



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 62-235

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.
главный научный сотрудник лаборатории бортовых мехатронных систем мобильных машин
НИЦ «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин»¹
E-mail: krasnevski_l@tut.by

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.
генеральный директор¹
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

А.В. БЕЛЕВИЧ
заместитель генерального директора по высокоавтоматизированному электротранспорту¹
E-mail: belevich2005@yandex.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13.06.2023.

О ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЯХ К МЕХАТРОННЫМ СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ТРАНСМИССИЯМИ БАТАРЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Батарейные электромобили с автоматическими трансмиссиями — новый быстро развивающийся сегмент типажа электромобилей и автоматических трансмиссий, сконфигурированных для такого применения. Перспективным направлением их развития является интеграция мехатронных систем управления автоматическими трансмиссиями и электроприводом, т. е. переход к интегрированным силовым установкам батарейных электромобилей. Для формирования технических требований к конструкции мехатронных систем управления такой установки необходимы предварительно заданные критерии. Однако не только по мехатронным системам управления, но и по самим батарейным электромобилям с автоматическими трансмиссиями еще не накоплен достаточный опыт производства и эксплуатации, что определяет актуальность данной статьи. Ее цель — формирование подходов к разработке технических требований на создаваемые мехатронные системы управления автоматических трансмиссий интегрированных силовых установок батарейных электромобилей с автоматическими трансмиссиями. Проведен анализ (по сформированной информационной базе) совокупности общих требований к конструкциям близких аналогов — современных мехатронных систем управления автоматическими трансмиссиями гибридных электромобилей, а также результатов оптимизации их параметров, характеристик и алгоритмов управления процессами переключения ступеней автоматических трансмиссий для применения в батарейных электромобилях. Показано, что составы базовых функциональных свойств мехатронных систем управления автоматическими трансмиссиями батарейных и гибридных электромобилей во многом совпадают. В результате сформирован состав комплекса базовых критериев оценки мехатронных систем управления батарейных электромобилей. По результатам экспертной оценки и анализа аналогов, соответствующих современным требованиям и близких к типуажам отечественной техники, предложены базовые технические требования к составу и функциональным характеристикам мехатронных систем управления автоматическими трансмиссиями силовых установок батарейных электромобилей (с учетом частных требований к входящим в них подсистемам). В перечне технических требований и критериев их оценки включен ряд сложившихся в мировом автомобилестроении технологий. Учитывая, что для практического их применения необходима систематизированная информация, которую сложно найти в русскоязычном изложении, даны необходимые пояснения.

Ключевые слова: автоматические трансмиссии, мехатронные системы управления автоматических трансмиссий, гибридные электромобили, батарейные электромобили

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-5-16>

Введение. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 213 от 9 апреля 2021 г. была утверждена Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 годы (далее — Комплексная программа). Ее цель — создание новой области экономического роста на основе формирования отрасли машиностроения — производства электротранспорта, а также условий для увеличения количества используемых транспортных средств на электрической тяге, расширения инфраструктуры электротранспорта и минимизации негативных влияний на экологию. В числе решаемых задач — организация производства электротранспорта, его базовых компонентов и элементов инфраструктуры и их максимальной локализации.

В последние три года начался процесс перехода от гибридных электромобилей (ГЭМ) к «чистым», с накопителями энергии на аккумуляторных батареях. Он развивается столь стремительно, что рассматривается как «революция электромобилей». Сегодня этот процесс вновь активизировался после некоторой паузы, вызванной пандемией COVID-19. В интернет-публикациях отмечается, что батарейные электромобили (БЭМ) уже становятся самым привлекательным объектом инвестиций для ведущих автомобильных компаний, которые не начинают разработок новых конструкций двигателей внутреннего сгорания (ДВС), ограничиваясь работами по поддержанию выпускаемых.

Конструкции ГЭМ непрерывно совершенствовались на основе опыта их массового производства и эксплуатации. В первую очередь это коснулось самых дорогих компонентов — аккумуляторных батарей. Их цена уже уменьшилась в разы, а пробег ГЭМ на одной зарядке батареи возрос до 200 км и более, что позволило в условиях города работать на одной зарядке весь день и заряжать батарею ночью, не используя ДВС. Именно это привело к массовому спросу на БЭМ и применению их в новых областях.

Однако в конструкцию ГЭМ входят многоступенчатые автоматические трансмиссии (АТ), тогда как БЭМ и сегодня имеют одноступенчатые механические редукторы для понижения скорости обратимых электрических машин (мотор-генераторов — МГ) до скоростей ведущих колес. Поэтому постепенный выход электромобилей (ЭМ) на высокие диапазоны скоростей и тяговых усилий привел к предельному форсированию параметров применяемых МГ. В результате на первый план вышли другие проблемы — понижение КПД электропривода с ростом скорости в зоне высоких скоростей и медленный разгон с места — вплоть до проблем

безопасности. И при выборе МГ это ставит производителей перед альтернативой между высоким крутящим моментом и высокой максимальной скоростью. Сложилась конфликтная ситуация, которая толкает к выбору большего МГ, чем необходимо при разгоне, и большего передаточного числа редуктора, чем достаточно для городской езды.

В итоге стало очевидно, что как грузовым, так и легковым БЭМ нужны механические АТ (хотя бы двухступенчатые), а грузовым — даже многоступенчатые [1, 2].

Таким образом, БЭМ с АТ — это возникший буквально в последние годы перспективный, быстро развивающийся сегмент типажа ЭМ и, соответственно, типажа трансмиссий, сконфигурированных для такого применения.

Как видно из изложенного, все больше новых участников включается в различные стадии процессов создания БЭМ, в том числе и в нашей стране. В связи с этим *цель статьи* — формирование подходов к разработке технических требований для создания мехатронных систем управления (МСУ) АТ и интегрированных МСУ силовых установок БЭМ с АТ, предусмотренных Комплексной программой.

В представленные ниже перечни технических требований (ТТ) и критерии их оценки включен ряд технологий, которые сложились в мировом автомобилестроении уже к 2000 году и перманентно развиваются, в том числе применительно к БЭМ и ГЭМ. Учитывая, что для практического их применения при разработке ТТ реальных объектов необходима соответствующая конкретная информация, которую сложно найти в систематизированном виде в русскоязычном изложении, авторы сочли, что следует дать некоторые пояснения, которые помещены в соответствующем разделе.

Об особенностях применения и выборе типа механических ступенчатых АТ для БЭМ. Логика развития БЭМ, большое число опубликованных результатов научных исследований, а также первые итоги массовой эксплуатации указывают на целесообразность применения на них многоступенчатых или же бесступенчатых АТ.

