



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 62-235

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.
главный научный сотрудник 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 01.07.2024.

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СТУПЕНЕЙ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ БАТАРЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В связи с начинающимся переходом силовых установок батарейных электромобилей (БЭМ) массового производства от одноступенчатых зубчатых редукторов к специально сконфигурированным автоматическим трансмиссиям (АТ) стремительно возрастает число публикаций, посвященных обоснованию и исследованиям их архитектуры, а также оптимизации применяемых конструктивных решений. Большое число публикаций посвящено двухступенчатым АТ (т. е. ДСТ) с двумя сцеплениями (или фрикционами) на первом этапе применения. В их тематике в последнее время наметилась четкая тенденция — смещение интереса к управлению ДСТ, особенно в переходных процессах автоматического переключения ступеней с совместным управлением мотор-генератором (МГ) и фрикционами в интегрированной силовой установке. Показано, что плавность переключений здесь имеет не меньшее значение, чем в классических АТ, не только из-за ударов (shift shocks), ухудшающих комфортабельность, но и возможности возбуждения колебательных режимов в электроприводе. В статье проведен анализ нескольких опубликованных вариантов стратегии управления такими процессами переключений и их компьютерной и физической реализации. Полагаем, что, учитывая недостаточность русскоязычных материалов по данной тематике, эта информация публикуется впервые.

Ключевые слова: батарейные электромобили, интегрированные силовые установки, автоматические трансмиссии, трансмиссии с двумя сцеплениями

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-5-20>

Введение. Одним из основных объектов НИОКР Объединенного института машиностроения НАН Беларуси традиционно (с момента его основания) являются гидромеханические и элект-

ромеханические трансмиссии (ГМТ и ГЭМТ), которые производятся в составе белорусской тяжелой колесной техники большой мощности и грузоподъемности.

Тяговый электропривод также вписывается в эту тематику, поскольку он является компонентом трансмиссии, где может использоваться либо автономно, либо путем встраивания электрических машин (мотор-генераторов) в картер ГМТ автомобиля. Это новый вид автоматической трансмиссии — гибридная электромеханическая. Так появился принципиально новый тип автомобиля — электромобиль (ЭМ), точнее — гибридный электромобиль (ГЭМ).

Применение электропривода на автомобилях известно более века. Однако их массовое производство стало возможным лишь с появлением надежной микроэлектроники. Первым в мире стал легковой ГЭМ Toyota Prius, производство которого началось в 1997 году. В 2003 году компания Allison (входившая в General Motors) также первой начала производство электробусов с ГЭМТ большой мощности. Далее производство и конструкции ГЭМ успешно развивались, захватывая все новые сегменты мобильной техники. Так появились малотоннажные развозные ГЭМ, компания Eaton создала трех-четырёхступенчатые ГЭМТ для грузовых автомобилей.

Анализ потенциальных возможностей применения ГЭМТ (в том числе на водородных топливных элементах) в типажах мобильной белорусской техники [1–4] подтвердил их реальность в перспективе. С этой целью в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси началось выполнение НИОКР в рамках научно-технических программ, готовились компоненты, создавались стенды. Был получен патент на полезную модель «Автомобиль с комбинированной энергоустановкой» [5] и изготовлен соответствующий макетный образец малолитражного ГЭМ как ходовой лаборатории для моделирования и предварительной отработки устройств и систем управления электроприводов тяжелой техники.

Использование режимов движения ГЭМ на электроприводе ограничивается емкостью аккумуляторной батареи, которая требовала подзарядку (с переходом на работу ДВС) в течение рабочего дня. Однако в процессе массового производства технологии аккумуляторных батарей быстро совершенствовались и к 2020 году пробег на одной зарядке уже возрос до 320 км, что позволило ГЭМ работать полный рабочий день, а зарядку проводить ночью. В частности, в 2017 году компания General Motors начала производство нового ГЭМ Chevy Volt с таким пробегом. Однако к этому времени потребители пришли к выводу, что нет смысла покупать ГЭМ и, наряду с зарядкой батареи, еще и заправлять его бензином, а лучше просто купить батарейный. В результате 100 тыс. Chevy Volt было продано с убытком, компания сняла его с производства, закрыла завод и объявила о переходе на БЭМ (первым из которых стал Chevy Bolt).

А общественность оценила выпуск Chevy Volt как одну из величайших ошибок General Motors.

В итоге это привело к переориентации ведущих производителей на первоочередное производство БЭМ и росту объемов их производства. Этот период получил название «революция электромобилей».

Электропривод большинства современных БЭМ содержит, как правило, одиночный МГ с одноступенчатым редуктором. В ходе массового производства и эксплуатации повышались мощность и скорость МГ, что в результате привело к расширению его рабочих режимов в зоны пониженного КПД на топографической характеристике. Стало очевидно, что устранение этого и других недостатков БЭМ возможно путем перехода от одноступенчатых редукторов к ступенчатым (хотя бы двухступенчатым) АТ.

