



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

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
начальник НИЦ «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин» —
заведующий лабораторией бортовых мехатронных систем мобильных машин¹
E-mail: belevich2005@yandex.by

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

Поступила в редакцию 01.11.2021.

УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ БАТАРЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С АВТОМАТИЧЕСКИМИ ТРАНСМИССИЯМИ

Рассматриваются задачи управления силовыми установками батарейных электромобилей (БЭМ) при применении в них специально сконфигурированных автоматических трансмиссий (АТ) вместо 1-ступенчатых зубчатых редукторов. Проведен анализ особенностей АТ БЭМ по сравнению с АТ гибридных электромобилей (ГЭМ) массового производства. По сравнению с редукторами АТ улучшают параметры БЭМ по большинству показателей. В числе новых задач — скоординированное управление электродвигателем и фрикционами АТ в переходных процессах переключения ступеней, а в конечном итоге — создание интегрированной системы управления силовой установкой БЭМ. Рассмотрены методы их решения ведущими зарубежными компаниями на примерах с типовой 2-ступенчатой АТ.

Ключевые слова: батарейные электромобили, гибридные электромобили, автоматические трансмиссии, силовые установки, электродвигатель, мотор-генератор

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-13-23>

Введение. К настоящему времени сформировались основы теории и техники управления АТ, применяемыми в мировом автомобилестроении практически на всех типах мобильной техники массового производства, включая электромобили (ЭМ), в том числе ГЭМ и БЭМ.

Первоначально на ГЭМ применялись серийные многоступенчатые АТ. Специализация АТ на гибриды произошла, когда электродвигатели начали устанавливать в общем картере в блоке с гидротрансформатором, а затем — вместо него (при сохранении общих габаритов трансмиссии).

В последние 2–3 года начался этап перехода от ГЭМ к «чистым ЭМ» с накопителями энергии на аккумуляторных батареях, т. е. к БЭМ. Данный процесс развивается столь стремительно, что рассматривается как «революция электромобилей». Пока же, как и первоначально, электропривод массовых БЭМ представляет собой обратимый электрический мотор-генератор (МГ) в блоке с одноступенчатым понижающим зубчатым редуктором с большим передаточным числом.

Однако логика развития БЭМ, большое число опубликованных результатов научных исследова-

ний, а также первые итоги массовой эксплуатации указывают на целесообразность применения на них многоступенчатых или же бесступенчатых АТ. Использование здесь специализированных на гибриды АТ затруднено тем, что их конструкции рассчитаны на обеспечение как совместной, так и раздельной работы теплового двигателя и электропривода. В настоящее время имеются только первые примеры серийных легковых БЭМ с АТ (подробнее см. ниже). Такая же ситуация с грузовыми БЭМ.

Таким образом, можно констатировать, что БЭМ с АТ — это возникший в последние годы новый перспективный быстро развивающийся сегмент типажей массовых ЭМ и, соответственно, типажей АТ, сконфигурированных для применения в них.

Учитывая изложенное, цель данной статьи — провести анализ архитектуры и особенностей управления силовыми установками, имеющими в своем составе АТ с мехатронными системами управления (МСУ), сконфигурированные для применения на легковых и средних грузовых БЭМ.

Об особенностях управления силовыми установками БЭМ с АТ. В мировом автомобилестроении накоплен значительный опыт управления силовыми установками ГЭМ с АТ, базирующийся на результатах их массового производства и эксплуатации. АТ, сконфигурированные для этих целей, — это гибридные электромеханические трансмиссии (ГЭМТ). На рисунке 1 показана 2-режимная планетарная ГЭМТ 2MT 70 с двумя МГ компании General Motors для переднеприводных легковых автомобилей [1].

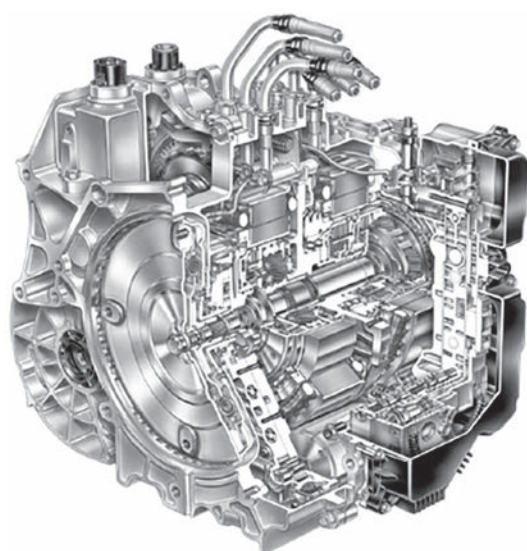
Сопоставление данной конструкции как представителя трансмиссий для гибридов с применяемыми сегодня в БЭМ АТ с 1-ступенчатым редуктором показывает, что конструкция специализированной ГЭМТ для БЭМ должна стать про-

межуточной между ними. Среди рассматриваемых в ряде публикаций возможных ее вариантов сегодня преобладают 2-ступенчатые ГЭМТ. При их разработке необходимо учитывать основные перспективные требования потенциальных рынков сбыта.

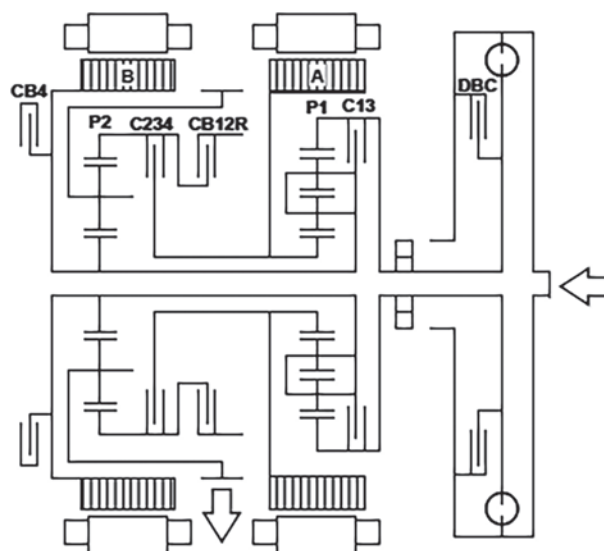
Компания Eaton — одна из первых в применении электропривода на грузовых автомобилях — провела исследование подходов к развитию привода среднего ЭМ (Medium Duty Electric Vehicle (MD-EV)), в том числе тенденций мировых рынков, включая Китай. Были выявлены пожелания потребителей в разрезе различных платформ и применений ЭМ. Проведено сравнение различных концепций приводов и выбрана конструкция-победитель. На примере среднего городского электробуса проведено компьютерное исследование влияния основных параметров конструкции привода на показатели функционирования ЭМ — энергетическую эффективность, способность преодоления подъемов, максимальную скорость, время разгона. Результаты анализа приведены в таблице.

Единый обобщающий критерий (второй столбец таблицы) имеет три граничных значения балла оценки: 1 (проходной), 0,5 (низкий), 0 (непроходной), которые обозначаются серым, светло-серым, темно-серым цветами соответственно. Заголовки всех столбцов, следующих за вторым, обозначают базовые функциональные свойства сравниваемых БЭМ. Каждая ячейка таблицы помечена одним из трех цветов, соответствующих экспертной оценке соответствующего ей сочетания концепции трансмиссии и свойства, БЭМ. Цифрами в ячейках второго столбца обозначены суммарные оценки концепций.

