

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 2

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. Первая часть опубликована в № 2(51) журнала.

Ключевые слова: автоматические трансмиссии, гибридные электромобили, батарейные электромобили

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-12-26>

Топология и синтез структуры электромобилей.

Это достаточно новое направление в области электрификации транспорта, которое возникло в последние годы и еще не отражено в русскоязычных публикациях. Вместе с тем, оно представило электромобиль как новый объект исследований для специалистов в областях оптимизации, автоматического управления, топологии и др. Электромобиль вызвал значительный интерес у теоретиков, участие которых позволило выйти на новый уровень — комплексную оптимизацию конструкции и потребительских свойств силовых установок электромобилей.

О терминологии. В работе [1], посвященной исследованию структурной оптимизации топологии легких гибридов с позиции прочности при авариях, о терминологии сказано следующее. Эффективная электрификация автомобильной ГСУ требует решения взаимосвязанных проблем топо-

логии и размеров конструкции. Далее оценка ее работоспособности зависит от стратегии управления (*менеджмента энергии*), которая задает распределение требуемой энергии между ДВС и мотор-генератором (МГ). Таким образом, *конструкция ГСУ* — это возможное соединение физических объектов (топологии и размеров компонентов) и стратегии управления. Дальнейшее усложнение вносит *конфигурация ГСУ* — схема соединения компонентов ГСУ и движителей (в оригинале — «выходных валов») автомобиля. Некоторые конструкции позволяют изменять конфигурацию во время движения с использованием механических сцеплений. Каждая из этих конфигураций называется *рабочим режимом* (driving mode) или просто *режимом* (mode). Семейство этих конфигураций определяется как *архитектура ГСУ*. Конструкции с *разделением потока мощности* (power-split)

имеют однорежимную или многорежимную архитектуру соединения ГСУ с двигателями с использованием планетарных передач в зависимости от условий применения. Современные архитектуры имеют 1, 2 или 3 планетарных ряда.

Отмечается, что в литературе конфигурация широко изучена и развиты эффективные методологии, использующие заданные библиотеки компонентов и выполняющие отбор конфигураций на ранних стадиях разработки.

Развитие гибридизации и электрификации привело к значительному усложнению силовых установок и поставило исследовательские организации и промышленность перед сложной задачей поиска лучших решений между возможностями архитектуры и действующими ограничениями. Комплекс алгоритмов оптимизации, применяемых для решения задач оптимального проектирования ГСУ, обзор и анализ которых приведен в [2], схематически представлен на рисунке 1.

Отмечается, что современные архитектуры ГСУ, т. е. соединения ДВС и МГ с двигателями, конструируются для конкретных приложений — легковых автомобилей, автобусов и др. Для новых приложений (тяжелых грузовых, гоночных автомобилей) нужны новые архитектуры, которые могли бы соответствовать конкретным техническим требованиям и ездовым циклам автомобиля. Исследование приемлемых архитектур по природе является комбинаторным и обычно базируется на человеческой интуиции. В [3] предлагается математически строгий алгоритм перечисления всех годных архитектур, что позволяет автоматизировать оптимальное проектирование ГСУ. Отмечается, что он является достаточно общим для однорежимных и многорежимных архитектур, для различных чисел планетарных передач и компонентов ГСУ.

Как уже отмечалось, выбор оптимальной топологии, размерности компонентов, стратегии управления для конкурентоспособных ГСУ должен рассматриваться с одновременным учетом топливной экономичности, загрязнения окружающей среды, тягово-скоростных свойств и стои-

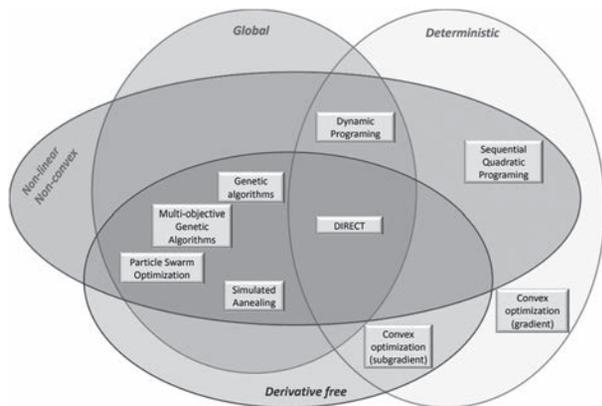


Рисунок 1 — Алгоритмы оптимизации проектирования ГСУ [2]
Figure 1 — Optimization algorithms for hybrid power unit (HPU) design [2]

мости. Большинство предыдущих исследований рассматривало эти 3 блока проектирования (топология, размерности, показатели потребительских свойств) отдельно. В работе [3], посвященной оптимизации топологии и размерностей компонентов ГСУ с 2-рядной планетарной передачей, представлены 2 концепции, объединяющие эти 3 блока. Один подход — вложенная оптимизация, которая проходит через все пространство параметров. Другой — расширенная итеративная оптимизация, которая исследует топологию и размерности компонентов поочередно. Отмечается, что она сходится с глобальной оптимизацией, генерируемой первым подходом, но значительно эффективней с точки зрения вычислений.

Исходным объектом для оптимизации топологии здесь является показанная на рисунке 2 обобщенная схема ГСУ, содержащая пять базовых компонентов — ДВС, 2 МГ, автомобиль и многоступенчатую трансмиссию в виде 2-рядной планетарной передачи. На графе ее кинематической схемы обозначены шесть полюсов, соответствующих элементам планетарных рядов. Каждый полюс соединен ребрами с остальными пятью, и на каждом ребре обозначено место возможной установки фрикциона. Число фрикционов в реальной оптимизируемой схеме задается исходными данными. В процессе оптимизации осуществляется полный перебор (Exhaustive Search) вариантов соединения компонентов ГСУ между собой и с автомобилем посредством выбираемой в конечном итоге из генерируемых при итерациях множеств оптимальной топологии кинематической схемы, включая размещение в ней элементов управления — фрикционов.

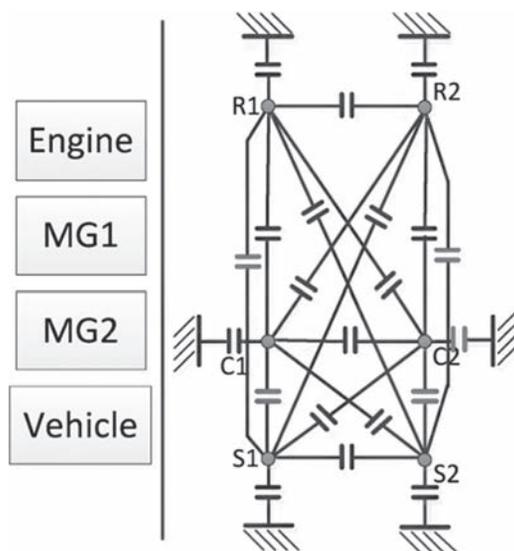


Рисунок 2 — Компоненты ГСУ с разделением потока мощности гибридного электроавтомобиля и все варианты расположения фрикционов в ее 2-рядной планетарной передаче [3]: R1, R2 — коронные шестерни (Ring Gears); S1, S2 — солнечные шестерни (Sun Gears); C1, C2 — водила (Carriers)
Figure 2 — Components of the HPU with power flow separation of the HEV and all options for the location of frictions in its two-row planetary gear [3]: R1, R2 — Ring Gears; S1, S2 — Sun Gears; C1, C2 — Carriers

С увеличением числа базовых компонентов ГСУ число возможных конфигураций их соединения возрастает экспоненциально. Интуитивный выбор новых архитектур, базирующийся на личном опыте, не застрахован от ошибок и противоречий [4]. В указанной работе предложен метод автоматизации проектирования ГСУ с набором из тех же пяти базовых компонентов, что и в рассмотренных выше. Метод базируется на теории графов, динамического программирования и поисковой оптимизации PSD (Pattern Search Optimization). Он содержит пример выбора оптимального варианта топологии ГСУ с 5-ступенчатой трансмиссией и оценкой топливной экономичности при движении электромобиля по двум ездовым циклам, состоящий из четырех стадий. На первой стадии через эвристики скрининга прошло 512 топологий. На второй 193 топологии выдержали требования по тяговой динамике, а на третьей 159 из них — требования по топливной экономичности на ездовом цикле PNGV. На заключительную стадию отобраны 20 новых топологий и 4 в качестве базы сравнения, показанные вместе на рисунке 3 (номера 1... 20 и 21... 24 соответственно). В числе последних — 2 обычные топологии: одна — параллельная, другая — с разделением потока, подобная

схеме Toyota Prius, и 2 топологии, также подобные Prius, но с дискретной коробкой передач, установленной перед и после МГ. Дальнейший выбор на этой стадии подробно изложен в [4].

Как видно из изложенного, технология выбора топологии на этапах комбинаторного генерирования множеств вариантов, их полного перебора и начальной отбраковки фактически представляет собой не что иное как *синтез схем ГСУ*. Однако на последующих (или чередующихся) этапах — выборе размерностей компонентов, минимизации расхода топлива и др. — решается *задача комплексной оптимизации*, в которую синтез топологии органически входит как один из описанных выше этапов.

Менеджмент энергии электромобилей. В предыдущем разделе показано, что в число критериев комплексной оптимизации при выборе архитектуры электромобилей и синтезе их топологических схем входит минимизация расхода топлива и электроэнергии. И поскольку их расчет, как мы видели, выполняется современными методами оптимизации уже при анализе каждого из возможных вариантов топологии, необходимо хотя бы кратко пояснить техническую сущность и пути практической реализации этих задач.

С одной стороны, наличие двух независимых бортовых источников энергии создает в ГСУ параллельной и комбинированной схем условия для экономии топлива, энергии и снижения токсичных выбросов, но с другой порождает сложную задачу, получившую название *Power Management* (менеджмент энергии). Но если архитектура и топология относятся к этапам проектирования, то названная минимизация относится к задачам новой области — *менеджменту энергии, перманентно осуществляемому во время движения электромобиля* его бортовыми электронными системами верхнего уровня управления (*Supervisory Systems*).