Эта проблема активно обсуждалась в мировом автомобильном сообществе и вызвала большое число публикаций в Интернете по ключевым вопросам — от сомнений в необходимости до типа, числа ступеней, выбора кинематических схем (вальных, планетарных, комбинированных), типов элементов управления (сухих сцеплений или мокрых фрикционов, синхронизаторов, зубчатых муфт) и, наконец, проблем управления. Анализ публикаций показал, что сообщество пришло к консенсусу о необходимости установки АТ на БЭМ, и ряд авторов рекомендует для этой цели двухступенчатые АТ типа ДСТ (dual clutch transmission). К этим же выводам пришли и мы [6].

В 2019 году появилось сообщение об установке АТ на спортивный Porsche Taycan. Он должен стать первым БЭМ с двухступенчатой АТ среди множества таких машин с одноступенчатым механическим редуктором. А с 2022 года планировалось устанавливать ее на всей линейке машин этой модели [7].

Быстро возрастающее количество публикаций по данной тематике — свидетельство значительного роста как числа производителей БЭМ с АТ, так и объемов их исследований, а значит того, что «революция электромобилей» продолжается. По числу авторов первенство, как и в производстве самих электромобилей, принадлежит Китаю.

Большинство этих публикаций содержит результаты теоретических исследований функционирования двухступенчатых АТ в составе БЭМ, что соответствует начальному этапу освоения их массового производства. В них рассматриваются организация процесса переключений ступеней, принципы адаптивного и оптимального управления переключениями без разрыва потока мощности [8–13], управление синхронизаторами в ДСТ [14], влияние кинематической схемы, характеристик гидросистемы [15, 16].

Таким образом, отчетливо видно, что за последние год–полтора основное внимание в пуб-

ликациях все больше обращается на проблемы управления АТ в переходных процессах. Этим проблемам посвящена данная статья. Она является развитием нашей работы [6].

Учитывая изложенное, *цель данной работы* — провести анализ современных методов организации и управления динамикой процессов переключения ступеней двухступенчатыми ДСТ в составе интегрированных силовых установок БЭМ.

Особенности организации переключений ступеней ДСТ в составе интегрированной силовой установки БЭМ. Организация и динамика переключений ступеней ДСТ в таких силовых установках принципиально отличаются от переключений в силовых установках с ДВС. Причина — в особенностях типовых характеристик крутящего момента МГ. Ее исследования в настоящее время занимают одно из центральных мест в публикациях, размещаемых в Интернете. Рассмотрим их анализ, проведенный в [17] на примере прототипа мини-электробуса (electric minibus) с оригинальной двухступенчатой автоматизированной механической трансмиссией (АМТ) с двумя фрикционами (которая в данном случае аналогична ДСТ).

Кинематическая схема АМТ показана на рисунке 1. Ее особенность — переключения ступеней без разрыва потока мощности, обеспечиваемые фрикционом, обгонной муфтой (one-way sprag clutch) и блокирующим ее кольцом (locking ring) взамен двух синхронизаторов [18]. На первой ступени (см. рисунок 1 *a*) многодисковый фрикцион выключен, а муфта заблокирована кольцом. Момент МГ передается через среднюю зубчатую пару на промежуточный вал, а с вала через третью пару — на главную передачу и межколесный дифференциал. На второй ступени (см. рисунок 1 *b*) фрикцион включен, а муфта разблокирована. При переключении с первой на вторую ступень момент трения включаемого фрикциона регули-

руется электрогидравлической системой управления с обратной связью по перемещению органа управления, а момент муфты — регулируемым посредством электропривода трением блокирующего кольца о ведущую полу муфту вплоть до ее автоматического заклинивания, что в конечном счете и обеспечивает переключение без разрыва потока мощности. На режиме рекуперативного торможения на первой ступени муфта блокируется кольцом, чтобы обеспечить передачу кутящего момента в обратном направлении. На стоянке БЭМ муфта остается заблокированной, что заменяет стояночный тормоз и его привод. При этом межосевое расстояние между входным и промежуточным валами менее 110 мм, а между промежуточным и дифференциалом — около 125 мм. В результате ее вес (38 кг) и габариты сравнимы с одноступенчатыми редукторами (25 кг) премиальных пассажирских БЭМ.

Процесс переключения разделен на три фазы. Первая — *фаза крутящего момента*: разгон с места на первой ступени. Здесь отношение скоростей электромотора и выходного вала АМТ равно передаточному числу этой ступени. Вторая — *фаза инерции*. Одновременно буксуют фрикцион и блокирующее кольцо, а у МГ нет связи с механизмом АМТ, и на данном режиме она имеет две степени свободы. В третьей фазе включена вторая ступень: фрикцион замкнут, передаточное число соответствует этой ступени, крутящий момент МГ не передается через обгонную муфту, так как она вращается свободно.

