2	0/2	1	0
Two-mode	1	1	2	0	3	4	1	0
Series-parallel	1	1	2	1	0/1	1	1	0
PHEV	1	1	2/1	0/1	2/1/0	0	1	1
EREV	1	1	2	0	0/1	1/3	1	1
EV	0	1	1	0	0	0	0	1

пологии батарейного электромобиля, показанные на рисунке 18: традиционная с одним МГ и одноступенчатым редуктором; с отдельными МГ и одноступенчатыми редукторами на передней и задней осях; с двумя колесными МГ на передней оси; с четырьмя колесными МГ (полноприводная).

Данные об энергоэффективности десяти известных на рынке США моделей батарейных электромобилей, представляющих весь их мощностной диапазон (четыре группы: миникompактные, субкомпактные, средней и большой мощности), представлены на рисунке 19. Она приведена к топливной экономичности в милях пробега на галлоне бензина. Как видно на диаграмме, наилучшие — Nissan Leaf, Chevrolet Spark и Scion. Наименьший пробег у Toyota RAV4.

В таблице 4 приведены параметры электропривода этих машин: мощность и крутящий момент МГ, емкость и пробег на одной зарядке батареи, модельный год производства США, эмиссия CO₂ (у всех нулевая).

Наконец, представляет интерес сравнение числа компонентов силовых установок батарейного электромобиля и гибридов различных уровней электрификации, представленное в таблице 5. Здесь с гибридами семи известных классов сравнивается батарейный электромобиль (последняя строка таблицы — высший уровень). Указано наличие батареи, ДВС, МГ, трансмиссии, дополнительных зубчатого редуктора и сцепления, топливного бака и зарядного устройства. Здесь видны преимущества батарейного электромобиля по этим признакам.

Вопросы выбора и оптимизации архитектуры гибридных и батарейных электромобилей рассма-

триваются также в [25–29]. Продолжение в следующем номере журнала.

Список литературы

1. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development [Electronic resource] / Un-Noor F. [et al.] // Energies. — 2017. — 10(8). — Mode of access: <http://doi.org/10.3390/en10081217>. — Date of access: 21.12.2019.
2. Vartabedian, R. Electrical defects cause Priuses to stall; Toyota may be bracing for a legal fight as safety worries grow [Electronic resource] / R. Vartabedian. // Providence Journal. — 2018. — Mode of access: <http://www.providencejournal.com/entertainmentlife/20180504/electrical-defects-cause-priuses-to-stall-toyota-may-be-bracing-for-legal-fight-as-safety-worries-grow>.
3. Ingram, A. Toyota Announces Recall For 2010-2014 Prius To Update Electronics [Electronic resource] / A. Ingram // Green Car Reports. — 2014. — Mode of access: https://www.greencarreports.com/news/1090296_toyota-announces-recall-for-2010-2014-prius-to-update-electronics. — Date of access: 20.12.2019.
4. Cole, A. Toyota may let mechanics repair faulty recall inverters on older Prius [Electronic resource] / A. Cole // Green Car Reports. — 2018. — Mode of access: https://www.greencarreports.com/news/1116621_toyota-may-let-mechanics-repair-faulty-recall-inverters-on-older-prius. — Date of access: 20.12.2019.
5. Halvorson, B. Chrysler Pacifica Hybrid recalled for stalling, fire risk [Electronic resource] / B. Halvorson // Green Car Reports. — 2018. — Mode of access: https://www.greencarreports.com/news/1119743_chrysler-pacifica-hybrid-recalled-for-stalling-fire-risk. — Date of access: 23.12.2019.
6. Красневский, Л.Г. Многопоточные многорежимные гибридные электромеханические трансмиссии / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко, П.Л. Мариев // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2014. — Вып. 3. — С. 64–66.
7. Husain, I. Automotive Electric Motor Drives and Power Electronics [Electronic resource] / I. Husain // IEEE Eastern North Carolina PES/IAS Section. Raleigh, NC. April 19, 2012. — Mode of access: <http://www.ieca-inc.com/images/IEEE-DL-Lecture-Eastern-North-Carolina-April-19-2012.pdf>. — Date of access: 27.12.2019.
8. Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System [Electronic resource] / T.A. Burress [et al.]. — Mode of access: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub26762.pdf>. — Date of access: 23.12.2019.
9. Yoshida, P. Overview of Freedom CAR & Vehicle Technologies Program [Electronic resource] / P. Yoshida. — 2002. — 19 p. — Mode of access: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f25/FreedomCAR_Overview_March_2007.pdf. — Date of access: 20.12.2019.
10. Advanced Strong Hybrid and Plug-In Hybrid Engineering Evaluation and Cost Analysis / D.M. Warner [et al.] // CARB Agreement 15CAR018. — April 25, 2017.
11. Электромеханические передачи (теория и расчет) / П.Н. Иванченко [и др.]. — М.: Л.: Mashgiz, 1962. — 432 с.
12. Погарский, Н.А. Универсальные трансмиссии пневмоколесных машин / Н.А. Погарский. — М.: Машиностроение, 1965. — 220 с.