Выполнено большое число работ по выбору стратегии менеджмента энергии. В [5] выделены три ее категории в зависимости от применяемых алгоритмов и предложена стратегия, близкая к оптимальной. Характеристики ГСУ существенно зависят от ее архитектуры — последовательного, параллельного или смешанного соединения компонентов. Так как последовательная схема дает наибольшие размеры электрических машин и меньшую экономичность, применяются в основном параллельные схемы. Но при этом, в отличие от обычных гидромеханических передач (ГМП), имеющих одну степень свободы, гибридная электромеханическая трансмиссия (ГЭМТ) имеет две, и в ней возможны 3 вида топологии кинематических схем: с разветвлением на входе, соединением посередине или на выходе. С помощью многоступенчатого зубчатого (как правило, планетарного) механизма можно динамически (в процессе движения электромобиля) изменять конфигурацию в пределах этих вариантов посредством включения

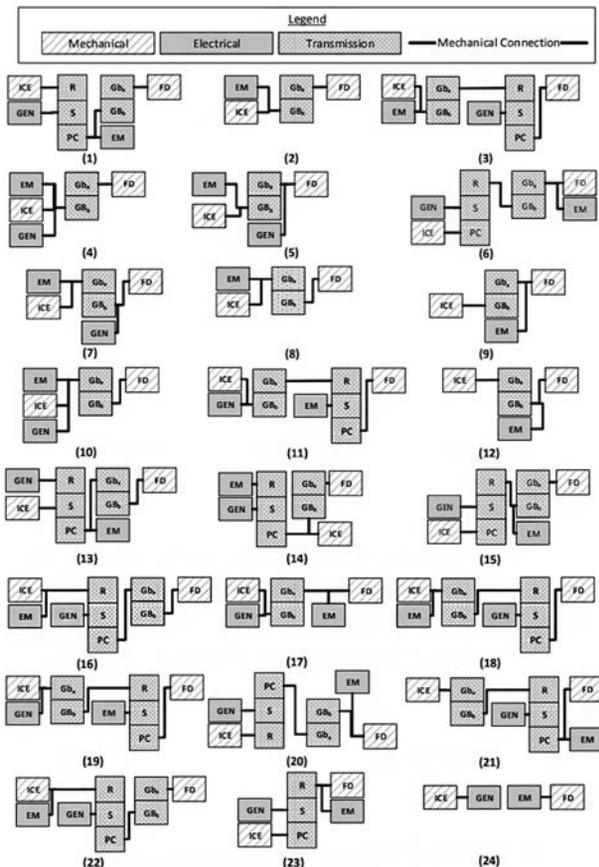


Рисунок 3 — Двадцать топологий, полученных после проверки на ездовых циклах PNGV и HWFET, и 4 дополнительные топологии для сравнения [4]

Figure 3 — Twenty topologies obtained after testing on PNGV and HWFET driving cycles, and 4 additional topologies for comparison [4]

различных комбинаций фрикционов. При этом именно наличие двух степеней свободы позволяет ГЭМТ регулировать режимы работы ДВС.

Топология кинематической схемы оказывает, в частности, влияние на эффективность регенеративного торможения. В [5] приведена зависимость КПД регенеративного электрического торможения от скорости легкового автомобиля для трех упомянутых видов топологии (рисунок 4). Видно, что он резко изменяется от максимума (в диапазоне 90–95 %) при скоростях 70–90 км/ч до 50 % при 20 км/ч.

К сожалению, приходится констатировать, что информация на русском языке об этой новой области — системах управления верхнего уровня, особенно по освещению их текущего состояния в мире, новых актуальных результатов — практически отсутствует, что создает реальные трудности для специалистов. С этих позиций в нашей работе [6] рассматривается *функционирование МСУ верхнего уровня гибридной электромеханической трансмиссии в составе ГСУ* на примере планетарной многоступенчатой трансмиссии с двумя МГ по патенту США [7]. Этот пример дает общее представление о содержании и технической реализации менеджмента энергии. Следует отметить, что вместе с General Motors, его заявителями являются также компании Daimler, Chrysler и BMW, причем это лишь один из пакетов полученных ими патентов по данной системе, который, судя по приведенному в нем списку принадлежащих им аналогов [7], содержит не менее 100 наименований.

В патенте предложена блочная архитектура ГСУ, в которую входит блок трансмиссии 10, кинематическая схема которой показана на рисунке 5.

Рассмотрим показанную на рисунке 6 укрупненную структурную схему МСУ верхнего уровня. Для краткости ограничимся лишь расшифровкой названий блоков, учитывая, что в [6] есть более подробное русскоязычное описание, а оригинал доступен и в интернете. Она содержит: блоки 310 и 330 *выбора стратегии и тактики управления*, блок 340

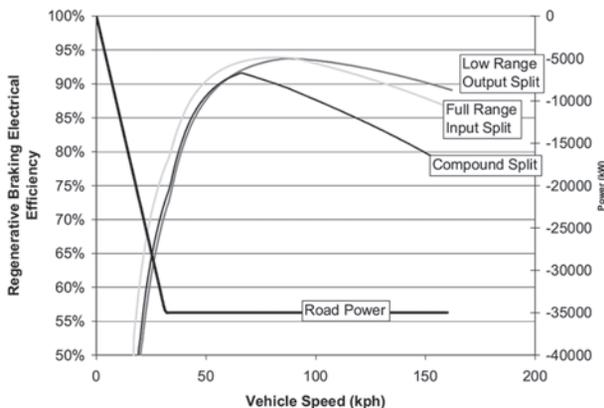


Рисунок 4 — Зависимость КПД регенеративного электрического торможения от скорости легкового автомобиля [5]
Figure 4 — Dependence of regenerative braking electrical efficiency on the speed of a passenger vehicle [10]

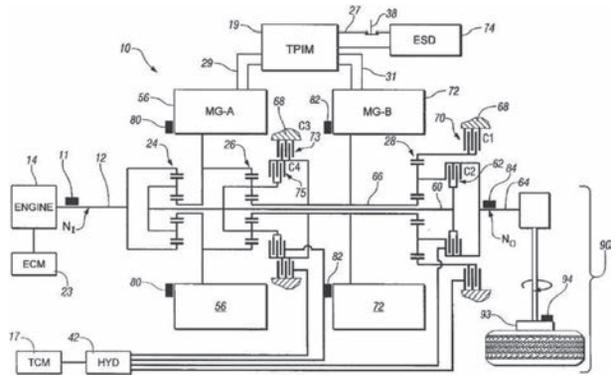


Рисунок 5 — Гибридная электромеханическая трансмиссия по патенту США компании General Motors [7] и др.:

TCM 17 — модуль управления трансмиссией; TPIM 19 — модуль инвертора мощности; ECM 23 — модуль управления ДВС; ESD 74 — модуль накопителя энергии; модули 56 и 72 — МГ-А и МГ-В соответственно
Figure 5 — Hybrid electromechanical transmission under the US patent of General Motors company [7] and others:
TCM 17 — transmission control module; TPIM 19 — power inverter module; ECM 23 — ICE control module; ESD 74 — energy storage module; modules 56 and 72 — MG-A and MG-B respectively

выбора выходного крутящего момента и моментов обоих МГ, а также блок 320 управления переключением режимов и старт-стопом ДВС. В схему также входят модули 17, 19, 23, аналогичные рисунку 5.

Ограничимся раскрытием только блока 310 (рисунок 7). На данном структурном уровне он пред-

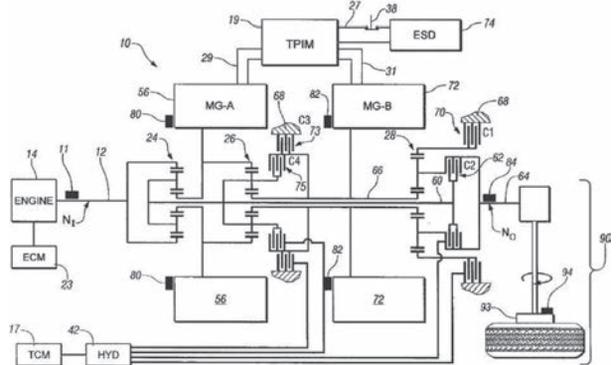


Рисунок 6 — Структурная схема системы управления верхнего уровня для ГСУ [7]

Figure 6 — Block diagram of the top-level control system for HPU [7]

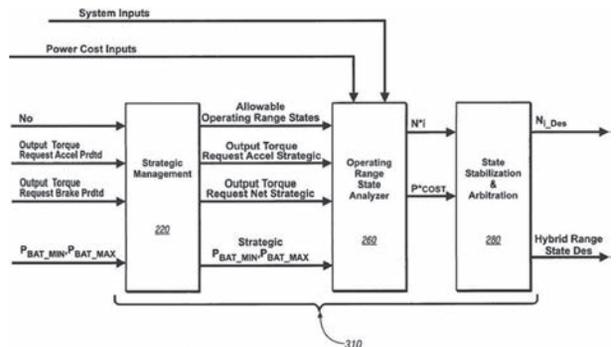


Рисунок 7 — Структурная схема блока 310 стратегического управления по рисунку 6 [7]

Figure 7 — Block diagram of the strategic management unit 310 according to the Figure 6 [7]

ставлен блоками 220, 260, 280. Первый осуществляет «стратегический» (так в оригинале) менеджмент на основе запросов тягового и тормозного моментов, лимитов мощности батареи и выдает второму блоку их значения. Второй анализирует текущее состояние рабочего режима с учетом значений сигналов на входах системы, а также дополнительной информации о располагаемой мощности. Третий — блок стабилизации и арбитража — выдает команды на величину скорости ДВС и параметров гибридного режима.

Описанные процедуры дают первое представление о задачах, решаемых в процессе менеджмента энергии ГСУ в реальном масштабе времени на борту движущегося автомобиля. Это только начало многошаговых последовательностей действий (алгоритмов), на финише которых — срабатывание исполнительных устройств. Следует отметить, что алгоритмы, составляющие содержание блоков (по крайней мере, многих из них), также защищены патентами из упомянутого выше пакета (например, патент, касающийся формирования выходного крутящего момента МГ и трансмиссии в целом [8]).

Наличие двух источников энергии усложняет процессы управления, так что выбор, основанный на интуиции разработчика, часто приводит к ошибкам и не способен полностью реализовать потенциал современных ГСУ [5]. Для эффективного менеджмента энергии разработаны и совершенствуются научно обоснованные стратегии и инструментарий для их реализации. Судя по числу публикаций, к настоящему времени это направление исследований стало одним из самых популярных в области АТ.