Как видим, максимальная оценка (14,3 балла) для среднего городского автобуса присвоена концепции 3-4-ступенчатой вальной автоматизиро-



a



b

Рисунок 1 — ГЭМТ 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 (MG) for front-wheel drive cars:

a — cross-sectional view; b — kinematic scheme

Таблица — Результаты анализа концепций трансмиссий
Table — Results of the analysis of transmission concepts

MD-EV Концепция передачи	Баллы: проходной низкий непроходной	Загрязны на разработку	Общность применения	Ускорение	Преодоление подъемов	Динамика разгона	Экономичность	Максимальная скорость	Комфорта- бельность / NVH	Долговечность	Использование обыч- ного оборудования	Грузовместимость и вес
АМТ вальная (3–4 ступени)	14,3											
ДСТ вальная с «сухими» сцеплениями (4 ступени)	11,8											
3-ступенчатая планетарная АМТ	8,4											
3-ступенчатая планетарная Powershift с «мокрыми» фрикционными	7,6											
ДСТ вальная с «мокрыми» фрикционными	11,4											

ванной механической трансмиссии (АМТ), которая показана на рисунке 2 [2].

В итоге в работе показано, что требованиям потребителя наилучшим образом удовлетворяет архитектура ЭМ, использующая меньший МГ в комбинации с АМТ и оптимизированной главной передачей. Она позволяет удерживать МГ в самой экономичной зоне при использовании имеющихся в ГЭМТ передаточных чисел, упростить задний мост, уменьшить батарею или увеличить пробег до ее зарядки. Работа выполнялась группой компаний под руководством корпорации Eaton при поддержке U.S. Department of Energy [2].

Приведенная выше информация показывает, что спектры требуемых функциональных свойств ГЭМ и БЭМ практически совпадают. При этом исключение ДВС кардинально упрощает конструкцию системы управления силовой установкой БЭМ, но создает и новые проблемы, так как дина-

мические характеристики ДВС и МГ несопоставимы. Это, в частности, диктует необходимость управления МГ в процессе переключения ступеней ГЭМТ, не исключая и 2-ступенчатых.

Типовая структура 2-ступенчатой ГЭМТ БЭМ. В 2019 году появилось сообщение, что модель 2020 года спортивного БЭМ Porsche Taycan компании Porsche будет иметь 2-ступенчатую АТ, и это будет первый БЭМ с АТ среди множества таких машин с 1-ступенчатым механическим редуктором. Отмечалось, что применение АТ здесь обеспечивает те же преимущества, что и у автомобилей с ДВС. Это повышение ускорения на малых скоростях при разгоне с места на первой ступени АТ (до 60 миль/ч за 3,4 с), повышение КПД на высоких скоростях за счет движения на второй ступени с пониженной скоростью МГ.

Данная АТ (рисунок 3) состоит из МГ и однорядного планетарного редуктора с двумя фрикционными, установленного на заднем мосту [3].

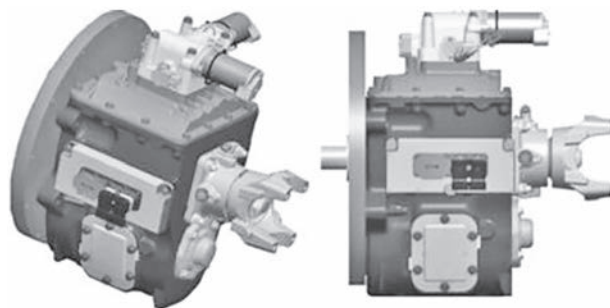


Рисунок 2 — Концепция 4-ступенчатой трансмиссии среднего ЭМ
Figure 2 — Concept of a 4-speed transmission of a medium duty electric vehicle

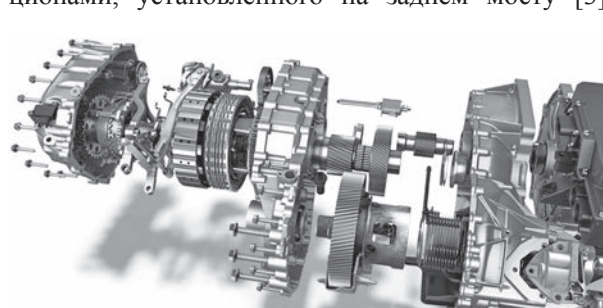


Рисунок 3 — 2-ступенчатая АТ Porsche Taycan
Figure 3 — Porsche Taycan 2-speed automatic transmission

По сообщению компании, вся линейка из четырех моделей Porsche Taycan с 2022 года будет иметь 2-ступенчатые АТ [4].

Подтверждением того, что идея установки АТ в БЭМ получила признание автомобильного сообщества, стало появление в последние 2–3 года многочисленных публикаций, посвященных исследованию эффекта от применения именно 2-ступенчатых АТ. Анализ показывает, что эти исследования в конечном счете выходят на улучшение различных свойств и параметров АТ и в целом БЭМ, охватывающих практически весь спектр названных выше требований. При этом следует отметить, что рассматриваются практически все основные известные типы АТ — АМТ; классические многоступенчатые АТ с уменьшенным числом фрикционов; бесступенчатые АТ (БСТ) от английского Continually Variable Transmission (CVT); трансмиссия с двумя сцеплениями (ДСТ). Последняя аббревиатура требует пояснений. Транслитерация от английского Dual Clutch Transmission (DCT) в дословном переводе — трансмиссия с двумя сцеплениями (или, эквивалентно, фрикционами). На самом деле этот термин был изначально присвоен АТ с оригинальной кинематической схемой, имеющей два входных вала — «преселекторной». Именно она многими исследователями (в том числе и авторами) признается наиболее близкой к требованиям АТ БЭМ.

Типичный образец ДСТ — кинематическая схема (рисунок 4) с концентричным расположением пары фрикционов в общем корпусе на входном валу, напрямую связанном с МГ. Ведущие диски обоих фрикционов шлицами связаны с их общим корпусом, что обеспечивает две параллельные постоянные связи кинематической схемы с МГ, как в классической ДСТ [5]. Процесс управления здесь реализует раздельное (без обратных связей) включение и выключение двух ее фрикционов. Как отмечено в оригинале, управление с обратной связью

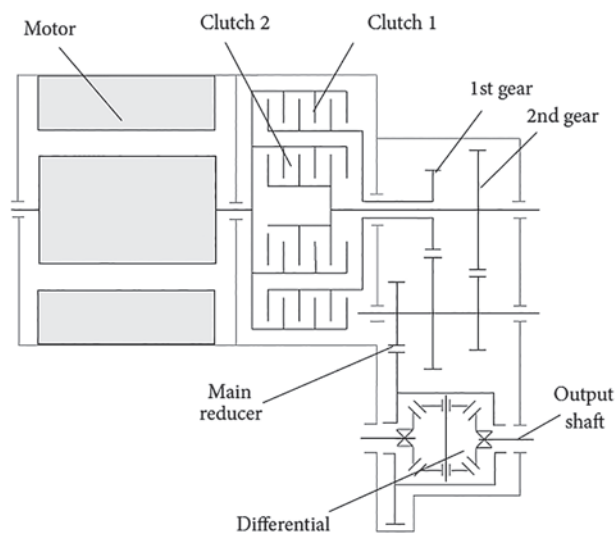


Рисунок 4 — Кинематическая схема 2-ступенчатой АТ БЭМ
Figure 4 — Kinematic diagram of a 2-speed AT of a battery electric vehicle (BEV)

по скорости их буксования не применяется, так как требует значительных усложнений алгоритмов, а также калибровки различных параметров, и поэтому отложено на последующие этапы работы. Для обеспечения плавности переключений используется технология «Clutch-to-Clutch Shifts». На рисунке 5 приведены алгоритмы и графики переключений, полученные при испытаниях образца данной ДСТ.