В мировом автомобилестроении накоплен значительный опыт применения АТ в гибридных силовых установках (ГСУ) ГЭМ, базирующийся на результатах их массового производства и эксплуатации. АТ, сконфигурированные для этих целей, — это гибридные электромеханические трансмиссии (ГЭМТ), которые содержат от одного до трех планетарных рядов, столько же МГ и несколько

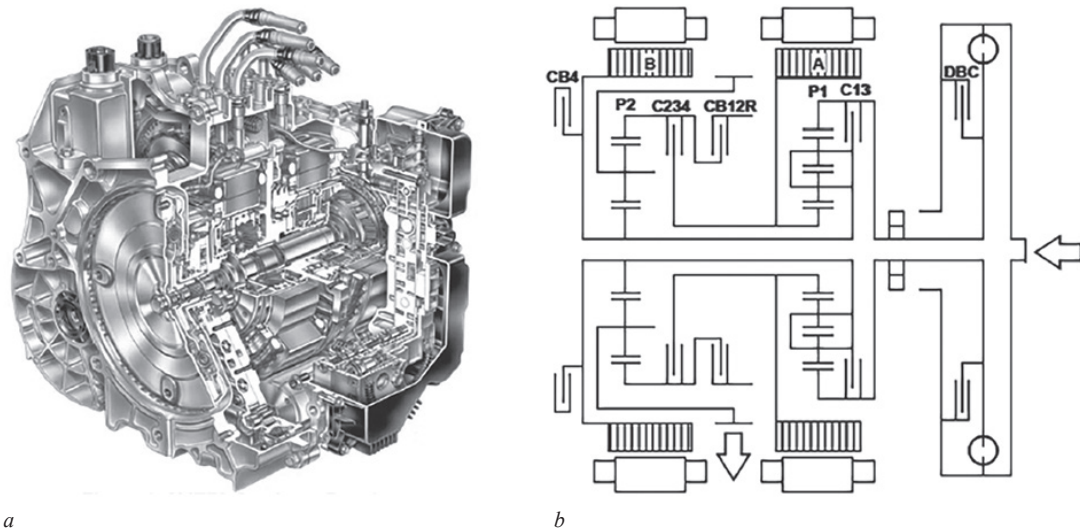


Рисунок 1 — Гибридная электромеханическая трансмиссия 2MT70 компании General Motors с двумя МГ для переднеприводных автомобилей: *a* — вид в разрезе; *b* — кинематическая схема
 Figure 1 — General Motors hybrid electromechanical transmission 2MT70 with two motor generators for front-wheel drive cars: *a* — cross-sectional view; *b* — kinematic scheme

элементов управления (фрикционов). Конфигурируемая управлением топологическая схема их соединения в единую ГЭМТ имеет комбинированную (параллельно-последовательную) архитектуру, которая позволяет получить несколько рабочих режимов (совместной или раздельной работы ДВС и МГ, а также механических ступеней). Компания General Motors в 2009 году объявила о начале производства первой в мире ГЭМТ модели 2MT70 для переднеприводных легковых автомобилей, показанной на рисунке 1 [3].

Отличие ГЭМТ от классических механических и гидромеханических АТ — отсутствие жесткой кинематической связи между ее входным и выходным валами. Но имеется связь с управляемым передаточным отношением, определяемая требуемыми режимами работы МГ. Как отмечается в [4], для осуществления этой глобальной процедуры необходимо «управление и контроль высокого уровня» (High Level Supervisory Control) — система управления верхнего уровня (СВУ). Такие СВУ для ГЭМТ по рисунку 1, перечень пакета которых приведен в [5], являются близкими аналогами рассматриваемых ниже МСУ АТ БЭМ.

Однако использование на БЭМ специализированных на гибриды АТ, имеющих в массовом производстве, нерационально, так как они рассчитаны на обеспечение как совместной, так и раздельной работы ДВС и электропривода, что существенно усложняет их конструкцию. Ее составление с применяемыми сегодня на БЭМ одноступенчатыми редукторами показывает, что специализированная АТ для БЭМ по конструкции должна быть промежуточной между ними.

Первой применила АТ на легковом БЭМ известная компания Porsche, которая в 2019 году сообщила об установке двухступенчатой АТ на спортивный автомобиль Porsche Taycan — первый

БЭМ с АТ среди множества машин с одноступенчатым редуктором. Отмечалось, что применение АТ здесь обеспечивает те же преимущества, что и у автомобилей с ДВС: повышение ускорения при разгоне с места на первой ступени АТ (до 60 миль/ч за 3,4 с) и повышение КПД на высоких скоростях за счет движения на второй ступени с пониженной скоростью МГ.

Переход на коммерческие БЭМ становится одним из главных направлений электрификации дорожного транспорта. И следующий возможный шаг в их развитии — использование многоступенчатых АТ в силовых установках, над которыми работают все больше производителей автомобилей и трансмиссий. Так, по данным компании Eaton применение ее трехступенчатой АМТ вместо одноступенчатого редуктора на развозном БЭМ 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 %.

Из числа известных типов АТ наиболее близкой в части требований к АТ БЭМ многими исследователями признается трансмиссия с двумя сцеплениями на входе (Dual Clutch Transmission — ДСТ). Судя по публикациям, на сегодняшний день начальном этапе применения на БЭМ их привлекают именно двухступенчатые варианты АТ типа ДСТ.

Типичный образец такого варианта ДСТ — кинематическая схема с концентричным расположением пары фрикционов в общем корпусе на входном валу, напрямую связанном с МГ (рисунок 2). Ведущие диски обоих фрикционов шлицами связаны с их общим корпусом, что обеспечивает две параллельные постоянные связи кинематической схемы с МГ, как в классической ДСТ. Алгоритмы управления обеспечивают участие МГ в переключении ступеней фрикционами [6].

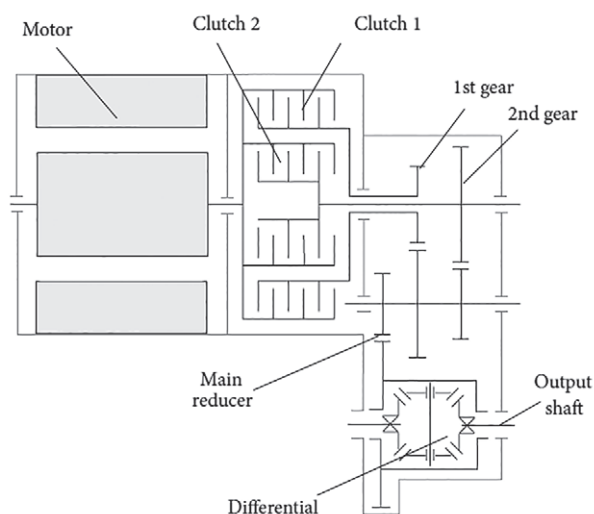


Рисунок 2 — Кинематическая схема двухступенчатой автоматической трансмиссии с двумя фрикционами для батарейного электромобиля

Figure 2 — Kinematic scheme of a two-stage automatic transmission with two clutches for a battery electric vehicle

Исключение ДВС кардинально упрощает конструкцию МСУ АТ БЭМ, но создает и новые проблемы, так как динамические характеристики ДВС и МГ несопоставимы. Это, в частности, диктует необходимость управления МГ в процессе переключения ступеней ГЭМТ, в том числе и на двухступенчатых [3].