Так, в работе [5] предложена комбинированная квазиоптимальная стратегия менеджмента под названием RB-ECMS (Rule-Based \pm Equivalent Consumption Minimization Strategies). Здесь процедура оптимизации предусматривает формирование функции стоимости, с помощью которой сравниваются варианты решений и, в частности, минимизируются комбинации расхода топлива и токсичных выбросов. Некоторые результаты компьютерного моделирования движения гибридного автомобиля с применением данной стратегии управления приведены в таблице 1, где представлены данные по экономии топлива в литрах на 100 км (левый столбец цифр), относительному расходу (средний столбец) и относительной экономии (правый столбец) при различных вариантах режимов работы ГСУ. Варианты режимов различаются применением (обозначено

символом x) компонентов, сокращенные названия которых указаны в головках столбцов левой части: BER (Brake Energy Recovery Mode) — рекуперация энергии при торможении; M — только мотор-генератор (МГ); MA (Motor Assist) — помощь МГ, т. е. совместная работа ДВС и МГ; CH (Charging mode) — зарядка батареи).

За базу сравнения (расход топлива 100 %) принят режим работы только ДВС, показанный в первой строке. Последовательное подключение компонентов в соответствии с данной стратегией управления обеспечивает рост экономии топлива, которая достигает максимума 44,4 % (последняя строка таблицы).

В завершение раздела рассмотрим приведенное в [9] влияние различных стратегий менеджмента энергии на режимы работы ГСУ с ГЭМТ General Motors. Она имеет 2 МГ, 2 планетарных ряда и 4 многодисковых фрикциона, что обеспечивает 2 режима бесступенчатого регулирования передаточного числа (EVT1, EVT2) и 4 механические ступени (FG1...FG4).

На рисунке 8 для данной ГЭМТ представлены результаты применения четырех стратегий менеджмента. Для каждой из них в левом столбце показана топографическая характеристика ДВС в координатах «скорость — крутящий момент» на четырех графиках, на каждом из которых нанесены рабочие точки ДВС при работе по одной из названных стратегий. В правом столбце дано время работы на каждом из шести режимов ГЭМТ, соответствующее этой стратегии.

При сравнении расположения массивов рабочих точек на характеристике ДВС существенная разница между стратегиями становится очевидной. Так, велик их разброс на левом графике рисунка 8 *a* (программа *a*, основанная на интуиции разработчика). Лучшая с этой точки зрения — адаптивная программа *d* (см. рисунок 8 *d*). Обращает внимание большая разница между ними в использовании механических передач, которой в [9] придается большое значение в связи с более высоким их КПД по сравнению с двойным преобразованием энергии на режиме генерации и преобразований.

Еще 3–4 года назад вопрос о применении АТ на батарейных электромобилях воспринимался с недоумением. В автомобильной прессе и в интернете обсуждали, есть ли на них коробки передач, а если их нет, то разбирались, почему [10–12]. Но к этому времени в многочисленных публикациях уже была обоснована целесообразность применения на батарейных автомобилях 2-, 3-ступенчатых и даже многоступенчатых и бесступенчатых АТ. Были опубликованы положительные результаты теоретических исследований их влияния на динамику, расход энергии такого автомобиля и на уровень его вредных выбросов.

С ростом популярности и объемов мирового производства батарейных электромобилей отноше-

Таблица 1 — Результаты применения стратегии RB-ECMS [5]
Table 1 — Results of applying the RB-ECMS strategy [5]

| Hybrid mode (active = x): | | | | | Fuel economy (l/100 km) | Relative fuel consumption | Relative fuel saving |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| BER | M | CH1 | CH2 | MA2 | | | |
| — | — | — | — | — | 5.35 | 100.0% | — |
| x | x | — | — | — | 3.23 | 60.4% | 39.6% |
| x | x | x | — | — | 3.04 | 56.4% | 43.6% |
| x | x | x | x | x | 2.98 | 55.6% | 44.4% |

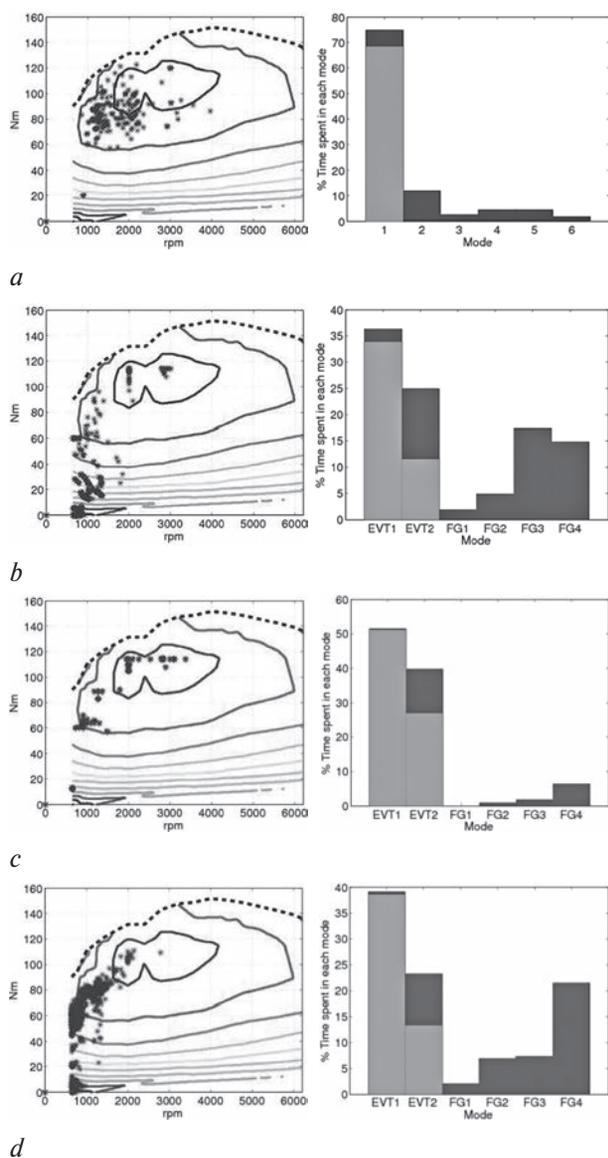


Рисунок 8 — Сравнение различных стратегий менеджмента энергии при моделировании движения электромобиля с гибридной трансмиссией по городскому циклу UDSS (Urban Dynamometer Driving Schedule) [8]: *a* — эвристическое управление; *b* — управление на основе оптимизации с применением кусочно-линейного фактора эквивалентности; *c* — управление на основе оптимизации с применением адаптивного кусочно-линейного фактора эквивалентности; *d* — оптимальное управление с применением некаузального динамического программирования; серый цвет — работа электропривода, черный цвет — работа механических передач
Figure 8 — Comparison of various energy management strategies for modeling the movement of an electric vehicle with a hybrid transmission on the urban cycle UDSS (Urban Dynamometer Driving Schedule) [15]: *a* — heuristic control; *b* — optimization-based control using piecewise linear equivalence factor; *c* — optimization-based control using adaptive piecewise linear equivalence factor; *d* — optimal control using non-causal dynamic programming; gray — operation of the electric drive, black — operation of mechanical gears

ние к проблеме применения на них АТ за последние два года стало резко изменяться в положительную сторону [13–15]. Более того, судя по публикациям в интернете, в текущем году уже проявилась конкуренция между гибридными и быстро развивающимися батарейными. Опыт массовой эксплуатации легковых электромобилей всех классов привел

к важным выводам, оказавшим существенное влияние на их дальнейшее совместное развитие.

Так, быстрое увеличение пробега на одной зарядке батареи привело к тому, что для автомобилей, постоянно эксплуатируемых в городе, ее стало достаточно для работы только на электроприводе в течение всего рабочего дня. Эта глобальная тенденция потребовала от производителей соответствующих корректировок перспективных планов производства. С другой стороны, она же рассматривалась как подтверждение того, что 1-ступенчатый механический редуктор в электроприводе достаточен для обеспечения скоростного диапазона городского электромобиля в пределах существующих ограничений скорости движения.

В данном контексте представляется показательной получившая известность судьба гибрида Chevy Volt компании General Motors. Этот компактный подзаряжаемый гибрид с бесступенчатой планетарной многорежимной трансмиссией был снят с производства в 2019 году после широких публичных обсуждений. По сравнению с другими популярными моделями известных компаний его «производственная» жизнь (описанная, в частности, в [16]) оказалась минимум вдвое короче.

В чем же причины столь бесславного конца? Одна из очевидных — постепенное падение спроса на эту модель в последние годы. Первый ее показ состоялся в 2007 году — всего через несколько месяцев после сенсационного заявления Tesla о создании батарейного электромобиля с пробегом до зарядки 200 миль. На осознание опасности этой конкуренции компании General Motors потребовалось несколько лет. Ее ответом стало представление в январе 2015 года концепции новой, чисто электрической модели Chevy Bolt с пробегом на одной зарядке около 200 миль. Ее цена — 37 500 долларов — примерно такая же, как и у Chevy Volt. Это привело к тому, что все чаще потребители приходили к мысли: зачем покупать гибрид с заправкой топливом и подзарядкой, если можно купить батарейный электромобиль с таким же пробегом и за те же деньги?

Выпуская Chevy Volt, компания рассчитывала, что эта машина станет в ряд с электромобилями Toyota. Но неожиданностью стало то, что у них совершенно разные покупатели: у Toyota они рассматривают автомобиль как признак солидного статуса и продвижения по социальному лифту, а здесь в основном молодежь, но и она в перспективе хотела бы того же. Таким образом, оказалось, что покупателям Chevy Volt нужна совсем другая машина. Их было продано более 100 000 и все с убытком. Так что «это была первая и очень-очень критичная ошибка Дженерал Моторс». В результате, закрывая завод Chevy Volt, компания объявила о выпуске Chevy Bolt и переходе на батарейные электромобили [16].

Однако говорят и о том, что чисто городской электромобиль — тоже компромисс, который уходит в историю, так как в конечном итоге каждому

пользователю нужен более универсальный, чтобы радиус его действия не ограничивался городской чертой, который можно обеспечить при уже достигнутом техническом уровне. Возможно, именно это усилило понимание того, что на высоких скоростях (150 км/ч и выше) такому электромобилу нужна хотя бы одна дополнительная ступень с меньшим передаточным числом. С ее помощью можно вывести МГ из зоны максимальных частот вращения с пониженным КПД, т. е. вернуть его в экономичную зону.

Рассмотрим результаты оценки влияния числа ступеней АТ на режимы работы силовой установки на примере из обзора применения АТ на батарейных электромобилях [17]. На рисунке 9 приведены 4 варианта структуры силовой установки: с 1-ступенчатым редуктором и с 2-, 3- и 4-ступенчатой ДСТ (АТ с двумя фрикционными на входе). Для этих вариантов структуры батарейного электромобиля класса В на четырех графиках рисунка 10 показаны топографические характеристики их МГ при моделировании движения по ездовому циклу HWFET (на скоростных магистралях).