В заключении функционирование ДСТ в стендовых условиях с алгоритмами управления без обратных связей признается хорошим. Вместе с тем, указание постоянных значений скорости и крутящего момента МГ в процессе переключений позволяет предполагать, что параметры управления им в этот период не изменяются. Также возникают вопросы и в связи с линейными законами изменения давлений в гидроцилиндрах фрикционов.

Скоординированное управление МГ и 2-ступенчатой трансмиссией ЭМ. 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.

В связи с развитием процесса перехода БЭМ от 1-ступенчатых зубчатых редукторов к многоступенчатым АТ (начиная с 2-ступенчатых) данная задача также и здесь стала актуальной. Возможно, даже более острой, учитывая высокую динамику МГ по сравнению с ДВС. В ряде публикаций последних лет представлены результаты ее расчетных исследований для силовых установок БЭМ с 2-ступенчатыми ГЭМТ.

Так, для улучшения качества процесса переключений планетарной 2-ступенчатой АТ БЭМ (рисунок 6) предложен метод *скоординированного* управления МГ и давлением в фрикционах, что позволяет снизить работу буксования и джerk (производную

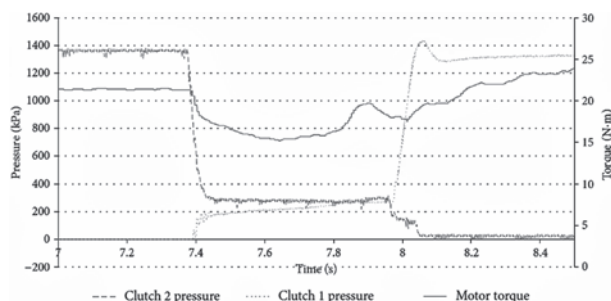


Рисунок 5 — График переключения ДСТ вниз (на режиме МГ 500 об/мин, крутящий момент 25 Н·м)
Figure 5 — Graph of the dual clutch transmission downshift (at MG mode 500 rpm, torque 25 N·m)

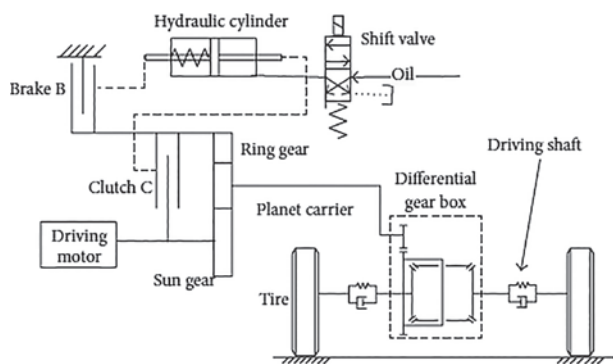


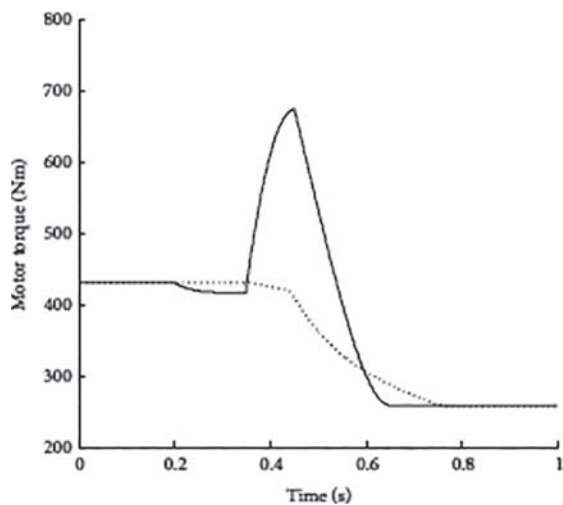
Рисунок 6 — Кинематическая схема 2-ступенчатой АТ БЭМ
Figure 6 — Kinematic diagram of a 2-speed AT of a BEV

продольного ускорения) [6]. АТ имеет МГ, одиночный планетарный ряд и два многодисковых фрикциона — тормоз и муфту. С помощью разработанной динамической модели анализируются все три стадии процесса переключений. С применением

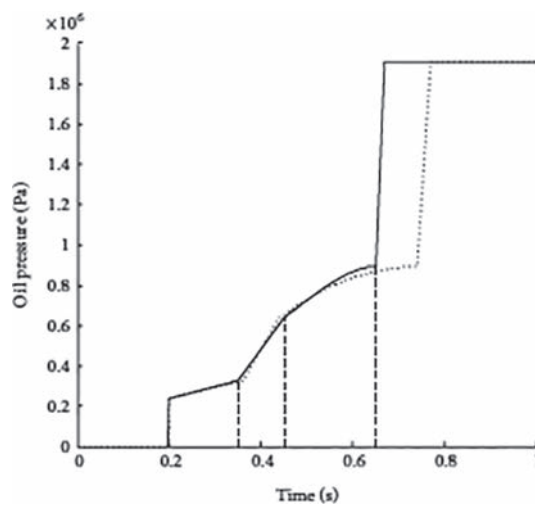
методов оптимального управления построены траектории изменения скорости и крутящего момента МГ, а также давлений во включаемом и выключаемом фрикционах в процессах их переключений.

На рисунке 7 показаны четыре графика изменения параметров при моделировании переключения вниз под нагрузкой при нажатии на педаль газа на 50 % [6]. В течение всего переключения осуществляется управление МГ по определенному закону, что видно по траекториям изменения его крутящего момента и скорости. Этим обеспечивается участие МГ в процессе синхронизации компонентов динамической системы.

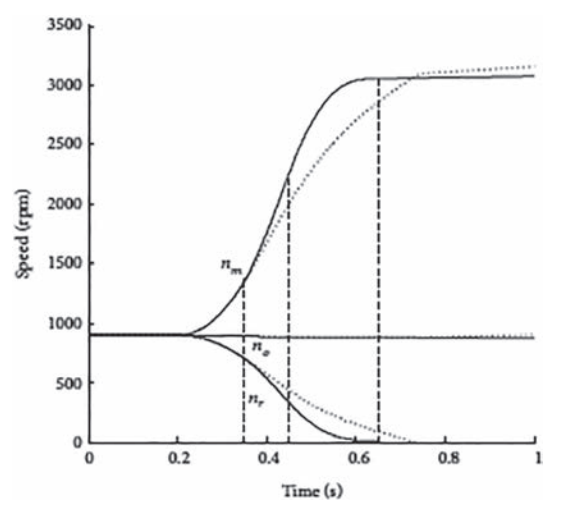
При переключениях вниз под нагрузкой джerk и работа буксования фрикционов снижаются на 43 и 44 % соответственно при нажатии на педаль газа на 50 %. При отпущенной педали эти значения составляют 57 и 89 %. Величина джерка обратно пропорциональна величине работы буксования фрикциона. Таким образом, по сравнению с раз-