О выборе критериев оценки МСУ для электрических силовых установок с АТ БЭМ. При формировании ТТ к конструкции МСУ такой установки, согласно установившейся практике, руководствуются предварительно задаваемыми критериями. Однако, как выше отмечалось, не только по данной МСУ, но и по самим БЭМ с АТ еще не накоплен соответствующий опыт производства и эксплуатации.

Требования к МСУ в целом и к ее частям во многом зависят от ее назначения. Очевидно, что МСУ АТ карьерного самосвала и легкового автомобиля не могут быть одинаковыми по конструкции (хотя теоретическая база у них единая). Таким образом, следует различать два вида ТТ: базовые и специальные. Базовые характерны для большинства рассмотренных АТ, тогда как специальные отражают особенности их применения (например, для пилотируемых и беспилотных БЭМ).

Совокупность общих требований, направленных на дальнейшее повышение потребительских свойств автомобиля на основе применения современных МСУ АТ, в том числе МСУ АТ БЭМ, укрупненно представлена в виде комплекса, включающего следующие группы:

- воздействие на окружающую среду (вредные выбросы) — для ГЭМ;
- динамика, управляемость, устойчивость движения;

- экономичность расходования электроэнергии накопителя;
- комфортабельность, воздействие на водителя и пассажиров;
- нагруженность, долговечность, безопасность;
- совершенство процессов функционирования АТ.

Соответственно, выбор критериев оценки рассматриваемых МСУ можно построить на сопоставлении их базовых характеристик с аналогичными для ГЭМ, а также с общими требованиями к МСУ АТ. С этой целью проведен анализ (по предварительно сформированной информационной базе) совокупности общих требований к близким аналогам — современным МСУ АТ ГЭМ, обеспечивающим их высокие потребительские свойства, а также анализ результатов моделирования и оптимизации их параметров, характеристик, законов и алгоритмов управления процессами переключения ступеней для применения в БЭМ. Установлено, что в них прослеживается выполнение практически всех базовых требований (кроме воздействия ГСУ на окружающую среду). Другими словами, составы базовых функциональных свойств МСУ БЭМ и ГЭМ во многом совпадают. В результате сформирован следующий состав комплекса базовых критериев оценки МСУ БЭМ:

- интеграция МСУ МГ и АТ в объединенную систему (рекомендуемая в том числе для ДСТ БЭМ);
- применение технологии «управление по проводам» (Steer-by-Wire);
- оптимизированные законы выбора моментов автоматических переключений ступеней АТ в зависимости от скоростных и силовых режимов движения БЭМ и МГ;
- комплекс требований к процессам функционирования АТ, в том числе:
 - технология согласованного управления фрикционами АТ (“Clutch-to-Clutch Shifts” (СТС));
 - управление продольным ускорением БЭМ во время переключения ступеней АТ, снижение джерка;
 - адаптивность;
 - самообучение;
- перманентный мониторинг технического состояния, перманентная диагностика компонентов АТ;
- комплекс мероприятий по обеспечению безопасности АТ, в том числе:
 - безопасный выбор режима «передний ход — нейтраль — задний ход» (типа ETRS — Electronic Transmission Range Selection);
 - сохранение маневренности БЭМ при определенных отказах (типа “Limp Home”).

О составе технических требований к МСУ АТ БЭМ. Назначение ТТ — дать однозначное определение ее состава и функциональных характеристик. Термин «мехатронная система» подразумевает симбиоз компонентов механики, электроники и информатики, определяя соответствующую ее структуру. В исполнительном (обычно электро-

гидравлическом) механизме (ИМ) МСУ сосредоточены электро- и гидромеханические устройства, а в электронном блоке — компоненты электроники и информатики, содержащие программно-алгоритмическое обеспечение системы, которые и формируют синтезируемые МСУ функциональные характеристики АТ. Таким образом, ТТ к МСУ АТ БЭМ должны содержать информацию, относящуюся к трем названным выше областям.

Отбор признаков для включения в состав базовых требований по этим разделам ТТ выполнен на основе анализа конструкций ряда АТ различного «возраста» и назначения по упомянутой выше информационной базе.

Исполнительный механизм МСУ — многофункциональное электрогидромеханическое устройство. Оно содержит ряд подсистем, интегрированных в одном (реже в двух или более) корпусах. (*Справочно:* у легковых АТ ИМ устанавливается в масляном поддоне, иногда вместе с электронным блоком, а у тяжелых — снаружи на картере АТ для облегчения обслуживания; легковая АТ весит порядка 100 кг, а у тяжелой столько же может весить ИМ).

Структуру и эволюцию ИМ АТ для тяжелых гидромеханических трансмиссий можно проследить на примере развития семейств АТ компании General Motors (Allison), описанных в пакете патентов начиная с 60-х годов прошлого века [7].

Состав базовых требований к таким ИМ, принимаемый здесь как типовой, задается наличием в нем следующих подсистем:

- управления гидросистемой (гидронасос, регулятор давления);
- управления системой смазки;
- управления гидросистемой охлаждения;
- управления фрикционными и их моментами трения при переключениях;
- электрогидравлических клапанов (ЭГК) управления подсистемами;
- аварийного управления АТ.

Эти требования выделены отдельно, так как именно ИМ, с одной стороны, содержит основные компоненты систем жизнеобеспечения АТ и ее МСУ, а с другой — служит интерфейсом между АТ и электронной частью МСУ, т. е. ограничивает как ее структуру, так и предельные параметры исполняемых команд.

Состав базовых требований к функциональным характеристикам ИМ:

- устойчивость гидросистемы;
- адаптивность, быстродействие, точность;
- безопасность (требования к «управлению по проводам», защиты от отказов);
- реализация технологии СТС.