На графиках в координатах «частота вращения — крутящий момент МГ» нанесены кривые равных КПД. Массивы точек изображают его рабочие режимы, имевшие место в процессе мо-

делирования движения по названному ездовому циклу. Видно, что при одной ступени (см. рисунок 10 а) большинство точек на высоких частотах вращения МГ (5000–6000 об/мин) расположено в зоне низких КПД — менее 90 %. При двух ступенях (см. рисунок 10 б) массив точек перемещается влево и поворачивается до вертикального положения, достигая зоны 92–94 % как показано стрелкой. При трех и четырех ступенях наблюдается тот же эффект, но перемещения несколько сложнее.

Отмечается, что, несмотря на усложнение конструкции и потери в ней, введение второй ступени позволяет снизить потребление энергии в среднем на 5 кВт/ч (при этом не оценивалось влияние на проблемы надежности и долговечности, о которых упоминалось в начале статьи).

Также может быть повышена эффективность рекуперативного торможения за счет переключения на другую ступень на данном режиме. Однако если в процессе переключения произойдет разрыв потока мощности, тормозной момент уменьшится. А это, несмотря на кратковременность (менее 1 с), может вызвать ощущение неисправности и панику водителя [17].

Таким образом, управление процессом переключения ступеней АТ в электромобилях имеет свою специфику и сложности, что отмечается во многих

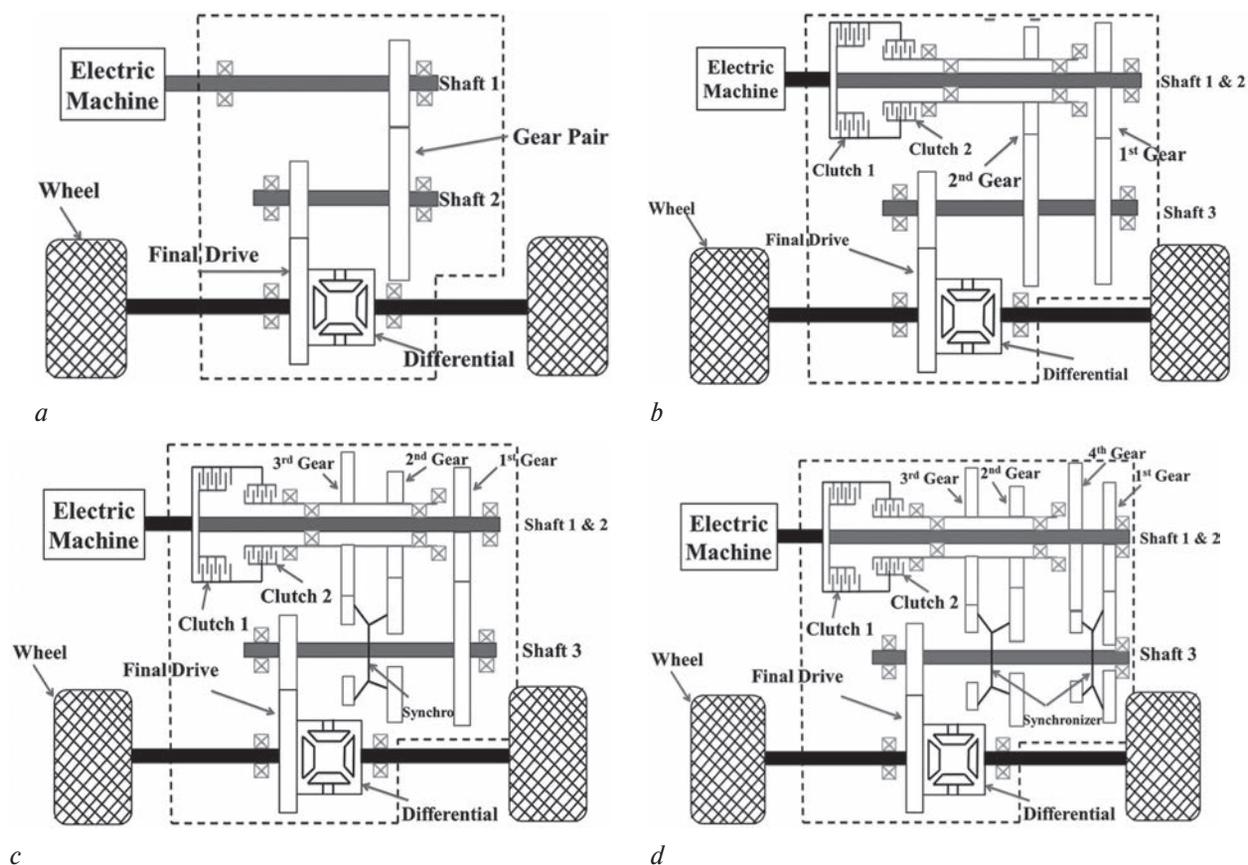


Рисунок 9 — Структура силовой установки батарейного электромобиля: а — с 1-ступенчатым редуктором; б — с ДСТ, имеющей 2 ступени; в — с ДСТ, имеющей 3 ступени; д — с ДСТ, имеющей 4 ступени [17]

Figure 9 — Structure of the power unit of the BEV: а — with single-reduction gear unit; б — with 2-speed dual clutch transmission (DCT); в — with 3-speed DCT; д — with 4-speed DCT [17]

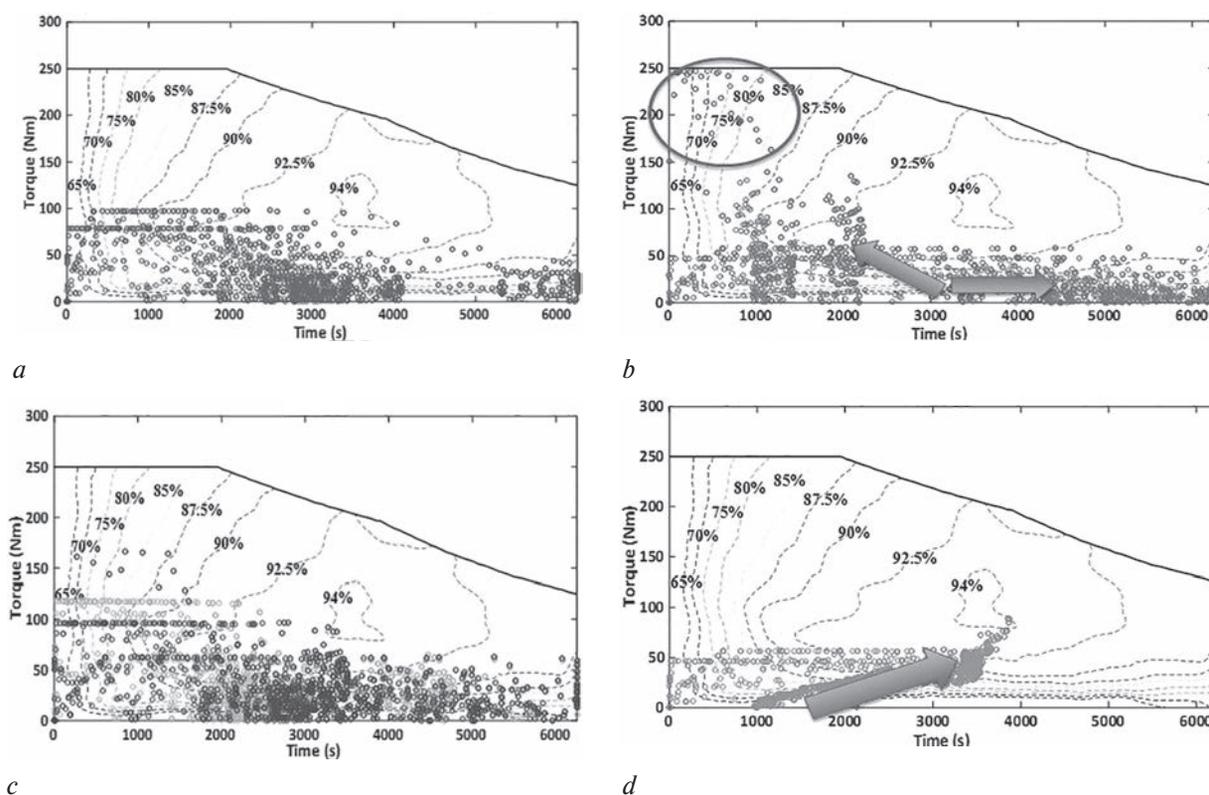


Рисунок 10 — Рабочие режимы МГ батарейного электромобиля класса В:

a — 1-ступенчатого; *b* — с 2-ступенчатой АТ; *c* — с 3-ступенчатой АТ; *d* — с 4-ступенчатой АТ [17]

Figure 10 — Operating modes of MG of the BEV class B:

a — single-speed; *b* — with 2-speed AT; *c* — with 3-speed AT; *d* — with 4-speed AT [17]

публикациях. Так, еще в 2007 и 2008 годах Tesla активно занималась созданием 2-ступенчатой АТ для моделей Tesla Model S и Tesla Roadster, но в конечном счете попытка оказалась неудачной (в том числе и из-за проблем управления). В итоге она отказалась от данной АТ, но вместо нее все же установил 2 МГ с разными передаточными числами редукторов [10, 15].

Следует отметить, что 2-ступенчатая электро-механическая АТ с двумя многодисковыми электроуправляемыми фрикционами устанавливалась на американский луноход с электроприводом [18].

Судя по новостям, публикуемым в интернете, в текущем году ведущие производители приступили к активному обновлению типажей выпускаемых электромобилей — как гибридных, так и батарейных. Так, компания Ford в ноябре 2019 года представила новый полностью электрический автомобиль Ford Mustang Mach-E с пробегом 300 миль на одной зарядке, производство которого начнется с 2021 года взамен несколько устаревшего Ford Focus Electric [19].

В числе АТ для батарейных автомобилей рассматриваются также бесступенчатые трансмиссии различных конструкций. Сравнение расхода энергии электромобилем с шестью видами АТ (с простым редуктором, 2-ступенчатой и четырьмя видами бесступенчатых) показало следующее. В варианте с простым редуктором расход энергии на городском ездовом цикле UDC (Urban Driving Cycle) на 10 % больше, чем у двух видов бесступенчатых АТ, и на 15 % больше на японском цикле J10-15 [20].