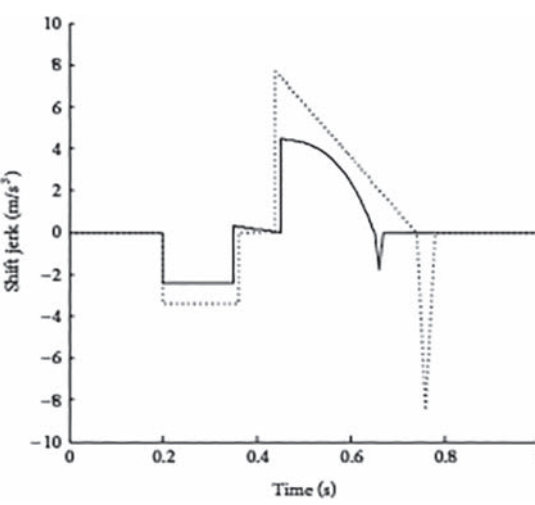
a



b



c



d

Рисунок 7 — Скоординированное управление. Результаты моделирования переключения вниз при нажатии на педаль газа на 50 % (жирные линии — скоординированное управление; пунктирные — раздельное управление (только фрикционами)); a — изменение крутящего момента МГ; b — изменение давления во включаемом фрикционе; c — изменение скорости МГ; d — изменение джерка (производной продольного ускорения БЭМ)

Figure 7 — Coordinated control. Simulation results of downshift when pressing the gas pedal by 50 % (bold lines — coordinated control; dotted lines — separate control (only by frictions)): a — change in MG torque; b — change in pressure in the on-coming friction; c — change in MG velocity; d — change in jerk (BEV derivative of longitudinal acceleration)

дельным, скоординированное управление существенно повышает качество процесса.

Применение на ЭМ АТ типа ДСТ. Наиболее подходящим типом трансмиссии для применения на БЭМ все больше признаются ДСТ, которые, благодаря наличию двух фрикционов на входе, сочетают преимущества классических МТ и АТ, обеспечивая переключения ступеней без разрыва потока мощности с применением технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» (СТС).

Результаты исследований схемы ДСТ с целью оптимизации управления совместным буксованием пары фрикционов в составе многоступенчатой гибридной АТ ГЭМ опубликованы в работе [7]. На рисунке 8 показаны структура и динамическая модель ДСТ, а на рисунке 9 — схема стадий процесса переключения вверх — фазы крутящего момента (Torque Phase) и фазы инерции (Inertia Phase). На верхнем графике — крутящие моменты выключаемого и включаемого фрикционов, обозначенные нисходящей и восходящей линиями. Видно, что они пересекаются, т. е. оба фрикциона управляемо буксуют одновременно в соответствии с технологией СТС. На нижнем графике представлены скорости включаемого и выключаемого фрикционов, а также ДВС. На рисунке 10 подробнее показаны профили изменения давлений выключаемого и трех вариантов (P1, P2, P3) выключаемого фрикционов в фазе крутящего момента. Выбор последних поясняется схемой на рисунке 11.

На рисунке 11 показаны два соседних диска выключаемого фрикциона — слева ведущий, справа ведомый. Между ними в овалах записаны соотношения угловых скоростей, описывающие три возможных варианта их установившегося статуса. В центральном варианте скорости равны — это *идеальный* статус (скорости синхронизированы); в нижнем — скорость ведущего больше скорости ведомого, т. е. произошел *разрыв потока мощности* (torque hole — в переводе «яма крутящего момен-

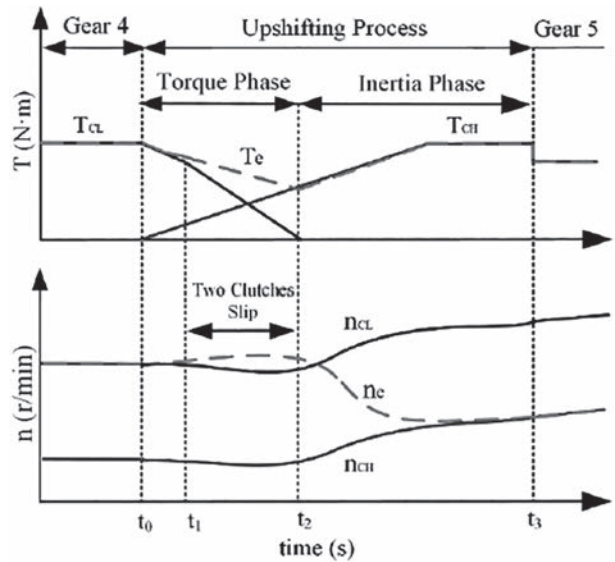


Рисунок 9 — Фазы переключения вверх
Figure 9 — Phases of upshift

та»); в верхнем — скорость ведомого выше скорости ведущего, что означает *циркуляцию мощности*.

Этим вариантам статуса на рисунке 10 соответствуют три варианта управления давлениями выключаемого фрикциона: P1 — по традиционной технологии СТС; P2 — по предлагаемой оптимизированной технологии; P3 — при циркуляции мощности. Длительности фазы крутящего момента у всех вариантов различны. На режиме P2 для исключения режимов P1, P3 взаимодействие между двумя фрикционами оптимизируется так, чтобы позволить выключаемому фрикциону выключиться без скольжения.

Результаты моделирования переключения вверх с IV на V ступень по предлагаемому методу представлены на рисунках 12 и 13. В фазе крутящего момента входной момент T_0 практически не изменяется.

Относительная скорость дисков фрикциона нижней ступени удерживается нулевой. Таким образом, как и требуется, в течение всей фазы буксует только фрикцион высшей ступени, а переда-

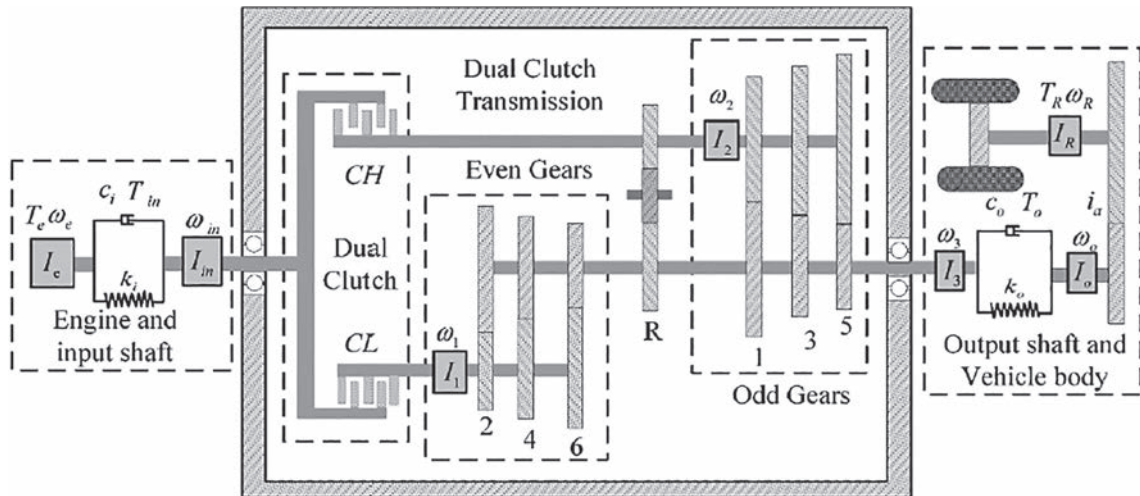


Рисунок 8 — Структура и динамическая модель многоступенчатой трансмиссии
Figure 8 — Structure and dynamic model of a multi-speed transmission