Названные выше системы Allison выбраны в качестве типовых, так как они наиболее близки к типажам тяжелой отечественной техники, при этом содержат ряд передовых технических решений в конструкциях МСУ АТ. На рисунке 3 приведена принципиальная схема ИМ из состава МСУ Allison 4–5 поколений в качестве примера результатов трансформации названных выше ранних (которая, без сомнения, соответствует совре-

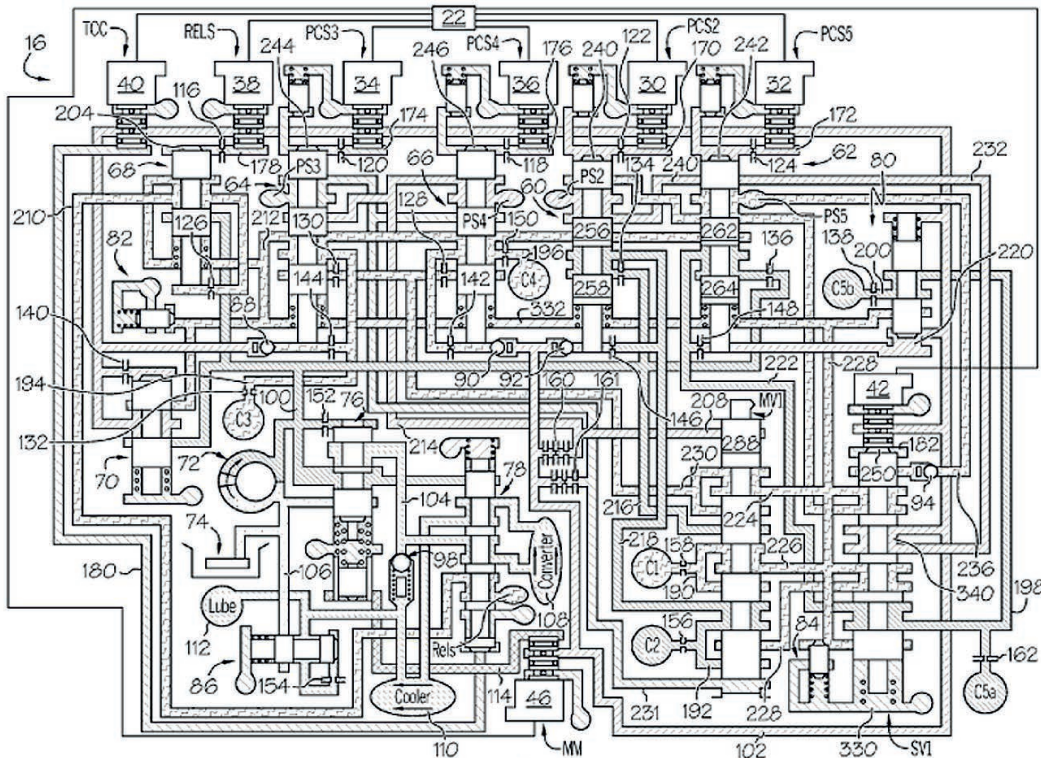


Рисунок 3 — Исполнительный механизм МСУ многоступенчатой планетарной ГМТ 4–5 поколений компании Allison [8]
 Figure 3 — MSC executive mechanism of the Allison multi-speed planetary hydromechanical transmission of 4–5 generations [8]

менным требованиям). Очевидно, что сложность конструкции ИМ возросла (во многом в связи с ростом требований к безопасности). В частности, как видно на рисунке 3, по этой причине в нее вернули гидравлическую память.

О базовых прикладных функциональных алгоритмах. Выполнение перечисленных выше требований имеет непосредственное отношение в целом к МСУ АТ, что позволяет на этой основе сформулировать следующие технические требования к ее алгоритмам и программному обеспечению:

- безопасность;
- интеграция алгоритмов и программ управления АТ и тягового электропривода;
- комплексная диагностика;
- быстродействие, точность, адаптивность, оптимизация;
- комплекс базовых алгоритмов технологии СТС;
- комплекс базовых алгоритмов выбора законов автоматических переключений ступеней;
- технология «управление по проводам».

О базовом прикладном программном обеспечении. Периферия трансмиссии применительно к двухступенчатой АТ с двумя сцеплениями может быть представлена схемой, показанной на рисунке 4 [9], которая используется при формировании архитектуры программного обеспечения (ПО) МСУ. С этой целью необходимо предварительно разработать требования к ПО. Общие требования к автомобилю системно трансформируются в требования к трансмиссии и ПО, после чего может быть определена архитектура последнего.

В [9] отмечаются следующие наиболее важные задачи ПО:

- препроцессинг сигналов сенсоров;
- оценка входов от водителя (контроллер, педаль акселератора, тормоз);
- определение режима движения и подходящей ступени АТ;

- расчеты для управления режимами движения (трогание с места, движение с постоянной скоростью (cruising) или переключения, называемые менеджментом силовой установки);
- управление сцеплением и переключением ступеней или сцеплением и тормозом;
- внешнее управление ДВС (во время переключения);
- управление актюаторами (гидравлические клапаны);
- самодиагностика (бортовая диагностика);
- ПО безопасности для предотвращения критических ситуаций во время движения (движение в неправильном направлении).

На рисунке 5 показана схема соответствующих модулей ПО и наиболее важные коммуникационные сигналы. Это архитектура концептуального дизайна ПО. Далее показанные модули должны быть конкретизированы [9].

Пояснения. Ниже изложены краткие комментарии к формулировкам требований, критериям их оценки, применению базовых технологий, к соответствующей терминологии. По большинству из них дано в качестве примеров по одной ссылке на первоисточники информации.

Безопасность, технология «управление по проводам» (Fly-by-Wire) — многоплановая проблема, играющая важную роль при создании МСУ, а также самой АТ и автомобиля в целом как мехатронных объектов. Особое внимание уделяется надежности и безопасности при отказах элементов МСУ и диагностике АТ. На первом плане — оперативное (в реальном масштабе времени) обнаружение неисправностей и защита от их развития до опасных масштабов, способных привести к разрушению АТ и к дорожно-транспортным происшествиям. Одна из центральных — проблема обеспечения безопасного и высоконадежного интерфейса между водителем и АТ.