Таким образом, анализ большого числа публикаций [21] подтверждает, что применение многоступенчатых АТ улучшает показатели электромобиля по сравнению с 1-ступенчатыми редукторами с точки зрения максимальной скорости, ускорения, преодоления подъемов. Поскольку КПД одиночного МГ существенно изменяется при работе в широком диапазоне скоростей. А многоступенчатая АТ позволяет обеспечить его экономичную работу за счет выбора ступени, соответствующей текущему сочетанию скорости и крутящего момента, что снижает расход энергии. Образец 2-ступенчатой АТ немецкой компании ZF Friedrichshafen AG для батарейного автомобиля показан на рисунке 11.

Не считая увеличения массы и сложности, на результаты применения АТ влияют оптимальный выбор ступеней и исключение разрыва потока мощности при переключениях. Во многих исследованиях наилучшими при их оптимизации названы генетические алгоритмы и, при необходимости, варьирование законов переключений [21].

АТ на грузовых батарейных электромобилях. Большинство известных автомобильных компаний уже производит или разрабатывает грузовые электромобили и автобусы различных типов и моделей. Среди потенциальных рынков для батарейных электромобилей — парки грузоперевозок. Многие из них уже включают в свой состав электромобили. Например, компания Pepsico — седьмая из крупнейших в Северной Америке — имеет парк из 300 полностью

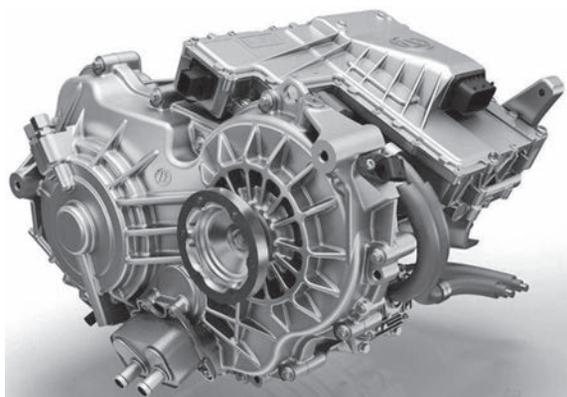


Рисунок 11 — Двухступенчатая АТ компании ZF Friedrichshafen AG для батарейного электромобиля [21]
Figure 11 — 2-speed AT of ZF Friedrichshafen for a BEV [21]

электрических грузовых автомобилей — наибольший на континенте. Наиболее часто используют развозные автомобили типа step van — средние грузовые фургоны класса 4 с большим объемом грузового пространства. При этом многие компании пока предпочитают гибриды вместо батарейных из-за ряда ограничений и стоимости зарядной инфраструктуры. Так, канадская компания Purolator обычно содержит 550 гибридов в парке общей численностью более 3000 машин. Однако коммерческие батарейные электромобили постепенно становятся одним из главных трендов электрификации дорожного транспорта. И следующий возможный шаг в их развитии — использование многоступенчатых АТ в силовых установках, над которым работают все больше и больше производителей автомобилей и трансмиссий [22].

Компания Eaton объявила о создании новой 4-ступенчатой вальной автоматическо-ме-

ханической трансмиссии (АМТ) с электронным управлением на крутящий момент до 1200 Н·м для удовлетворения растущих требований к электромобилям в секторах пассажирских и коммерческих перевозок. АМТ позволяет повысить КПД силовой установки на высоких скоростях и крутящий момент при трогании с места и движении на малых скоростях. Ее дорожные испытания показали повышение КПД на 20–30 % по сравнению с 1-ступенчатой и на 10–15 % — с 2-ступенчатой трансмиссией. Компания отмечает, что уже около 15 лет выпускает АТ для гибридных грузовых автомобилей.

На рисунке 12 для сравнения показаны 4-ступенчатая АМТ и макетный образец гибридной 6-ступенчатой АМТ с одинаковыми МГ для развозных электромобилей грузоподъемностью до 10 т [25].

Характеристики электромобиля с 1-ступенчатой трансмиссией и с 3-ступенчатой АМТ Eaton представлены на рисунке 13. На полях обоих графиков цифрами выделены 3 зоны, соответствующие низкому (до 80 %) и высокому (более 90 %) КПД МГ. На первом МГ находится в экономичной зоне только в диапазоне скоростей 30–60 км/ч, а на втором (с быстроходным МГ) — с 10 до 110 км/ч.

Как видно из таблицы 2, применение 3-ступенчатой АМТ позволяет повысить максимальную скорость на 20 %, КПД на ездовом цикле UDDS — на 8 %, ускорение при разгоне на 50 % и КПД трансмиссии на 5 % [25].

Компания Eaton провела исследование затрат энергии 12-метровым городским электробусом с многоступенчатой АМТ и уменьшенным МГ — 140 кВт вместо 200 кВт, 1100 Н·м вместо 2200 Н·м с одноступенчатой трансмиссией. Экономия

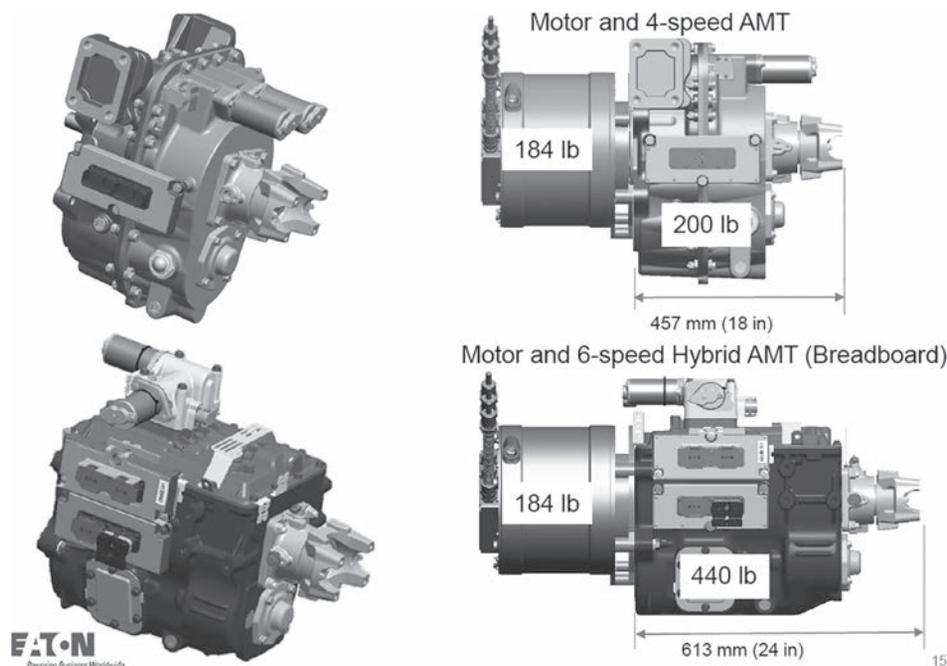
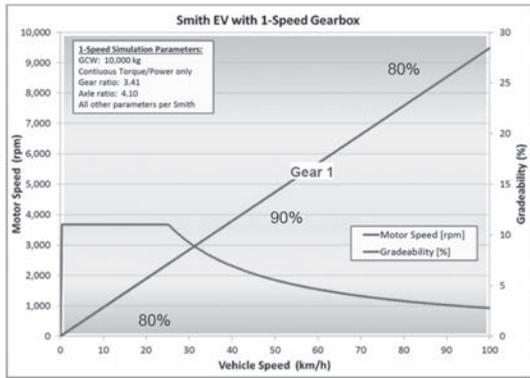
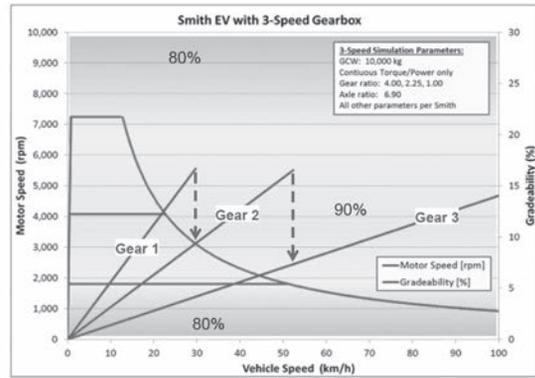


Рисунок 12 — Сравнение габаритов 4-ступенчатой АМТ и гибридной 6-ступенчатой АМТ Eaton [25]
Figure 12 — Comparison of the dimensions of Eaton 4-speed automated manual transmission (AMT) and hybrid 6-speed AMT [25]



Single-Speed: Motor in "Green Band" *only* from 30 to 60 km/h
20 to 40 mph



Three-Speed: Motor in "Green Band" from 10 to 110 km/h!
6 to 70 mph

a

b

Рисунок 13 — Характеристики батарейных развозных электромобилей: а — с 1-ступенчатой трансмиссией; б — с 3-ступенчатой АМТ Eaton [25]

Figure 13 — Characteristics of distribution BEVs: a — with a single-speed transmission; b — with 3-speed Eaton AMT [25]

энергии при применении 3-ступенчатой и 4-ступенчатой АМТ представлена в таблице 3. В левой колонке указаны 4 вида применяемых ездовых циклов. Исследовались 2 варианта передаточных чисел 4-ступенчатой АТ: с таким же диапазоном, как у 3-ступенчатой (средняя колонка) и увеличенным (вторая справа). Как видно, все 3 варианта АТ дают существенную экономию на всех циклах. При этом 4-ступенчатые лучше 3-ступенчатой, а наибольшую экономию дает 4-ступенчатая с увеличенным диапазоном (10,5 %) [26].

Прорабатываются возможности создания батарейных тяжелых карьерных самосвалов [27].