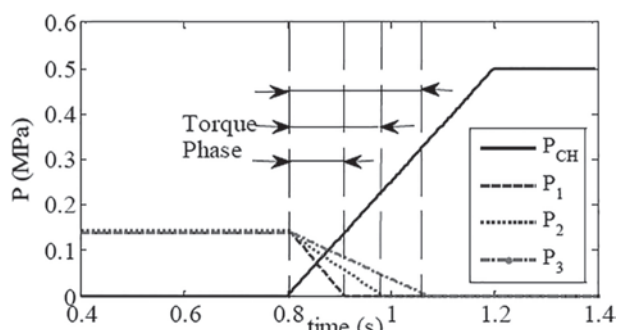


Рисунок 10 — Профили изменения давлений включаемого (жирная восходящая линия) и трех вариантов (P1, P2, P3) выключаемого фрикционов в фазе крутящего момента
 Figure 10 — Pressure profiles of the on-coming (bold ascending line) and three variants (P1, P2, P3) of the off-going friction in the torque phase

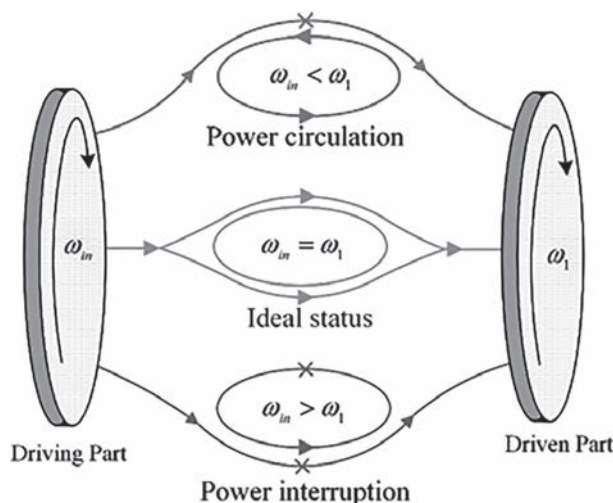


Рисунок 11 — Статус ведущего и ведомого дисков фрикциона нижней ступени
 Figure 11 — Status of the driving and driven discs of the lower-speed clutch

точное число ДСТ остается равным 1,29. После ее окончания оно плавно понижается до 0,775.

В итоге оптимизированный метод по сравнению с методом совместного буксования позволяет не только избежать разрыва потока и циркуляции мощности, но и обеспечить наивысший КПД системы в фазе крутящего момента, что означает минимизацию работы буксования и увеличение срока службы фрикционов, уменьшение длительности и повышение плавности переключений.

Интеграция и оптимизация управления тяговым электродвигателем и АТ в составе силовой установки БЭМ. Рассмотрим возможности интеграции управления агрегатами силовой установки БЭМ на примере кинематической схемы и конструкции 2-ступенчатой ДСТ с двумя планетарными рядами по рисунку 14 [8]. Здесь переключения осуществляются с помощью двух многодисковых тормозов, связанных с коронными шестернями. Передаточные числа оптимизированы для обеспечения минимального расхода электроэнергии (подробнее см. ниже).

Для обеспечения оптимального управления ДСТ разработана интегрированная стратегия переключений «feedforward — feedback». Алгоритмы, форми-

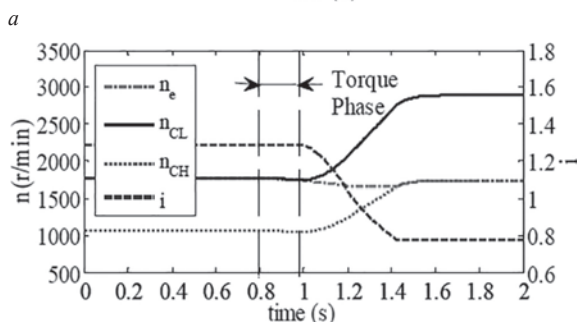
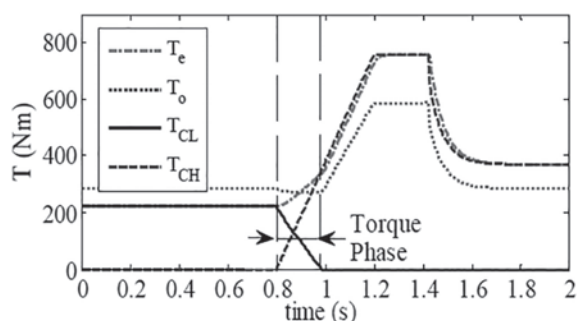


Рисунок 12 — Характеристики режима P2:
 a — крутящие моменты; b — передаточное число и скорости
 Figure 12 — Characteristics of the P2 mode:
 a — torques; b — gear ratio and speeds

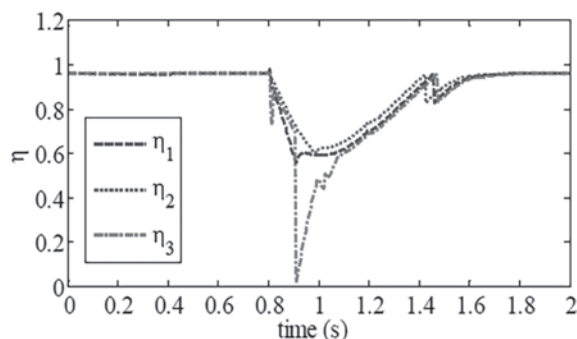


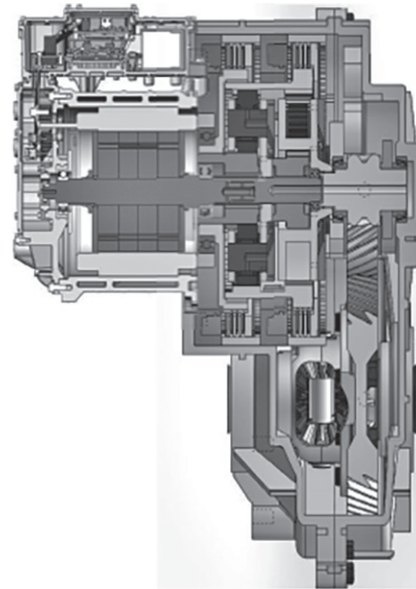
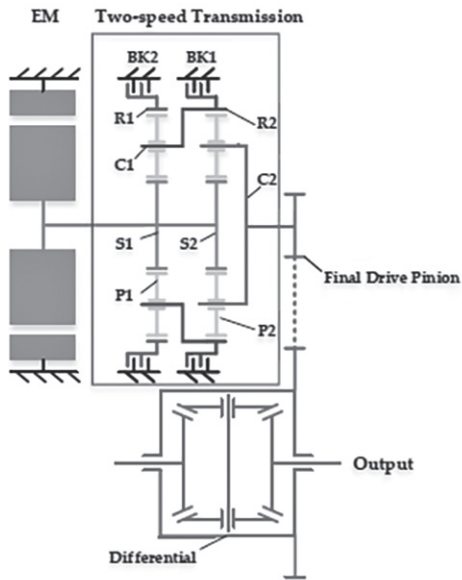
Рисунок 13 — Изменение КПД трансмиссии на режиме P2
 Figure 13 — Change of the transmission efficiency in the P2 mode

руемые контроллером, поддерживают постоянство крутящего момента на выходном валу ДСТ в фазах крутящего момента и инерции. Данный метод надежно обеспечивает быстрые и плавные переключения.