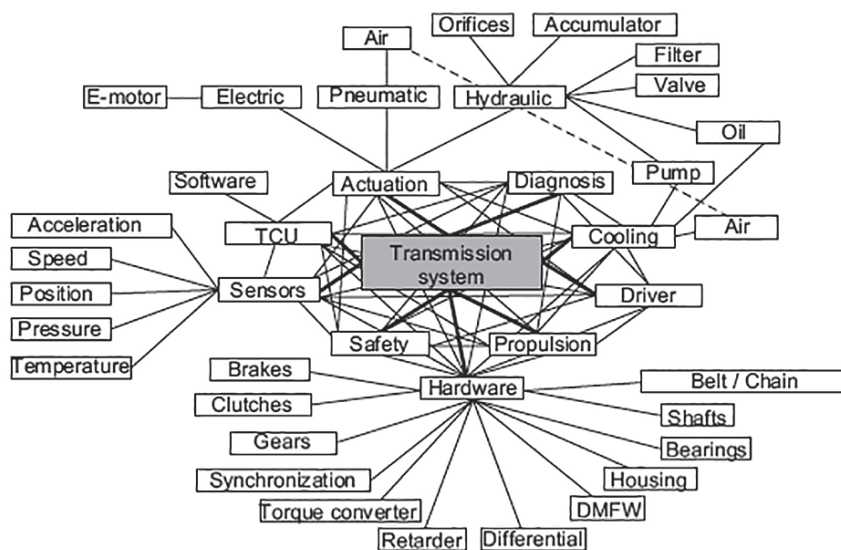


Рисунок 4 — К формированию архитектуры ПО МСУ АТ [9]
Figure 4 — Toward shaping the architecture of the AT MCS software [9]

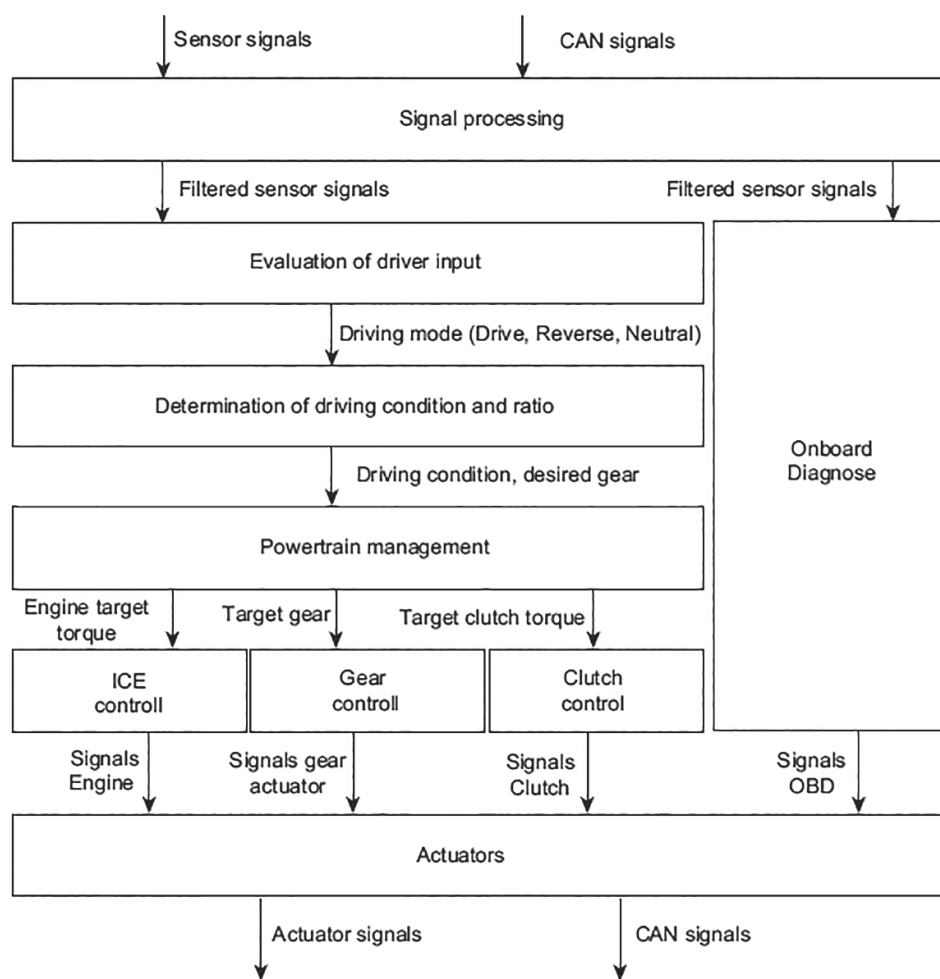


Рисунок 5 — Типовая архитектура ПО МСУ АТ (ДСТ) [9]
 Figure 5 — Typical architecture of AT MCS software (dual clutch transmission) [9]

Так, в патенте компании Allison [10] описана «электрогидравлическая система управления трансмиссией с двумя фрикционными, восстанавливающаяся после отказа» для вально-планетарной АТ 10 + 2 (предположительно, для новой АТ ТС10 этой компании).

Стало обязательным требование обеспечения режима «Limp Home» — аварийного режима, на который гидромеханическая передача автоматически переводится при возникновении отказа ЭГК МСУ [11]. При этом сохраняется текущая или включается другая, заранее определенная ступень АТ, что исключает аварийные ситуации в транспортном потоке. Также сохраняется возможность включения заднего хода и нейтрали, т. е. обеспечивается подвижность автомобиля. Это позволяет маневрировать и добраться своим ходом до ремонтной базы.

В 2000-х годах произошел активный переход к внедрению принципа «управление по проводам» не только в МСУ АТ, но также в МСУ тормозных, рулевых и других автомобильных систем управления [11, 12]. Это привело и к отказу от дальнейшего применения в АТ селектора ручного управления с механическим приводом. Что не упростило,

а усложнило МСУ. Так, компания General Motors создала для МСУ АТ легковых автомобилей новую подсистему ETRS (Electronic Transmission Range Selection — электронный выбор диапазона трансмиссии) [13]. Она обеспечивает сохранение включенной ступени АТ при отказе, если он произошел, когда рычаг контроллера находился в положении «драйв», а также повышает безопасность при ряде других отказов ситуаций. Актуальность данной системы подтверждается тем, что ведущая в области тяжелых АТ компания Allison в последние годы также получила на них ряд патентов [10].

Комплекс базовых алгоритмов выбора законов автоматических переключений ступеней. Формирование законов автоматического переключения ступеней широко используется как инструмент для оптимизации динамики и повышения экономичности автомобиля на основе моделирования с применением математических методов оптимизации. Так, компания Allison разработала для своих МСУ АТ 5 поколения новый управляющий программно-аппаратный комплекс FuelSense, который дает экономию топлива до 20 % по сравнению с предыдущей МСУ [14]. К его

особенностям, в частности, относятся управление скоростью ДВС и ускорением при разгоне автомобиля, а также использование прецизионного инклинометра при формировании законов управления. Эти технологии включены в МСУ новой 10-ступенчатой вально-планетарной АТ Allison TC10 мощностью 650 л. с. Комплекс FuelSense может устанавливаться и на некоторые модели ГМТ прежних выпусков. Так, МАЗ в 2018 году представлял на выставке в Москве новую модель сочлененного автобуса МАЗ 216 с АТ Allison T375R, оснащенной пакетом топливосберегающих опций FuelSense 2.0 Plus и новых технологий переключения передач DynActivetm Sencing [15]. Отмечается, что данная система идеально подходит для городских автобусов.