О развитии АТ гибридных автомобилей. Крупнейшая в Европе компания ZF Friedrichshafen AG

Таблица 2 — Сравнение показателей батарейных развозных электромобилей с 1-ступенчатой трансмиссией и с 3-ступенчатой АМТ Eaton по рисунку 13 [25]

Table 2 — Comparison of indicators of battery distribution electric vehicles with a single-speed transmission and with a 3-speed Eaton AMT according to the Figure 13 [25]

| Characteristic | Units | EV with SS | EV with MS Trans. | Target Improv. |
|--------------------|-------|------------|-------------------|----------------|
| Top speed | mph | 55 | 65+ | 20% |
| Efficiency on UDDS | mpge | 29.5 | 32 | 8% |
| Accel. (0-50 mph) | s | 90 | 45 | 50% |
| Gearbox efficiency | % | 93.4 | 98 | 5% |

Таблица 3 — Экономия энергии электробусом с 3-, 4-ступенчатой АТ по сравнению с 1-ступенчатой передачей [26]

Table 3 — Energy saving by an electric bus with 3-, 4-speed AT in comparison with the single-speed transmission [26]

| Drive Cycle | Baseline | Energy savings as compared to the baseline | | | |
|---------------|-------------------------------------|--|--|--|---------------------|
| | Direct Drive & Large Motor (kWh/km) | 3-speed | 4-speed [Same ratio spread as 3-speed] | 4-speed [Larger ratio spread than 3-speed] | 3-Speed vs. 4-speed |
| Beijing | 0.61 | 7.9% | 9.9% | 10.5% | 2.6% |
| China City | 0.70 | 6.0% | 7.2% | 7.8% | 1.8% |
| Chongqing | 0.65 | 8.8% | 10.3% | 10.8% | 1.9% |
| San Francisco | 0.46 | 9.2% | 9.5% | 9.3% | 0.1% |

объявила о создании новой генерации 8-ступенчатых АТ для гибридных силовых установок. Обычно гибридные трансмиссии создаются на базе серийных АТ путем замены гидротрансформатора электромотором. Однако данная ГЭМТ (рисунок 14) изначально проектировалась как гибридная. Ее модульная конструкция позволяет получать модели для средних, полных и подзаряжаемых гибридов в диапазоне мощностей 24–160 кВт. При этой мощности и напряжении 300 В крутящий момент специально разработанного МГ — 450 Н·м, что позволяет трогаться с места без участия ДВС. При этом специальная технология обмотки статора МГ в виде сварных медных стержней (*hairpin technique*) вместо проволочной намотки оказывает решающее влияние на повышение плотности мощности без увеличения габаритов. Электроника также интегрирована в картер АТ в тех же габаритах.

По оценке компании, к 2030 году по крайней мере 70 % всех новых автомобилей еще будут иметь ДВС. И это — возможность применения подзаряжаемых гибридов, поскольку они позволяют при ежедневной эксплуатации пользоваться только электроприводом, что существенно снижает токсичность выбросов. ZF надеется, что так и будет при использовании новой генерации 8-ступенчатых АТ, производство которых планируется с 2022 года на

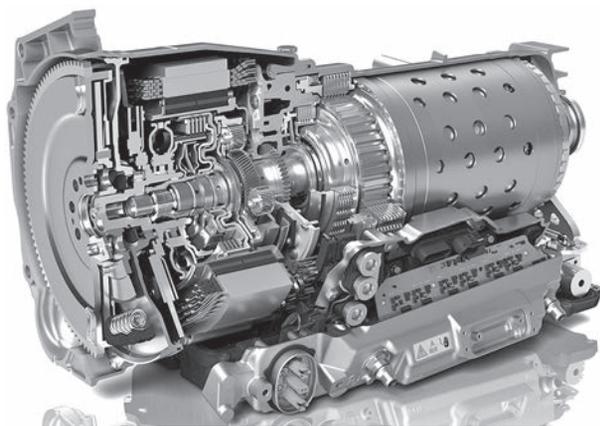


Рисунок 14 — Гибридная электромеханическая трансмиссия новой генерации компании ZF [28]

Figure 14 — Hybrid electromechanical transmission of ZF new generation [28]

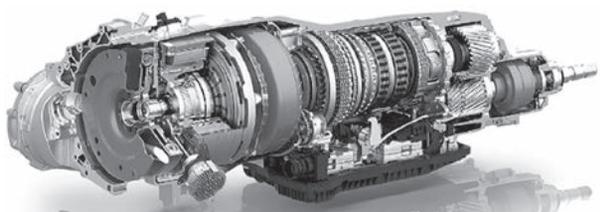


Рисунок 15 — Гибридная электрогидромеханическая АТ компании ZF на мощность 100 кВт [29]

Figure 15 — ZF hybrid electrohydraulic AT with a power of 100 kW [29]

заводе в Саарбрюккене (Германия), а несколько позже — в Китае и США. По многочисленным сообщениям прессы, в 2019 году она уже заключила крупнейший в своей истории контракт на 10 млрд евро с компанией BMW по их поставке [28].

Следует отметить, что эта АТ выполнена по революционной модульной технологии, на которую ZF перешла с 2009 года. Она основана на применении набора базовых модулей, каждый из которых имеет ряд типоразмеров в пределах указанного выше диапазона мощностей. В данном случае в нее интегрирован модуль МГ специально для батарейных электромобилей. Также на рисунке 15 показан механизм гибридной электрогидромеханической модификации АТ для тяжелых условий эксплуатации на мощность 100 кВт, содержащей модули МГ и гидротрансформатора [29].

В той же публикации представлена информация о последовательном снижении расхода топлива и выбросов CO_2 одиннадцати поколений АТ ZF начиная с 3-, 4-ступенчатых до новой генерации 8-ступенчатых. Как видно на диаграмме рисунка 16, полный гибрид этой генерации по сравнению с 8-ступенчатой АТ предыдущей (третьей) генерации снижает расход топлива на 13 %, а электромеханическая (батарейная) АТ по сравнению с этим гибридом — на 70 % (в пересчете на топливо).

Заключение. 1. По опубликованным данным, суммарный годовой объем мировых продаж электромобилей за пятилетку с 2013 по 2017 год вырос

почти в 8 раз (в том числе батарейных — почти в 4 раза), достигнув почти 3 млн. Планы ведущих компаний до 2030 года и на дальнейшую перспективу свидетельствуют о стремлении к ускорению электрификации автомобильной техники. Полагают, что при росте по наметившейся траектории количество электромобилей (гибридов и батарейных) к 2050 году достигнет миллиарда, и тогда выбросы CO_2 снизятся до уровня 2005 года.

2. Автомобилестроители стремятся удовлетворить эти требования. Так, согласно прогнозу, архитектура электромобилей в общей структуре автомобильного парка США до 2030 года изменится следующим образом. Доля обычных автомобилей (только с ДВС) в 2025 году уменьшится с 29 % (в 2020 году) до нуля. В 2030 году по сравнению с 2020 доля гибридов с системой «стоп–старт» уменьшится с 52 % до 7 %; возрастет: доля микрогибридов — с 12 % до 65 %, полных гибридов — с 4 % до 8 %, подзаряжаемых гибридов — с 3 % до 10 %, батарейных — с 1 % до 10 %.

Таким образом, прогнозируется значительное (в разы) увеличение производства основных видов гибридов, а значит, и применяемых в них АТ.

По прогнозу изменения структуры применяемых типов АТ в автомобильном парке США к 2030 году по сравнению с 2020 уменьшится применение МТ — с 4 % до 2 %, классических 3-8-ступенчатых АТ — с 47 % до 25 %. Увеличится количество 9-, 10-ступенчатых АТ — с 20 % до 30 %, гибридных — с 3 % до 9 %, трансмиссий батарейных — с 3 % до 10 %. Не изменится количество ДСТ — 4 % и бесступенчатых АТ — 20 %.

Крупнейшая в Европе компания ZF Friedrichshafen AG в 2019 году объявила о создании новой генерации 8-ступенчатых АТ для ГСУ. Ее модульная конструкция позволяет получать модели для средних, полных и подзаряжаемых гибридов в диапазоне мощностей 24–160 кВт. Крутящий момент специально разработанного МГ (450 Н·м) позволяет трогаться с места без участия ДВС.

3. Ситуация с применением АТ на батарейных легковых электромобилях существенно изменяется под влиянием совершенствования их конструкции. В начальный период их пробег до подзарядки был невелик, и при активной эксплуатации в городе требовалась подзарядка в течение дня. Но уже достигнут достаточный пробег — до 200 миль и более, что склоняет покупателей к отказу от гибрида в пользу батарейного как городского транспортного средства. Для него снимается и проблема пониженного КПД электропривода в зоне высоких скоростей движения ввиду повсеместных их ограничений в городах. Однако она остается актуальной для «универсального» городского автомобиля, радиус действия которого не ограничен чертой города.

Также остаются общие для них проблемы низкого КПД в зонах тяговой характеристики, соот-

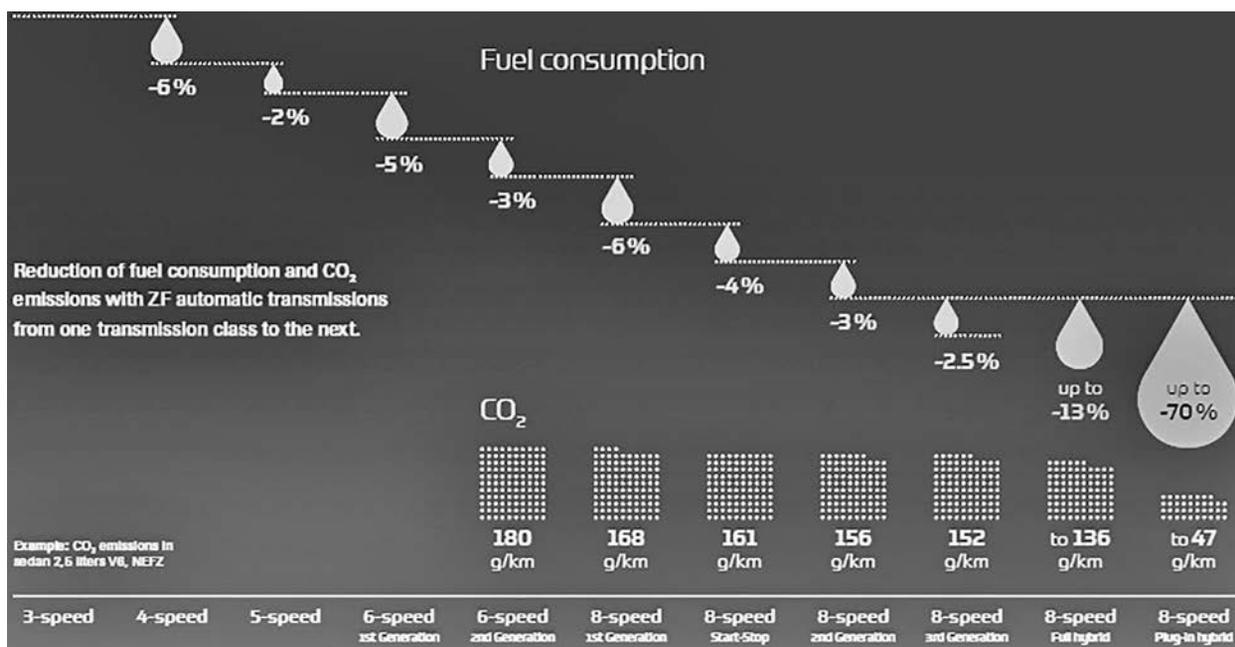


Рисунок 16 — Снижение расхода топлива и выбросов CO₂ поколений АТ ZF от 3-, 4-ступенчатых до новой генерации 8-ступенчатых [29]
 Figure 16 — Reduction of fuel consumption and CO₂ emissions with ZF ATs from generation of 3-, 4-speed to the new generation of 8-speed ATs [29]

ветствующих троганию с места и разгону до крейсерской скорости. Поэтому существует требование выдерживать режим максимального крутящего момента МГ не менее 18 с (хотя реально оно заведомо меньше). Например, у Toyota Prius на данном режиме мощность достигает 60 кВт, что при низком КПД приводит к нагреву обмотки статора до 150 °С. Очевидно, по этой причине у нее имели место случаи внезапного выхода из строя силовых транзисторов инверторов системы управления, которые чрезвычайно опасны для электроприводов с МГ на постоянных магнитах. Для их исключения Toyota первой в мире ввела жидкостное охлаждение не только обмоток статора, но и постоянных магнитов, размещаемых в роторе МГ.