По результатам моделирования предлагаемая АТ улучшает динамику и экономичность БЭМ по сравнению с 1-ступенчатыми. На рисунке 15 на топографической характеристике МГ нанесены траектории рабочих точек БЭМ при движении по ездовому циклу NEDS с 2-ступенчатой и 1-ступенчатой трансмиссиями. Преимущества первой очевидны.

На рисунке 16 показаны для сравнения траектории изменения крутящих моментов и скоростей ДСТ в процессе переключений при двух стратегиях управления.

Электропривод с прямым соединением МГ и 2-ступенчатой АТ создает значительный потенциал ЭМ для повышения КПД использования электроэнергии и уменьшения размеров МГ. Но резкое изменение крутящего момента МГ (в частности,



a

b

Рисунок 14 — Кинематическая схема (a) и конструкция (b) 2-ступенчатой АТ
 Figure 14 — Kinematic scheme (a) and design (b) of a 2-speed automatic transmission

в процессе переключения ступеней) может вызвать рывки в АТ, которые передаются всему ЭМ. Они в основном измеряются изменениями продольного ускорения (т. е. джерком). Создана иерархия интегрированного управления электроприводом с АТ, которая включает выбор оптимальных законов автоматического переключения ступеней при движении по различным ездовым циклам и энергоэффективное управление скоростью и крутящим моментом тягового МГ в процессе таких переключений. При переключениях могут возникать колебательные процессы в трансмиссии и нарушения регулирования скорости МГ. Предложены робастный антивибрационный контроллер (anti-jerking robust controller) для ослабления вибраций трансмиссии и робастный контроллер скорости (robust speed controller) для синхронизации МГ. Они используются в системе управления силовой установкой с 2-ступенчатой АМТ БЭМ [9].

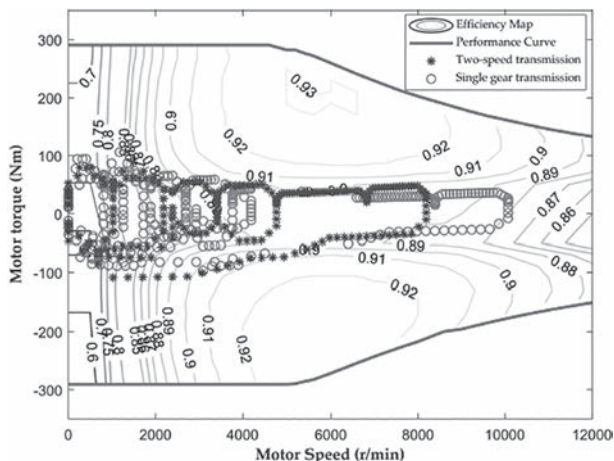


Рисунок 15 — Рабочие точки на характеристике МГ при движении ЭМ с 2- и 1-ступенчатой трансмиссиями по ездовому циклу NEDS
 Figure 15 — Operating points on the MG characteristics when driving an electric vehicle with 2-speed and single gear transmissions according to NEDS driving cycle

АМТ показана на рисунке 17. Ее передаточные числа оптимизированы для повышения экономичности на ездовых циклах NEDS и Japan 1015. На рисунке 18 приведены соответствующие законы

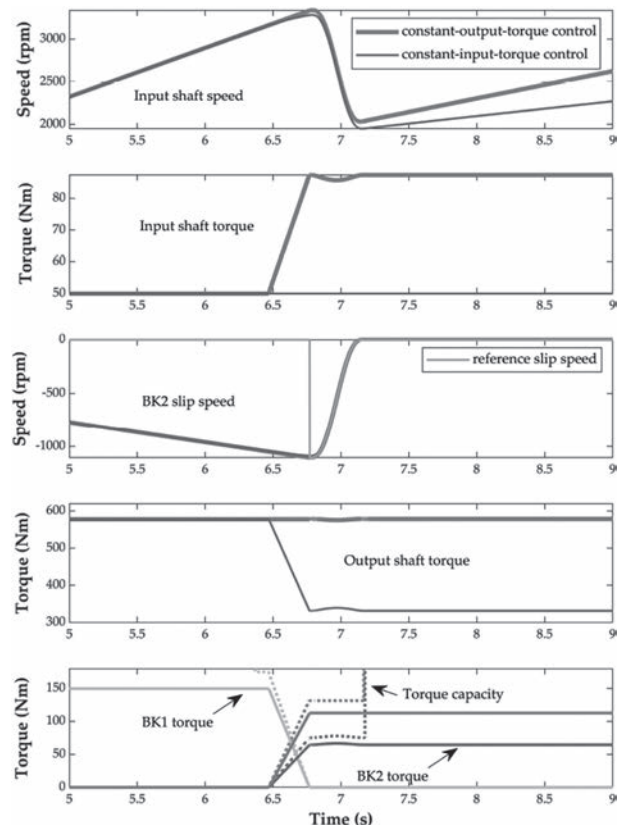


Рисунок 16 — Сравнение траекторий изменения крутящих моментов и скоростей ДСТ в процессе переключений при двух стратегиях управления: с постоянством выходного крутящего момента (жирные линии) или входного момента (тонкие линии)
 Figure 16 — Comparison of trajectories of changes in torques and speeds of dual clutch transmission during shifting with two control strategies: with constant output torque (bold lines) or input torque (thin lines)

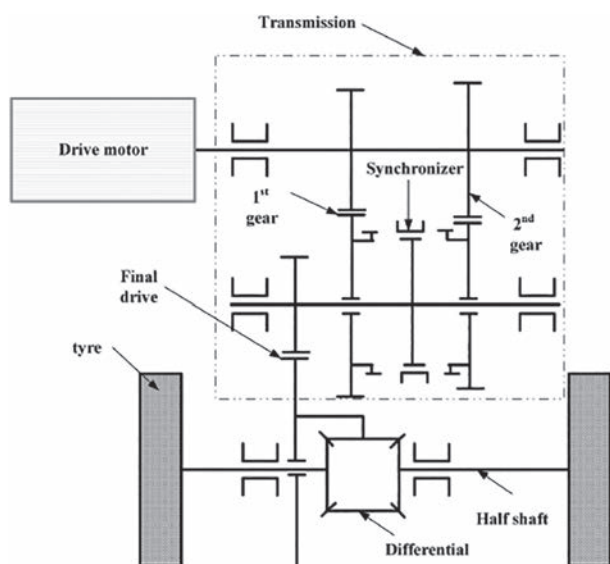


Рисунок 17 — 2-ступенчатая АМТ с интегрированной системой управления для БЭМ
 Figure 17 — 2-speed automated mechanical transmission with integrated control system for BEV