Наиболее распространенный тип законов автоматических переключений ступеней многоступенчатых АТ представляет собой совокупность зависимостей скоростей движения автомобиля в моменты переключения каждой пары смежных ступеней от положения педали акселератора. Он изображается двухкоординатной картой, которая вводится в память МСУ в виде таблицы. Дополнительно может вводиться третья координата — нагрузка. Кроме ускорения разгона, есть много других условий, которые могут учитываться при выборе точек переключений в процессе оптимизации (например, различные стратегии управления — экономическая, динамическая, спортивная, кик-даун).

Быстродействие, точность, адаптивность, оптимизация. Необходимость прецизионного управления обусловлена тем, что длительность автоматического переключения пары фрикционов на движущемся автомобиле лежит в пределах от 2...2,5 с в тяжелых АТ и до 0,4...0,5 в легковых. При этом в разных фазах процесса необходимы разные законы управления, а у включаемого фрикциона они должны автоматически изменяться несколько раз за одно срабатывание. Изменение характеристик, участвующих в переключении элементов, происходящее в процессе эксплуатации АТ (в частности, по мере износа) потребовало дальнейшего повышения точности и быстродействия устройств МСУ и перехода к принципам адаптивного управления [16]. Уже к середине 90-х годов XX века практически все МСУ АТ стали адаптивными. В итоге обеспечивается высочайшая плавность переключений (ставших практически неощутимыми для пассажиров).

Технология “Clutch-to-Clutch Shifts” — это технология управления переключением ступеней АТ, широко применяемая ведущими мировыми компаниями в массовом производстве автомобилей, ГЭМ и БЭМ. Вместе с АТ в ней задействованы ДВС, электропривод (в электромобилях), механические компоненты привода и масса автомобиля. Ее задача — обеспечение плавного (без

ощутимых рывков и ударов) переключения без разрыва потока мощности от ДВС (или тягового МГ) к ведущим колесам при поддержании заданного продольного ускорения автомобиля посредством согласованного управления участвующими в переключении фрикционами при минимизации их работы и мощности буксования. Все это — операции технологии СТС. Ее основа — алгоритмы управления всеми предусмотренными операциями. Архитектура комплекса алгоритмов МСУ АТ, в том числе алгоритмов СТС, определяется многоуровневой структурой АТ как объекта управления.

Обобщенно (для основных типов АТ) в нее входит ряд модулей (подсистем и устройств), имеющих свои собственные (локальные) системы управления. Основные модули первого уровня — гидротрансформатор, коробка передач, тормоз-замедлитель, гидросистема, МСУ, компоненты электропривода (в варианте ГЭМТ). В многоуровневый модуль МСУ входит модуль алгоритмов СТС, который также является многоуровневым. Структура комплексов типовых алгоритмов верхнего уровня и локальных алгоритмов технологии СТС, предложенная нами в [17, 18], приведена в таблице. Как показал анализ, МСУ современных ГЭМ массового производства имеют распределенную модульную многоуровневую иерархическую архитектуру с объединением модулей средствами локальных сетей связи. Это позволяет легко получать модификации ГЭМ и БЭМ с различными ДВС, АТ и другими подсистемами.

В рамках такой структуры главенствующую роль приобретает система управления верхнего уровня (СВУ), которая де-факто выступает как главный менеджер, организующий работу и взаимодействие всех компонентов (ДВС, АТ, МГ) как единой системы. В ходе выполнения этих функций СВУ должна выполнять ряд новых для теории и практики сложных задач, которые на данном этапе еще находятся в стадии отработки. Одна из основных задач — менеджмент генерации, расхода энергии и рекуперации энергии.

Интеграция алгоритмов и программ МСУ АТ и тягового электропривода. В силовых установках современных автомобилей успешно применяются интегрированные системы управления ДВС и АТ, что обеспечивает повышение экономичности, динамики, комфортабельности, ресурса АТ и в целом силовой установки. В конечном счете это достигается совместным управлением рабочими режимами ДВС и АТ в переходных процессах переключения ступеней, обеспечивающим снижение динамических нагрузок, работы и мощности буксования фрикционов, а также стабилизацию ускорения автомобиля. Эти методы освоены также в силовых установках ГЭМ с многорежимными многоступенчатыми АТ.

Исключение ДВС кардинально упрощает конструкцию МСУ силовой установкой БЭМ, но соз-

Таблица — Структура комплексов типовых алгоритмов верхнего уровня и локальных алгоритмов технологии СТС [17]
 Table — Structure of complexes of typical top-level algorithms and local algorithms of “Clutch-to-Clutch Shifts” technology [17]

Обозначение на русском языке	Обозначение на английском языке
Алгоритмы верхнего уровня	
Переключения вниз под нагрузкой	Clutch-to-Clutch Power-on Downshifts
Переключения вверх под нагрузкой	Clutch-to-Clutch Power-on Upshifts
Переключения вниз без нагрузки	Clutch-to-Clutch Power-off Downshifts
Переключения между нейтралью, передним и задним ходом АТ	Automatic Transmission Garage Shifts
Переключения с двумя переходами	Double Transition Shifts, Double Swap Shifts
Переключения с пропусками ступеней	Skip Shifts
Калибровки АТ и ее систем	Calibration of AT
Обеспечение подвижности при обесточивании МСУ и др.	Limp Home, Drive Home Capability
Управление прерванными переключениями	Control of Interrupted Shifts
Алгоритмы локального уровня	
Замкнутая система управления моментом трения фрикционов при переключении ступеней АТ	Closed-loop Clutch Control During Transmission Shift
Управление электрогидравлическими клапанами при переключениях ступеней — широтно-импульсная модуляция, гистерезис, вибрация	Pulse-Width-Modulated Current Signal, Hysteresis, Dither-Modulation, Variable Bleed Solenoid
Управление фрикционом блокировки гидротрансформатора АТ	Torque Converter Clutch Control
Управление регуляторами давления гидросистемы АТ	—
Управление заполнением включаемого фрикциона	Fill Time
«Управление по проводам»	Fly-by-Wire
Безопасность при отказах	—
Диагностика, мониторинг технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса АТ	Diagnostics, Prognostics and Health Management (PHM) of AT

дает и новые проблемы, так как динамические характеристики ДВС и МГ несопоставимы. Это, в частности, диктует необходимость освоения нового процесса — управления МГ во время переключения ступеней ГЭМТ. В рамках этого ноу-хау речь фактически идет об участии МГ в синхронизации инерционных масс динамической системы совместно с переключаемыми фрикционами, что снижает их нагруженность, уменьшая работу и мощность буксования по сравнению с технологией СТС без интеграции.