13. Яковлев, А.И. Конструкция и расчет электромотор-колес / А.И. Яковлев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1981. — 191 с.
14. IEA. Eight countries join IEA electric vehicle initiative, 2010. — Mode of access: <https://www.iea.org/programmes/electric-vehicles-initiative>.
15. Global EV Outlook 2018 [Electronic resource] // IEA. — Mode of access: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018>. — Date of access: 20.12.2019.
16. Govindswamy, K. Future transmission trends. Transmission and driveline systems [Electronic resource] / K. Govindswamy, D. Tomazic // 40th Automotive Petroleum Industry Forum. Dearborn, MI – USA, April 17, 2018. — Mode of access: <https://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Forum%20Files%20v2/3KGovindswamyFuture%20TrendsTransmissionDriveline.pdf>. — Date of access: 20.12.2019.
17. Gehm, R. Eaton creates eMobility business to meet electrified technology demand [Electronic resource] / R. Gehm // SAE International. — Mode of access: <https://www.sae.org/news/2018/06/eaton-launches-emobility-business?eid=334450428&bid=2185433>. — Date of access: 20.12.2019.
18. Mensing, F. Optimal Energy Utilization in Conventional, Electric and Hybrid Vehicles and its Application to Eco Driving: Ph. D. Thesis [Electronic resource] / Felicitas Mensing. — Lyon, 2013. — 286 p. — Mode of access: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0106/these.pdf>.
19. Diamond, D. The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from US states / D. Diamond // Energy Policy. — 2009. — 37(3). — Pp. 972–983.
20. Harris, M. Electric cars may stall without a battery revolution [Electronic resource] / M. Harris // Guardian Sustainable Business. — Mode of access: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/jul/19/electric-cars-battery-revolution-tesla-volvo>. — Date of access: 20.12.2019.
21. Electric Vehicle Architectures EV Technology Workshop // Electric Vehicle Transportation Center. — Oct.17, 2016.
22. Making the Case for Electrified Transportation [Electronic resource] / B. Bilgin [et al.] // IEEE. — 2015. — Vol. 1, No. 1. — Pp. 4–17. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2437338>. — Date of access: 20.12.2019.
23. State-of-the-art electrified powertrains — hybrid, plug-in and electric vehicles / Y. Yang [et al.] // Int. J. Powertrains. — 2016. — Vol. 5, No. 1. — 29 p.
24. Othaganont, P. Multi-objective optimisation for battery electric vehicle powertrain topologies [Electronic resource] / P. Othaganont, D. J Auger. — 2017. — Vol. 231, Iss. 8. — Mode of access: <https://doi.org/10.1177/0954407016671275>.
25. Architecture Optimization of Hybrid Electric Vehicles with Future High-Efficiency Engine [Electronic resource] / J. Hong [et al.] // Energies. — 2018. — Vol. 11. — Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en11051148>. — Date of access: 20.12.2019.
26. Singh, K.V. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components [Electronic resource] / K.V. Singh, H. Om Bansal, D. Singh // J. Mod. Transport. — 2019. — 27(2). — Pp. 77–107. — Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40534-019-0184-3>. — Date of access: 20.12.2019.
27. Wu, G. Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison [Electronic resource] / G. Wu, X. Zhang, Z. Dong // J. of the Franklin Institute. — 2015. — Vol. 352, Iss. 2. — Pp. 425–448. — Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.04.018>. — Date of access: 20.12.2019.
28. Miller, J.M. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type [Electronic resource] / J.M. Miller // IEEE Trans. Power Electronics. — 2006. — Vol. 21. — Pp. 756–767. — Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.872372>. — Date of access: 20.12.2019.
29. Battery Electric Vehicle Architecture Congress 2019 (BEVA). — Mode of access: <http://www.batteriesinternational.com/2010/04/30/beva-2019>.