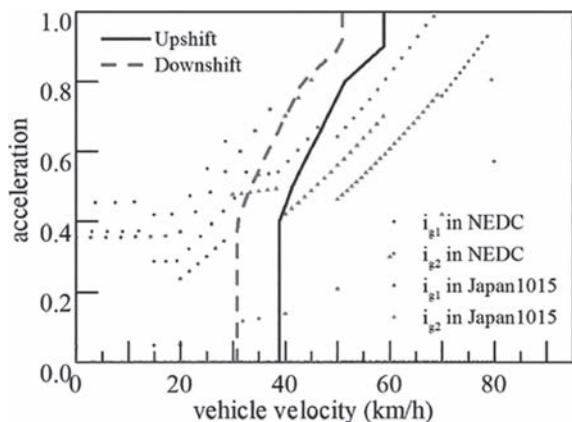


Рисунок 18 — Законы автоматического переключения ступеней АМТ по рисунку 17 в виде зависимости скорости от ускорения: сплошная линия — переключение вверх; пунктирная линия — вниз; точки — переключения по ездовым циклам NEDS и Japan 1015
 Figure 18 — Laws of automatic shifting of automated mechanical transmission stages according to Figure 17 in the form of a dependence of speed on acceleration: solid line — upshift; dotted line — downshift; points — shifting according to NEDS and Japan 1015 driving cycles

переключений (в виде зависимости скорости от ускорения) для движения по этим циклам. Экономия энергии составляет 2,56 и 2,28 %.

Организация процесса переключения вниз с интегрированным робастным антивибрационным контроллером при стендовых испытаниях приведена на рисунке 19. Здесь на пяти графиках показано изменение скоростей, крутящих моментов и перемещения компонентов АМТ.

На рисунке 20 показана нестабильность при переключении на высокой скорости. Оси ординат отображают следующие значения: крутящий момент тягового мотора; скорость тягового мотора; скорость мотора нагрузки; крутящий момент мотора нагрузки; положение привода переключений. Вертикальными пунктирными линиями разделены

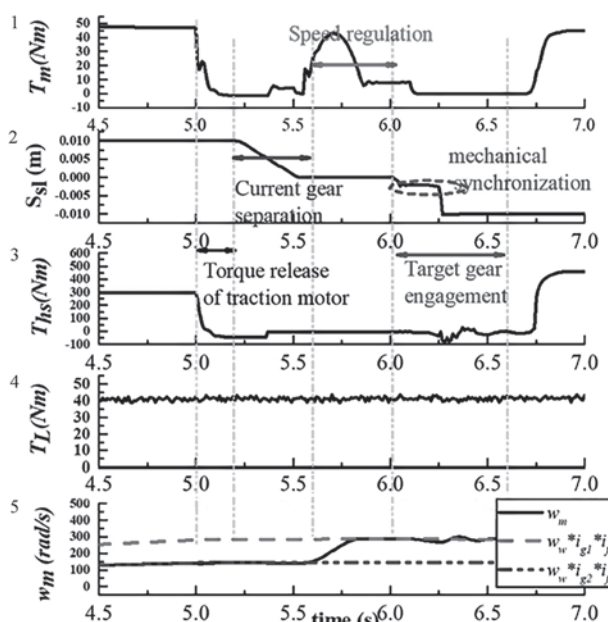


Рисунок 19 — Процесс переключения вниз с интегрированным робастным антивибрационным контроллером представлен на графиках: 1 — крутящий момент МГ; 2 — перемещение привода синхронизатора; 3 — крутящий момент на выходном валу АМТ; 4 — крутящий момент нагружающего устройства стенда; 5 — скорость МГ
 Figure 19 — Process of downshift with an integrated anti-jerking robust controller is shown in the graphs: 1 — MG torque; 2 — movement of the synchronizer drive; 3 — torque on the output shaft of the automated mechanical transmission; 4 — torque of the bench loading device; 5 — MG speed

Рисунок 19 — Процесс переключения вниз с интегрированным робастным антивибрационным контроллером представлен на графиках: 1 — крутящий момент МГ; 2 — перемещение привода синхронизатора; 3 — крутящий момент на выходном валу АМТ; 4 — крутящий момент нагружающего устройства стенда; 5 — скорость МГ

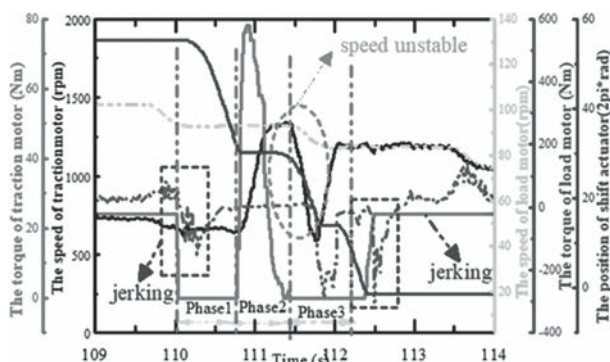


Рисунок 20 — Явление нестабильности при переключении на высокой скорости
 Figure 20 — Phenomenon of instability when shifting at high speed

три фазы процесса. На поле графика области нестабильности выделены рамками и надписями: speed unstable (скорость нестабильна), jerking (рывки).

В итоге подтверждена результатами стендовых испытаний эффективность двух предложенных робастных контроллеров для интегрированного управления 2-ступенчатой, без сцепления и фрикционов, АМТ БЭМ по экономии энергии и совершенствованию процессов переключений и ослаблению внешних возмущений.

Особенность МГ, применяемых в электроприводе, — очень быстрая и точная генерация крутящего момента как при разгоне, так и при замедлении. Поэтому ЭМ — удобный объект для программного регулирования скорости. Однако на плавность,

комфортность вождения существенное влияние оказывают квалификация и стиль управления водителя, которые можно определить по воздействию на педали акселератора и тормоза. Эта информация может быть использована для определения намерений водителя. Например, чем выше скорость, до которой нужно разогнаться, тем быстрее и на больший угол будет повернута педаль. Для ослабления влияния таких воздействий на продольное ускорение возможна корректировка управления скоростью движения ЭМ с учетом изменений команд водителя путем перманентного управления джерком.

На таких востребованных ЭМ, как развозные минивэны (фургоны) 2-ступенчатые АТ также находят применение. Здесь также необходима оптимизация передаточных чисел АТ и интегрированная система управления силовой установкой. Результаты многокритериальной оптимизации 2-ступенчатой АТ для среднетоннажного грузового БЭМ на примере развозного фургона GM Workhorse с двумя типами тягового МГ мощностью 200 кВт — высокоскоростного (12 000 об/мин) и тихоходного (3100 об/мин) — при которой передаточные числа были аргументами, а энергоэффективность и динамика разгона — функциями, показывают:

- при передаточных числах АТ 5,9 и 3,11 для высокоскоростного МГ на дорожном цикле ОСС минимальное время разгона до максимальной скорости 120 км/ч составило 17,05 с, расход энергии на 100 км — 4,77 кВт/ч, максимальный преодолеваемый подъем — 39,69 %.

- в варианте с тихоходным МГ соответствующие значения составляют 16,6 с и 4,46 кВт/ч при передаточных числах 1,12 и 0,62.

Таким образом, второй вариант экономичней, но тяжелей и дороже. При этом у обоих расход энергии значительно ниже, чем у того же фургона с серийным бензиновым ДВС [10].