Заключение. БЭМ с АТ — это новый, перспективный, быстро развивающийся сегмент типажа электромобилей и, соответственно, типажа трансмиссий, сконфигурированных для такого применения.

Здесь применение двухступенчатых автоматических трансмиссий с «мокрыми» фрикционами, только начинающееся на легковых автомобилях, обеспечивает повышение ускорения при разгоне с места на первой ступени, повышение КПД на высоких скоростях за счет движения на второй ступени с пониженной скоростью МГ, а также их переключения без разрыва потока мощности, подводимой к ведущим колесам БЭМ. Перспек-

тивным направлением их дальнейшего развития является интеграция МСУ электроприводом и АТ, т. е. переход к интегрированным системам управления силовыми установками БЭМ.

Для решения этих задач необходимы специализированные АТ с мехатронными системами управления. Однако в настоящее время в Беларуси и России производство таких АТ и МСУ отсутствует.

В результате проведенного анализа уровня техники установлено, что сейчас не существует общепринятых, общепризнанных и стандартизованных критериев оценки рассматриваемых систем управления. Для их формирования применительно к актуальным задачам отечественной промышленности и науки проведен анализ совокупности известных общих требований к современному МСУ АТ, в том числе к МСУ АТ БЭМ, обеспечивающих высокие потребительские свойства современных БЭМ. Выполнен анализ предлагаемых типовых конструкций двухступенчатых АТ и их МСУ, методов и результатов моделирования и оптимизации их параметров, характеристик, законов и алгоритмов управления процессами переключения ступеней.

По результатам анализа сформирован комплекс критериев оценки конструкции систем МСУ трансмиссий транспортных средств с электрическими силовыми установками, который может быть использован при создании отечественных батарейных электромобилей.

В качестве аналогов, наиболее близких к типажам тяжелой отечественной техники и соответствующих современным требованиям, выбраны МСУ АТ компаний General Motors и Allison. При этом следует иметь в виду, что они адаптированы к массовому производству. Тем не менее, общие (базовые) критерии и технические требования существуют и подлежат исполнению исходя из предполагаемых возможностей.

По результатам их экспертной оценки и анализа разработаны базовые ТТ к составу и функциональным характеристикам МСУ многоступенчатых АТ электрических силовых установок с учетом частных технических требований к входящим в них подсистемам.

Как показал анализ, МСУ современных ГЭМ массового производства имеют распределенную модульную многоуровневую иерархическую архитектуру с объединением модулей средствами локальных сетей связи. Это позволяет легко получать модификации ГЭМ и БЭМ с различными ДВС, АТ и другими подсистемами.

В рамках такой структуры главенствующую роль приобретает система управления верхнего уровня. Она должна выполнять ряд новых для теории и практики сложных задач, которые на данном этапе еще находятся в стадии отработки. Одна из основных — менеджмент генерации, расходования и рекуперации энергии БЭМ.

Показано, что при построении МСУ многоступенчатых АТ БЭМ для создаваемых отечественных образцов электрических силовых установок технологических и транспортных машин можно применять подходы, опирающиеся на критерии оценки и технические решения МСУ АТ современных силовых установок ГЭМ и БЭМ массового производства, которые, в силу устойчивого массового применения, могут рассматриваться как базовые.

При этом следует учитывать, что они адаптированы к массовому производству, и при их применении исходить из располагаемых технических возможностей и структурирования очередности реализации в каждом конкретном случае.

Работа выполнена по гранту БРФФИ (договор № Т-21ЭТ-009 от 01.03.2021 г.).

Список литературы

1. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: анализ и перспективы применения на гибридных и батарейных

- электромобилей. Часть 1 / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 2(51). — С. 16–29.
2. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: анализ и перспективы применения на гибридных и батарейных электромобилей. Часть 2 / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 3(52). — С. 12–26. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-12-26>.
3. Hendrickson, J. General Motors front wheel drive two-mode hybrid transmission / J. Hendrickson, A. Holmes, D. Freiman // SAE World Congress & Exhibition, April 2009. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-0508>.
4. Miller, J.M. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type / J.M. Miller // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2006. — Vol. 21, iss. 3. — Pp. 756–767. — DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.872372>.
5. Method and apparatus to determine a preferred output torque for operating a hybrid transmission in a fixed gear operating range state: pat. US 8135519B2 / A.H. Heap, T.-M. Hsieh, B. Wu. — Publ. date: 13.03.2017.
6. Two-speed DCT electric powertrain shifting control and rig testing / Zhu B. [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2013. — Vol. 5. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/323917>.
7. Transmission and controls: pat. US 3505907A / J.R. Fox, J.R. Marlow, R.H. Schaefer. — Publ. date: 1970.
8. Manual valve control for multispeed planetary transmission: pat. US 8403791B2 / C.F. Long, C.T. Taylor. — Publ. date: 26.03.2013.
9. Fischer, R. The automotive transmission book / R. Fischer [et al.]. — Springer, 2015. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05263-2>.
10. Electro-hydraulic failure recovery control for dual clutch transmission: pat. US 9897201B2 / B. Hagelskamp. — Publ. date: 20.02.2018.
11. C.F. Long. Fly-by-wire limp home and multi-plex system: pat. USRE 42131E1 / C.F. Long, P.F. McCauley, D.J. Weber, S.E. Mundy, J.E. Shultz. — Publ. date: 08.02.2011.
12. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: технология «управление по проводам» / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 1(38). — С. 27–38.
13. Hydraulic control system for an automatic transmission having electronic transmission range selection with failure mode control: pat. US 8435148B2 / S.P. Moorman. — Publ. date: 07.05.2013.
14. Allison transmission offers 5 percent better fuel economy with TC10 for tractor trucks [Electronic resource]. — Mode of access: <https://ir.allisontransmission.com/news-releases/news-release-details/allison-transmission-offers-5-percent-better-fuel-economy-tc10>.
15. Allison снабдила автоматом новую «гармошку» МАЗа [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dvizhok.su/komtrans/allison-snabdila-avtomatom-novuyu-garmoshku-maza>. — Дата доступа: 26.10.2018.
16. Adaptive control of an automatic transmission: pat. US 5072390A / C.A. Lentz; J.K. Runde; J.H. Hunter; C.R. Wiles. — Publ. date: 10.12.1991.
17. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии. Комплекс алгоритмов технологии «Clutch-to-Clutch Shifts»: анализ архитектуры, обобщенная структура, развитие. Часть 1 / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 2(55). — С. 25–34. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-25-34>.
18. Красневский Л.Г. Автоматические трансмиссии. Комплекс алгоритмов технологии «Clutch-to-Clutch Shifts»: анализ архитектуры, обобщенная структура, развитие. Часть 2 / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 3(56). — С. 13–24. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-13-24>.