KRASNEVSKIY Leonid G., Corresponding member of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.
Chief Researcher

E-mail: krasnevski_l@tut.by

Joints Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 20 January 2020.

AUTOMATIC TRANSMISSIONS: ANALYSIS AND PROSPECTS FOR USE IN HYBRID AND BATTERY ELECTRIC VEHICLES. PART 1

An assessment of the prospects for using automatic transmissions (AT) on hybrid and battery electric vehicles is given, which is based on an analysis of their current state and strategies of leading manufacturers. The article gives the analysis of production volumes of this equipment with various types of ATs and its application in the countries of North America and Europe predicted until 2030, as well as published data on their technical characteristics and technical and economic indicators. A significant increase in the production of the main types of hybrid electric vehicles (HEV), and therefore the ATs used in them, is predicted. It is shown that the use of ATs makes it possible to increase the energy efficiency of electric vehicles. For HEVs, this is confirmed by the experience of mass operation of passenger cars and commercial vehicles. The paper shows the data on the creation by ZF Friedrichshafen AG of a new generation of eight-speed ATs for medium, full and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) in the power range of 24–160 kW using the modular technology created by ZF Friedrichshafen AG. The company estimates that by 2030, at least 70 % of all new cars will have an internal combustion engine (ICE). And here are the prospects for the use of PHEVs. It is shown that commercial battery electric vehicles (BEV) are becoming one of the main directions of electrification of road transport. The next possible step in their development is the use of multi-stage systems to improve energy efficiency, which is being worked on by more and more vehicle and transmission manufacturers. The article considers new technologies for selecting the architecture and topology of a hybrid power unit (HPU) with combinatorial generation of sets of options, their complete search and rejection, which actually perform the synthesis

of circuits, and at subsequent stages — complex optimization, which includes the selection of component dimensions, minimizing fuel and energy consumption. They make it possible to automate the optimal design of the HPU. The article consists of two parts.

Keywords: automatic transmissions, hybrid electric vehicles, battery electric vehicles