4. Доказано, что применение АТ позволяет повысить энергоэффективность автомобилей всех типов. Что касается гибридов, то это подтверждается опытом массовой эксплуатации легковых автомобилей и коммерческого транспорта. Подавляющее число легковых батарейных электромобилей имеет в качестве трансмиссии одноступенчатые редукторы, которые очень выгодны для производства, так что производители электромобилей не хотели бы с ними расставаться. Однако выход на высокие диапазоны скоростей и тяговых усилий привел к предельному форсированию параметров электрических машин у ряда гибридов и, как следствие, к упомянутым выше проблемам вплоть до безопасности.

АТ, имеющая хотя бы две механические ступени, позволяет удерживать МГ батарейного электромобиля в зоне режимов с высоким КПД при трогании с места и разгоне на первой ступени с меньшим, чем при одноступенчатом редукторе, крутящим моментом, а при движении на максимальной скорости на

второй ступени — с меньшей частотой вращения. Кроме того, появляются новые возможности при выборе параметров МГ с учетом совместной работы с АТ. При увеличении числа ступеней или применении бесступенчатой АТ возрастает и этот эффект.

5. Большинство известных автомобильных компаний уже производит или разрабатывает грузовые электромобили и электробусы различных типов и моделей. Среди потенциальных рынков для батарейных грузовых электромобилей — парки грузоперевозок. Многие из них уже включают в свой состав электромобили. Например, компания Pepsico имеет парк из 300 полностью электрических грузовых автомобилей. Пользуются спросом развозные автомобили типа step van — средние грузовые фургоны класса 4 с большим объемом грузового пространства. При этом многие компании пока предпочитают вместо батарейных гибриды из-за ряда ограничений и стоимости зарядной инфраструктуры. Так, канадская компания Purolator обычно содержит 550 гибридов в парке общей численностью более 3000 машин.

Однако коммерческие батарейные электромобили постепенно становятся одним из главных направлений электрификации дорожного транспорта. И следующий возможный шаг в их развитии — использование многоступенчатых АТ в силовых установках, над которым работают все больше производителей автомобилей и трансмиссий.

Так, по данным компании Eaton применение ее 3-ступенчатой АМТ вместо 1-ступенчатого редуктора на батарейном развозном электромобиле грузоподъемностью 10 т повысило его максимальную скорость на 20 %, КПД на ездовом цикле UDDS — на 8 %, ускорение при разгоне — на 50 % и КПД трансмиссии — на 5 %.

Эта компания около 15 лет выпускает АТ для гибридных грузовых автомобилей и имеет опыт более 2 млрд миль их пробега. В 2019 году она объявила о создании новой 4-ступенчатой вальной АМТ на крутящий момент до 1200 Н·м для удовлетворения растущих требований к электромобилям в секторах пассажирских и коммерческих перевозок. Ее дорожные испытания показали повышение КПД на 20–30 % по сравнению с 1-ступенчатой и на 10–15 % с 2-ступенчатой АТ. Новая АМТ имеет проверенную архитектуру с промежуточным валом и обеспечивает уверенное трогание с места на подъемах, а также удержание МГ в наиболее экономичной зоне.

Компания также провела исследование затрат энергии 12-метровым городским электробусом с многоступенчатой АМТ и уменьшенным МГ — 140 кВт вместо 200 кВт и 1100 Н·м вместо 2200 Н·м с 1-ступенчатой трансмиссией. Экономия энергии при применении 3-ступенчатой и двух вариантов 4-ступенчатой АМТ проверялась на четырех видах ездовых циклов. Все 3 варианта АТ дают существенную экономию (до 10,5 %) на всех циклах.

6. Развитие электрификации привело к усложнению конструкции силовых установок и поставило промышленность перед задачей поиска компромиссных решений между возможностями их архитектуры и действующими ограничениями. Для новых приложений (тяжелых грузовых автомобилей и др.) нужны новые архитектуры, которые могли бы соответствовать конкретным техническим требованиям и ездовым циклам. *Конструкция ГСУ* обобщенно может быть представлена как возможное соединение физических объектов (*топологии и размеров компонентов*) в сочетании со *стратегией управления*. Большое значение имеет схема соединения компонентов ГСУ и двигателей автомобиля, называемая *конфигурацией ГСУ*. В литературе конфигурации широко изучены. Создана методология их отбора на ранних стадиях разработки с использованием заданных *библиотек компонентов*.

Исследование приемлемых архитектур по природе является комбинаторным и обычно базируется на человеческой интуиции. К настоящему времени созданы математически строгие алгоритмы перечисления всех годных архитектур. Технология выбора их топологии на этапах комбинаторного генерирования множеств вариантов, полного перебора и начальной отбраковки непригодных фактически представляет собой не что иное как *синтез схем ГСУ*. Однако на последующих ее этапах решается *задача комплексной оптимизации*, которая включает *выбор размерностей компонентов, минимизацию расхода топлива и энергии* (включенные в число критериев оптимизации), а также органически входящий в нее синтез топологии. Это, в конечном итоге, позволяет *автоматизировать оптимальное проектирование ГСУ*.

Минимизация расхода топлива и энергии на уровне конструкции выполняется на этапах проек-

тирования — при выборе соответствующей архитектуры и топологических схем. Но далее она продолжается в *динамическом режиме* в рамках решения задач новой области — *менеджмента энергии, перманентно осуществляемого во время движения электромобиля* его бортовыми электронными системами управления верхнего уровня (*Supervisory Systems*). В ряде публикаций предложены методы выбора *оптимальной стратегии менеджмента энергии ГСУ*.

Список литературы

1. Lightweight Hybrid Electrical Vehicle Structural Topology Optimisation Investigation Focusing on Crashworthiness [Electronic resource] / J. Christensen [et al.] // Int. J. Vehicle Structures & Systems. — 2011. — No. 3(2). — Pp. 113–122. DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.3.2.06>.
2. Review of Optimal Design Strategies for Hybrid Electric Vehicles / E. Silvas, T. Hofman, M. Steinbuch // 2012 Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling The International Federation of Automatic Control Rueil-Malmaison, France, October 23–25, 2012. — Pp. 57–64.
3. Simultaneous Optimization of Topology and Component Sizes for Double Planetary Gear Hybrid Powertrains [Electronic resource] / W. Zhuang [et al.] // Energies. — 2016. — No. 9(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/en9060411>.
4. Ing, A.H. Automated topology optimization of hybrid electric vehicle powertrains [Electronic resource] / A.H. Ing, J. McPhee // International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. — 2015. — Vol. 7, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2015.074671>.
5. Lin, C.-C. Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck [Electronic resource] / C.-C. Lin [et al.] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2003. — Vol. 11, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2003.815606>.
6. Красневский, Л.Г. Управление гибридными электро-механическими трансмиссиями: архитектура, технические средства и типовые задачи систем управления верхнего уровня / Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — 2013. — Вып. 2. — С. 63–68.
7. Method and apparatus for securing an operating range state mechanical transmission: pat. US 8099219, USA / GM Global Technology Operations LLC, Daimler AG, Chrysler LLC, BMW. — Publ. date: 17.01.2012.
8. Control architecture for output torque shaping and motor torquedetermination for a hybrid powertrain system: pat. US 8204656, USA / GM Global Technology Operations LLC, Daimler AG, Chrysler Group LLC, BMW. — Publ. date: 17.01.2012.
9. Energy Management Control of a Hybrid Electric Vehicle with Two-Mode Electrically Variable Transmission [Electronic resource] / B. Bole [et al.] // EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, California, May 6–9, 2012. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.2827.6480>.
10. Future Electric Vehicle Transmissions May Have Multi-Speed Gearboxes [Electronic resource] / The Green Optimistic. — Mode of access: <https://www.greenoptimistic.com/transmission-electric-vehicle-gearboxes/>.
11. Why don't electric cars use gearboxes? [Electronic resource] / Quora. — Mode of access: <https://www.quora.com/Why-dont-electric-cars-use-gearboxes>.
12. Do Electric Cars Have Gears? No. Here's Why [Electronic resource] / The Green Optimistic. — Mode of access: <https://www.greenoptimistic.com/electric-cars-gears/>.
13. EV Transmissions Are Coming, And It's A Good Thing [Electronic resource] / Clean Technica. — Mode of access: <https://cleantechnica.com/2019/07/22/ev-transmissions-are-coming-and-its-a-good-thing/>.
14. Two-speed transmission for EVs could make a comeback [Electronic resource] / Green Car Reports. — Mode of access: www.greencarreports.com/news/1124133_two-speed-transmission-for-evs-could-make-a-comeback.