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

Chief Researcher of the Laboratory of Onboard Mechatronic Systems of Mobile Machines of the R&D Center
“Electromechanical and Hybrid Power Units of Mobile Machines”¹

E-mail: krasnevski_l@tut.by

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director General¹

E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

BELEVICH Alexander V.

Deputy Director General for Highly Automated Electric Transport¹

E-mail: belevich2005@yandex.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 13 June 2023.

ON SPECIFICATIONS FOR MECHATRONIC CONTROL SYSTEMS FOR AUTOMATIC TRANSMISSIONS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES

Battery electric vehicles with automatic transmissions are a new rapidly growing segment of electric vehicle and automatic transmission type configured for such applications. A promising direction of their development is integration of mechatronic control systems of automatic transmissions and electric drive, i.e. transition to integrated power units of battery electric vehicles. Pre-defined criteria are required to formulate the specifications for the design of the mechatronic control systems for such a unit. However, not only for mechatronic control systems, but also for battery electric vehicles with automatic transmissions themselves, sufficient experience in production and operation has not yet been accumulated, which determines the relevance of this article. Its purpose is to formulate approaches to the development of specifications on the emerging mechatronic control systems for automatic transmissions of integrated battery electric vehicles power units with automatic transmissions. The analysis (according to the formed information base) of the set of general requirements is carried out to the designs of close analogues — modern mechatronic control systems of automatic transmissions of hybrid electric vehicles, as well as the results of optimization of their parameters, characteristics and control algorithms of stage shifting processes of automatic transmissions for application in battery electric vehicles. It is shown that the compositions of basic functional properties of mechatronic control systems of automatic transmissions in battery and hybrid electric vehicles largely coincide. As a result, the composition of a set of basic criteria is formed for the evaluation of mechatronic control systems of battery electric vehicles. Based on the results of expert evaluation and analysis of analogues that meet modern requirements and are close to the types of domestic equipment, the basic specifications are proposed to the composition and functional characteristics of mechatronic control systems of automatic transmissions of power units of battery electric vehicles power (taking into account the private specifications to the subsystems included in them). The specification lists and their evaluation criteria include a number of established technologies in the global automotive industry. Taking into account that their practical application requires systematized information, which is difficult to find in the Russian-language presentation, the necessary explanations are given.

Keywords: automatic transmissions, mechatronic control systems of automatic transmissions, hybrid electric vehicles, battery electric vehicles

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-5-16>

Список литературы

1. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii: analiz i perspektivy primeneniya na gibridnykh i batareynykh elektromobilyakh. Chast 1 [Automatic transmissions: analysis and prospects for use in hybrid and battery electric vehicles. Part 1]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 2(51), pp. 16–29 (in Russ.).
2. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii: analiz i perspektivy primeneniya na gibridnykh i batareynykh elektromobilyakh. Chast 2 [Automatic transmissions: analysis and prospects for use in hybrid and battery electric vehicles. Part 2]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-12-26> (in Russ.).

3. Hendrickson J., Holmes A., Freiman D. General Motors front wheel drive two-mode hybrid transmission. *Proc. SAE World Congress & Exhibition*. 2009. DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-0508>.
4. Miller J.M. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type. *IEEE transactions on power electronics*, 2006, vol. 21, iss. 3, pp. 756–767. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.872372>.
5. Heap A.H., Hsieh T.-M., Wu B. *Method and apparatus to determine a preferred output torque for operating a hybrid transmission in a fixed gear operating range state*. Patent US, no. 8135519B2, 2017.
6. Zhu B., Zhang N., Walker P., Zhan W., Zhou X., Ruan J. Two-speed DCT electric powertrain shifting control and rig testing. *Advances in mechanical engineering*, 2013, vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/323917>.
7. Fox J.R., Marlow J.R., Schaefer R.H. *Transmission and controls*. Patent US, no. 3505907A, 1970.
8. Long C.F., Taylor C.T. *Manual valve control for multispeed planetary transmission*. Patent US, no. 8403791B2, 2013.
9. Fischer R., Küçükay F., Jürgens G., Najork R., Pollak B. *The automotive transmission book*. Springer, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05263-2>.
10. Hagelskamp B. *Electro-hydraulic failure recovery control for dual clutch transmission*. Patent US, no. 9897201B2, 2018.
11. Long C.F., McCauley P.F., Weber D.J., Mundy S.E., Shultz J.E. *Fly-by-wire limp home and multi-plex system*. Patent US, no. RE42131E1, 2011.
12. Krasnevskiy, L.G. Avtomaticheskie transmissii: tekhnologiya «upravlenie po provodam» [Automatic transmissions: the technology of “X-by-Wire”]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2017, no. 1(38), pp. 27–38 (in Russ.).
13. Moorman S.P. *Hydraulic control system for an automatic transmission having electronic transmission range selection with failure mode control*. Patent US, no. 8435148B2, 2013.
14. *Allison transmission offers 5 percent better fuel economy with TC10 for tractor trucks*. Available at: <https://ir.allisontransmission.com/news-releases/news-release-details/allison-transmission-offers-5-percent-better-fuel-economy-tc10>.
15. *Allison snabdila avtomatom novuyu «garmoshku» MAZa* [Allison has equipped the new MAZ “accordion” with an automatic machine]. Available at: <https://dvizhok.ru/komtrans/allison-snabdila-avtomatom-novuyu-garmoshku-maza> (accessed 26 October 2018) (in Russ.).
16. Lentz C.A., Runde J.K., Hunter J.H., Wiles C.R. *Adaptive control of an automatic transmission*. Patent US, no. 5072390A, 1991.
17. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii. Kompleks algoritmov tekhnologii “Clutch-to-Clutch Shifts”: analiz arkhitektury, obobshchennaya struktura, razvitie. Chast 1 [Automatic transmissions. Complex of algorithms of “Clutch-to-Clutch Shifts” technology: analysis of architecture, generalized structure, development. Part 1]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 2(55), pp. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-25-34> (in Russ.).
18. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii. Kompleks algoritmov tekhnologii “Clutch-to-Clutch Shifts”: analiz arkhitektury, obobshchennaya struktura, razvitie. Chast 2 [Automatic transmissions. Complex of algorithms of “Clutch-to-Clutch Shifts” technology: analysis of architecture, generalized structure, development. Part 2]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 3(56), pp. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-13-24> (in Russ.).