References

- Un-Noor F., Padmanaban S., Mihet-Popa L., Mollah M.N., Hossain E. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. *Energies*, 2017, no. 10(8). Available at: <http://doi.org/10.3390/en10081217> (accessed 21 December 2019).
- Vartabedian R. Electrical defects cause Priuses to stall; Toyota may be bracing for a legal fight as safety worries grow. *Providence Journal*, 2018. Available at: <http://www.providencejournal.com/entertainmentlife/20180504/electrical-defects-cause-priuses-to-stall-toyota-may-be-bracing-for-legal-fight-as-safety-worries-grow>.
- Ingram A. Toyota Announces Recall for 2010-2014 Prius to Update Electronics. *Green Car Reports*, 2014. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1090296_toyota-announces-recall-for-2010-2014-prius-to-update-electronics (accessed 20 December 2019).
- Cole A. Toyota may let mechanics repair faulty recall inverters on older Prius. *Green Car Reports*, 2018. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1116621_toyota-may-let-mechanics-repair-faulty-recall-inverters-on-older-prius (accessed 20 December 2019).
- Halvorson B. Chrysler Pacifica Hybrid recalled for stalling, fire risk. *Green Car Reports*, 2018. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1119743_chrysler-pacifica-hybrid-recalled-for-stalling-fire-risk (accessed 23 December 2019).
- Krasnevskiy L.G., Poddubko S.N., Mariev P.L. Mnogopotokhnyye mnogorezhimnyye gibridnye elektromekhanicheskie transmisii [Multi-threaded multi-mode hybrid electromechanical transmissions]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical Issues of Mechanical Engineering], 2014, iss. 3, pp. 64–66.
- Husain I. *Automotive Electric Motor Drives and Power Electronics*. 2012. Available at: <http://www.ieca-inc.com/images/IEEE-DL-Lecture-Eastern-North-Carolina-April-19-2012.pdf> (accessed 27 December 2019).
- Burress T.A., et al. *Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System*. 2011. Available at: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub26762.pdf> (accessed 23 December 2019).
- Yoshida P. *Overview of Freedom CAR & Vehicle Technologies Program*. 2002. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f25/FreedomCAR_Overview_March_2007.pdf (accessed 20 December 2019).
- Warner D.M., et al. *Advanced Strong Hybrid and Plug-In Hybrid Engineering Evaluation and Cost Analysis*. CARB Agreement, no. 15CAR018, 2017.
- Ivanchenko P.N., Savelev N.M., Shapiro B.Z., Vovk V.G. *Elektromekhanicheskie peredachi (teoriya i raschet)* [Electromechanical gears (theory and calculation)]. Moscow, Leningrad, Mashgiz Publ., 1962. 432 p.
- Pogarskiy N.A. *Universalnye transmisii pnevmokolesnykh mashin* [Universal transmissions for air-wheeled vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 220 p.
- Yakovlev A.I. *Konstruktsiya i raschet elektromotor-koles* [Design and calculation of electric motor wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 191 p.
- IEA. *Eight countries join IEA electric vehicle initiative*. 2010. Available at: <https://www.iea.org/programmes/electric-vehicles-initiative>.
- Global EV Outlook 2018. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018> (accessed 20 December 2019).
- Govindswamy K., Tomazic D. Future transmission trends. Transmission and driveline systems. *Proc. 40th Automotive Petroleum Industry Forum*. Dearborn, 2018. Available at: <https://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Forum%20Files%20v2/3KGovindswamyFuture%20TrendsTransmissionDriveline.pdf> (accessed 20 December 2019).
- Gehm R. *Eaton creates eMobility business to meet electrified technology demand*. 2018. Available at: <https://www.sae.org/news/2018/06/eaton-launches-emobility-business?eid=334450428&bid=2185433> (accessed 20 December 2019).
- Mensing F. *Optimal Energy Utilization in Conventional, Electric and Hybrid Vehicles and its Application to Eco Driving*. Ph. D. Thesis. Lyon, 2013. 286 p. Available at: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0106/these.pdf>.
- Diamond D. The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from US states. *Energy Policy*, 2009, no. 37(3), pp. 972–983.
- Harris M. Electric cars may stall without a battery revolution. *The Guardian*, 2017. Available at: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/jul/19/electric-cars-battery-revolution-tesla-volvo> (accessed 20 December 2019).
- Electric Vehicle Architectures EV Technology Workshop/ *Electric Vehicle Transportation Center*. Oct.17, 2016.
- Bilgin B., et al. Making the Case for Electrified Transportation. *IEEE*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 4–17. Available at: <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2437338> (accessed 20 December 2019).
- Yang Y., Ali K.A., Roeleveld J., Emadi A. State-of-the-art electrified powertrains — hybrid, plug-in and electric vehicles. *International Journal of Powertrains*, 2016, vol. 5, no. 1.
- Othaganont P., Assadian F., Auger D.J. Multi-objective optimisation for battery electric vehicle powertrain topologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2017, vol. 231, iss. 8. Available at: <https://doi.org/10.1177/0954407016671275>.
- Hong J., Zhao L., Lei Y., Gao B. Architecture Optimization of Hybrid Electric Vehicles with Future High-Efficiency Engine. *Energies*, 2018, no. 11. Available at: <https://doi.org/10.3390/en11051148> (accessed 20 December 2019).
- Singh K.V., Bansal H.O., Singh D. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. *Journal of Modern Transportation*, 2019, no. 27(2), pp. 77–107. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40534-019-0184-3> (accessed 20 December 2019).
- Wu G., Zhang X., Dong Z. Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, vol. 352, iss. 2, pp. 425–448. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.franklin.2014.04.018> (accessed 20 December 2019).
- Miller J.M. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, vol. 21, pp. 756–767. Available at: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.872372> (accessed 20 December 2019).
- Battery Electric Vehicle Architecture Congress 2019 (BEVA)*. Available at: <http://www.batteriesinternational.com/2010/04/30/beva-2019/>.