15. How many speeds make sense for EV transmissions? Probably one [Electronic resource] / Autoblog. — Mode of access: <https://www.autoblog.com/2015/07/21/how-many-speeds-make-sense-for-ev-transmissions-probably-one/>.
16. 10 lessons from the short life of the Chevy Volt, 2011–2019 [Electronic resource] / Green Car Reports. — Mode of access: https://www.greencarreports.com/news/1122269_10-lessons-from-the-short-life-of-the-chevy-volt-2011-2019.
17. Ruan, J. Development of continuously variable transmission and multi-speed dual clutch transmission for pure electric vehicle [Electronic resource] / J. Ruan, P.D. Walker, J. Wu // Advances in Mechanical Engineering. — 2018. — Vol. 10(2). DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018758223>.
18. Two-Speed Gearbox Dynamic Simulation Predictions and Test Validation [Electronic resource] / D.G. Lewicki [et al.] // NASA/TM–2010-216363. — Mode of access: <https://www.semanticscholar.org/paper/Two-Speed-Gearbox-Dynamic-Simulation-Predictions-Lewicki-Desmidt/08d9dd3fbb5bffd6c1d7fddfc8e63394487a3c68>.
19. 2021 Ford Mustang Mach-E preview: Electric SUV targeting 300-mile range [Electronic resource] / Green Car Reports. — Mode of access: https://www.greencarreports.com/news/1126066_2021-ford-mustang-mach-e-preview-electric-suv-targeting-300-mile-range.
20. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission [Electronic resource] / F. Bottiglione [et al.] // Energies. — 2014. — No. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7128317>.
21. Ahssan, M.R. Electric vehicle with multi-speed transmission: a review on performances and complexities [Electronic resource] / M.R. Ahssan, M.M. Ektesabi, S.A. Gorji // SAE International Journal of Alternative Powertrains. — 2018. — Vol. 7, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.4271/08-07-02-0011>.
22. Performance evaluation criteria for the analysis of Class-4 electric truck [Electronic resource] / A. Morozov [et al.] // CSME International Congress 2016. — Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/305398171_PERFORMANCE_EVALUATION_CRITERIA_FOR_THE_ANALYSIS_OF_CLASS-4_ELECTRIC_TRUCK.
23. Design and optimization of a drivetrain with two-speed transmission for electric delivery step van [Electronic resource] / A. Morozov [et al.] // IEEE Conference Publication. 2014. — Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7056081>.
24. Eaton 4-speed electric vehicle transmission provides torque, efficiency [Electronic resource] / OEM. — Mode of access: <https://www.oemoffhighway.com/drivetrains/clutch-transmission/transmissions/press-release/21023147/eaton-eaton-4speed-electric-vehicle-transmission-provides-torque-efficiency>.
25. Chavdar, B. Multi-Speed Transmission for Commercial Delivery Medium Duty Plug-In Electric Drive Vehicles [Electronic resource] / B. Chavdar // Eaton Corporation. — Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/317095381_Multi-Speed_Transmission_for_Commercial_Delivery_Medium_Duty_Plug-In_Electric_Drive_Vehicles-AMR2016_Project_ID_VS161_Principal_Investigator_Bulent_Chavdar_Eaton_Corporation_June_9_2016.
26. Development of robust and modular drive system for medium duty electric vehicles [Electronic resource] / B. Chavdar [et al.] // 11th International CTI Symposium, Automotive Transmission, HEV and EV Drives, Novi, MI, USA, 15–18 May, 2017.
27. Gear Ratio Optimization of a Multi-Speed Transmission for Electric Dump Truck Operating on the Structure Route [Electronic resource] / S. Tan [et al.] // Energies. — 2018. — Vol. 11(6): 1324. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061324>.
28. ZF introduces new generation 8-speed automatic transmission for hybrid drives [Electronic resource] // ZF. — Mode of access: <http://www.zf.com>.
29. Efficient and dynamic: Transmission Technology from ZF / ZF Friedrichshafen AG – PC Transmission Technology – 09/2017 — Mode of access: https://www.zf.com/master/media/en/corporate/m_zf_com/company/download_center/products/passenger_cars/getriebetechnologie.pdf.

KRASNEVSKIY Leonid G., Corresponding Member of the NAS of Belarus,
D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher

E-mail: krasnevski_l@tut.by

Joint 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 2

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 8-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. The first part is published in no. 2(51) of the journal.

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-12-26>

References

- Christensen J., Bastien C., Blundell M., Gittens A., Tomlin O. Lightweight Hybrid Electrical Vehicle Structural Topology Optimisation Investigation Focusing on Crashworthiness. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 2011, no. 3(2), pp. 113–122. DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.3.2.06>.
- Silvas E., Hofman T., Steinbuch M. Review of Optimal Design Strategies for Hybrid Electric Vehicles. *Proc. 2012 Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling*. Rueil-Malmaison, 2012, pp. 57–64. Available at: <http://purl.tue.nl/707151442561321.pdf>.
- Zhuang W., Zhang X., Peng H., Wang L. Simultaneous Optimization of Topology and Component Sizes for Double Planetary Gear Hybrid Powertrains. *Energies*, 2016, no. 9(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/en9060411>.
- Ing A.H., McPhee J. Automated topology optimization of hybrid electric vehicle powertrains. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 2015, vol. 7, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2015.074671>.
- Lin C.-C., Peng H., Grizzle J.W., Kang J.-M. Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, vol. 11, no. 6. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2003.815606>.
- Krasnevskiy L.G. Upravlenie gibridnymi elektromekhanicheskimi transmissiyami: arkhitektura, tekhnicheskie sredstva i tipovye zadachi sistem upravleniya verkhnego urovnya [Controlling of hybrid electromechanical transmissions: architecture, equipment and type problems of higher-level control systems]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2013, iss. 2, pp. 63–68 (in Russ.).
- Buur H., Kaminsky L.A. *Method and apparatus for securing an operating range state mechanical transmission*. Patent USA, no. 8099219, 2012.
- Heap A.H., McConnell J.J. *Control architecture for output torque shaping and motor torque determination for a hybrid powertrain system*. Patent USA, no. 8204656, 2012.
- Bole B., Coogan S., Cubero-Ponce C., Edwards D., Melsert R., Taylor D. Energy Management Control of a Hybrid Electric Vehicle with Two-Mode Electrically Variable Transmission. *Proc. EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*. Los Angeles, 2012. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.2827.6480>.
- Jerew B. Future Electric Vehicle Transmissions May Have Multi-Speed Gearboxes. *The Green Optimistic*, 2015. Available at: <https://www.greenoptimistic.com/transmission-electric-vehicle-gearboxes/>.
- Why don't electric cars use gearboxes? *Quora*. Available at: <https://www.quora.com/Why-dont-electric-cars-use-gearboxes>.
- Jerew B. Do Electric Cars Have Gears? No. Here's Why. *The Green Optimistic*, 2015. Available at: <https://www.greenoptimistic.com/electric-cars-gears/>.
- Sensiba J. EV Transmissions Are Coming, And It's A Good Thing. *Clean Technica*, 2019. Available at: <https://cleantechnica.com/2019/07/22/ev-transmissions-are-coming-and-its-a-good-thing/>.
- Evarts E.C. Two-speed transmission for EVs could make a comeback. *Green Car Reports*, 2019. Available at: www.greencarreports.com/news/1124133_two-speed-transmission-for-evs-could-make-a-comeback.
- Blanco S. How many speeds make sense for EV transmissions? Probably one. *Autoblog*, 2015. Available at: <https://www.autoblog.com/2015/07/21/how-many-speeds-make-sense-for-ev-transmissions-probably-one/>.
- Voelcker J. 10 lessons from the short life of the Chevy Volt, 2011–2019. *Green Car Reports*, 2019. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1122269_10-lessons-from-the-short-life-of-the-chevy-volt-2011-2019.
- Ruan J., Walker P.D., Wu J., Zhang N., Zhang B. Development of continuously variable transmission and multi-speed dual clutch transmission for pure electric vehicle. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10(2). DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018758223>.
- Lewicki D.G., Desmidt H., Smith E.C., Bauman S.W. *Two-Speed Gearbox Dynamic Simulation Predictions and Test Validation*. NASA/TM–2010-216363. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Two-Speed-Gearbox-Dynamic-Simulation-Predictions-Lewicki-Desmidt/08d9dd3fbb5bffd6c1d7fddfc8e63394487a3c68>.
- Voelcker J. 2021 Ford Mustang Mach-E preview: Electric SUV targeting 300-mile range. *Green Car Reports*, 2019. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1126066_2021-ford-mustang-mach-e-preview-electric-suv-targeting-300-mile-range.
- Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sornioti A. *Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission*. *Energies*, 2014, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7128317>.
- Ahssan M.R., Ektesabi M.M., Gorji S.A. Electric vehicle with multi-speed transmission: a review on performances and complexities. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2018, vol. 7, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.4271/08-07-02-0011>.
- Morozov A., Humphries K., Zou T., Angeles J. Performance evaluation criteria for the analysis of Class-4 electric truck. *Proc. CSME International Congress*. Kelowna, 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/305398171_PERFORMANCE_EVALUATION_CRITERIA_FOR_THE_ANALYSIS_OF_CLASS-4_ELECTRIC_TRUCK.
- Morozov A., Humphries K., Zou T., Martins S., Angeles J. Design and optimization of a drivetrain with two-speed transmission for electric delivery step van. *Proc. IEEE International Electric Vehicle Conference*. Florence, 2014. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7056081>.
- Eaton 4-speed electric vehicle transmission provides torque, efficiency. *OEM*, 2018. Available at: <https://www.oemoffhighway.com/drivetrains/clutch-transmission/transmissions/press-release/21023147/eaton-eaton-4speed-electric-vehicle-transmission-provides-torque-efficiency>.
- Chavdar B. *Multi-Speed Transmission for Commercial Delivery Medium Duty Plug-In Electric Drive Vehicles*. 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317095381_Multi-Speed_Transmission_for_Commercial_Delivery_Medium_Duty_Plug-In_Electric_Drive_Vehicles-AMR2016_Project_ID_VS161_Principal_Investigator_Bulent_Chavdar_Eaton_Corporation_June_9_2016.
- Chavdar B., Genise T.A., Naghshtabrzi P., Papp G. Development of robust and modular drive system for medium duty electric vehicles. *Proc. 11th International CTI Symposium, Automotive Transmission, HEV and EV Drives*. Novi, 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317017584_DEVELOPMENT_OF_ROBUST_AND_MODULAR_DRIVE_SYSTEM_FOR_MEDIUM_DUTY_ELECTRIC_VEHICLES.
- Tan S., Yang J., Zhao X., Hai T., Zhang W. Gear Ratio Optimization of a Multi-Speed Transmission for Electric Dump Truck Operating on the Structure Route. *Energies*, 2018, vol. 11(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061324>.
- ZF introduces new generation 8-speed automatic transmission for hybrid drives*. Available at: <http://www.zf.com>.
- Efficient and dynamic: Transmission Technology from ZF*. ZF Friedrichshafen AG, PC Transmission Technology, 2017. Available at: https://www.zf.com/master/media/en/corporate/m_zf_com/company/download_center/products/passenger_cars/getriebetechnologie.pdf.