Заключение. В последние 2–3 года начался процесс перехода от ГЭМ к «чистым ЭМ» с накопителями энергии на аккумуляторных батареях, т. е. к БЭМ. Он развивается столь стремительно, что рассматривается как «революция электромобилей». Пока же, как и первоначально, электропривод массовых БЭМ представляет собой обратимый электрический МГ в блоке с 1-ступенчатым зубчатым редуктором с большим передаточным числом, т. е. не имеет АТ в своем составе.

Вместе с тем, судя по возрастающему количеству публикаций, автомобильное сообщество пришло к консенсусу в вопросе о целесообразности и даже необходимости применения современных АТ, преимущественно 2-ступенчатых, на легких, легких и средних грузовых БЭМ.

Таким образом, можно констатировать, что БЭМ с АТ — это возникший в последние годы новый перспективный быстро развивающийся сегмент типажей массовых ЭМ и, соответственно, типажей АТ, сконфигурированных для применения в них.

Из известных типов 2-ступенчатых АТ близки к БЭМ 2-ступенчатые преселекторные с двумя многодисковыми фрикционами.

Для улучшения качества процессов переключений 2-ступенчатых АТ БЭМ разрабатываются методы скоординированного управления тяговым МГ и многодисковыми фрикционами, что позволяет снизить работу буксования и повысить плавность за счет управления ускорением (контроля джерка). Также применяется известная технология СТС.

Для совершенствования законов автоматического переключения ступеней, ослабления вибраций трансмиссии, уменьшения рывков ЭМ при резком изменении скорости МГ широко применяются методы оптимизации, специализированные контроллеры и программы управления.

На легких и средних грузовых ЭМ расширяется применение многоступенчатых АТ, в том числе АМТ на городских электробусах и развозных минивэнах.

Расположение динамичного МГ и ступенчатой АТ в едином блоке силового агрегата БЭМ создает широкие возможности для совершенствования алгоритмов управления путем вовлечения МГ в процессы регулирования скоростей и синхронизации компонентов динамической системы наряду с фрикционами. Поэтому перспективным направлением развития является интеграция мехатронных систем управления электроприводом и АТ, т. е. переход к интегрированным системам управления силовым агрегатом БЭМ.

Список литературы

- Hendrickson, J. General motors front wheel drive two-mode hybrid transmission / J. Hendrickson, A. Holmes, D. Freiman // SAE World Congress & Exhibition, Detroit, Apr. 20–23, 2009. — Detroit, 2009. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-0508>.
- Modular multi-speed transmission for MD-EV [Electronic resource] / C. Bulent [et al.] // 5th International CTI Symposium & Exhibition “Automotive Transmissions, HEV and EV Drives”, Shanghai, Sept. 21–23, 2016. — Shanghai, 2016. — Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/310649557_MODULAR_MULTI-SPEED_TRANSMISSION_FOR_MD-EV. — Date of access: 15.10.2021.
- Vanderwerp, D. Why the Porsche Taycan EV’s two-speed transmission is a big deal [Electronic resource] / D. Vanderwerp. — Mode of access: <https://www.caranddriver.com/news/a28903274/porsche-taycan-transmission>. — Date of access: 29.10.2021.
- Halvorson, B. Porsche Taycan electric car: 2-speed could be first of many in EVs [Electronic resource] / B. Halvorson. — Mode of access: https://www.greencarreports.com/news/1124924_porsche-taycan-electric-car-2-speed-could-be-first-of-many-in-evs. — Date of access: 29.10.2021.
- 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>.
- Li, J. Coordinated control of downshift powertrain of combined clutch transmissions for electric vehicles / J. Li, H. Wei // Mathematical Problems in Engineering. — 2014. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/963725>.
- Cooperation mode optimization between two clutches for dual clutch transmission during the torque phase / J. Zhang [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 612, iss. 3. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032139>.
- Huang, W. Optimal design and control of a two-speed planetary gear automatic transmission for electric vehicle / W. Huang, J. Huang, C. Yin // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10, iss. 18. — DOI: <https://doi.org/10.3390/app10186612>.

9. Chai, B. Robust shifting control of a motor-transmission integrated system considering anti-jerking and speed regulation for electric vehicles / B. Chai, J. Zhang, S. Wu // IET Intelligent Transport Systems. — 2019. — Vol. 13, iss. 1. — Pp. 141–152. — DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5057>.
10. Design and optimization of a drivetrain with two-speed transmission for electric delivery step van / A. Morozov [et al.] // IEEE International Electric Vehicle Conference, Florence, Dec. 17–19, 2014. — Florence, 2014. — DOI: <https://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056081>.

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. Chief of the R&D Center “Electromechanical and Hybrid Power Units of Mobile Machines” — Head of the Laboratory of Onboard Mechatronic Systems of Mobile Machines¹
E-mail: belevich2005@yandex.by

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

Received 01 November 2021.

CONTROL OF POWER UNITS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES WITH AUTOMATIC TRANSMISSIONS

The article considers the problems of controlling power units of battery electric vehicles (BEV) when using in them specially configured automatic transmissions (AT) instead of single-reduction gear unit. The analysis of the BEV AT features in comparison with AT of hybrid electric vehicles of mass production is carried out. In comparison with AT gearboxes, BEV parameters are improved by most indicators. Among the new tasks is the coordinated control of the electric motor and AT clutches in the transients of shifting stages, and ultimately, the creation of an integrated control system for the BEV power unit. The methods of their solution by leading foreign companies are considered using examples with a typical 2-speed AT.

Keywords: battery electric vehicles, hybrid electric vehicles, automatic transmissions, power units, electric motor, motor generator

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-13-23>

References

1. Hendrickson J., Holmes A., Freiman D. General Motors front wheel drive two-mode hybrid transmission. *SAE world congress & exhibition*. Detroit, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-0508>.
2. Bulent C., Deng Y., Naghshtabrizi P., Genise T., Modular multi-speed transmission for MD-EV. *CTI symposium China, automotive transmissions, HEV and EV drives*. Shanghai, 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/310649557_MODULAR_MULTI-SPEED_TRANSMISSION_FOR_MD-EV (accessed 15 October 2021).
3. Vanderwerp D. *Why the Porsche Taycan EV's two-speed transmission is a big deal*. 2019. Available at: <https://www.caranddriver.com/news/a28903274/porsche-taycan-transmission> (accessed 29 October 2021).
4. Halvorson B. *Porsche Taycan electric car: 2-speed could be first of many in EVs*. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1124924_porsche-taycan-electric-car-2-speed-could-be-first-of-many-in-evs (accessed 29 October 2021).
5. 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>.
6. Li J., Wei H. Coordinated control of downshift powertrain of combined clutch transmissions for electric vehicles. *Mathematical problems in engineering*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/963725>.
7. Zhang J., Zhou R., Li X., Liu J., Xing Q., Tang P. Cooperation mode optimization between two clutches for dual clutch transmission during the torque phase. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2019, vol. 612, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032139>.
8. Huang W., Huang J., Yin C. Optimal design and control of a two-speed planetary gear automatic transmission for electric vehicle. *Applied sciences*, 2020, vol. 10, iss. 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10186612>.
9. Chai B., Zhang J., Wu S. Robust shifting control of a motor-transmission integrated system considering anti-jerking and speed regulation for electric vehicles. *IET intelligent transport systems*, 2019, vol. 13, iss. 1, pp. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5057>.
10. 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. *IEEE International electric vehicle conference*. Florence, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056081>.