Для оценки свойств динамической системы в частотной области построены диаграммы Боде (логарифмические амплитудно-частотные характеристики — ЛАЧХ) на этих трех фазах, показанные на рисунке 2. Они построены по линеаризованной модели, учитывающей динамику МГ, податливость полуосей, релаксацию и скольжение

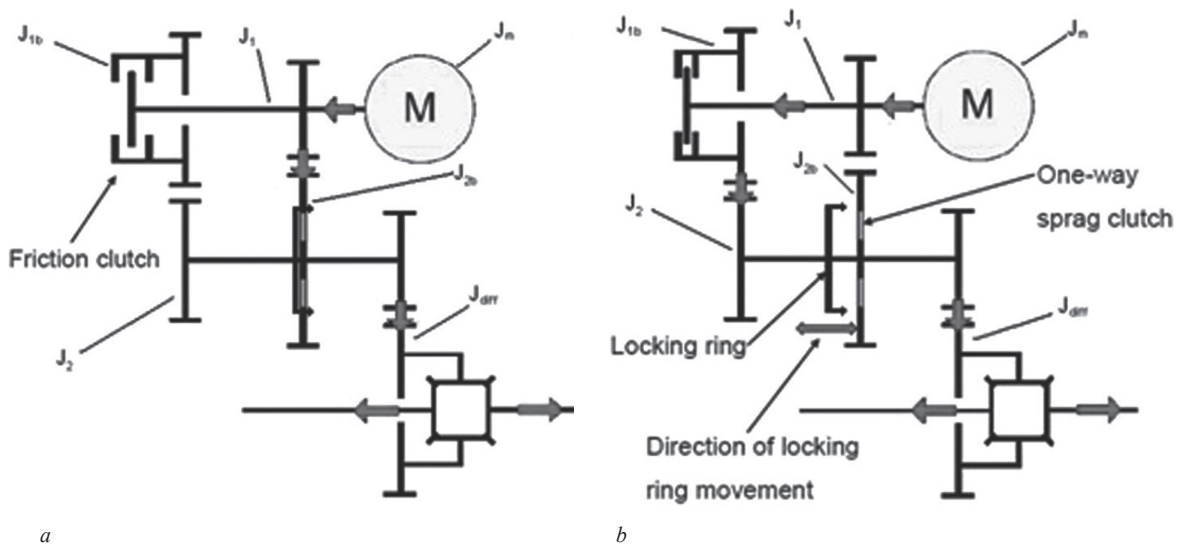


Рисунок 1 — Кинематическая схема АМТ при работе на первой (*a*) и второй (*b*) ступенях
Figure 1 — Kinematic diagram of the automated manual transmission (AMT) operation in first gear (*a*) and second gear (*b*)

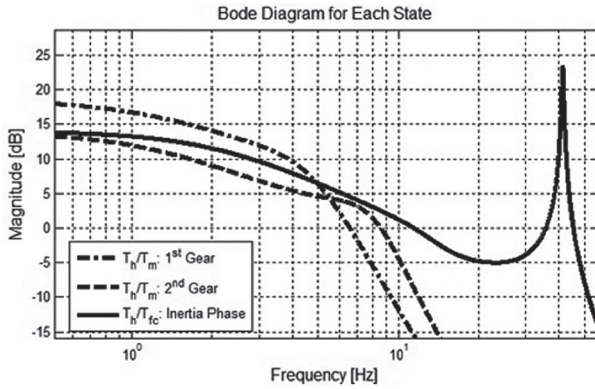


Рисунок 2 — Амплитудно-частотная характеристика линейризованной системы на первой ступени (штрих-пунктир), на второй ступени (пунктир) и во время фазы инерции при скорости движения БЭМ 10 м/с (сплошная)
 Figure 2 — Magnitude-frequency response of the linearized system in first gear (dash-dotted line), in second gear (dashed line) and during the inertia phase when BEV speed is 10 m/s (solid line)

шин, а параметры, практически не влияющие на динамику движения БЭМ, исключены.

Различие собственных частот на первой и второй ступенях обусловлено различием их передаточных чисел, которые влияют на величину момента инерции МГ, приведенную к ведущим колесам. Существенное демпфирование системы на этих ступенях обусловлено очень малой постоянной времени МГ, поэтому в фазе инерции при очень малой доле приведенного момента инерции МГ собственная частота системы резко возрастает, что хорошо видно на диаграмме. Затем ее амплитуда снижается благодаря высоким динамическим характеристикам актюатора фрикциона.

Отмечается, что высокая собственная частота может привести к возможным проблемам в области динамики, а также к шуму, вибрациям и рывкам в случае неоптимальной настройки фрикциона и его системы управления.

На рисунке 3 показана блок-схема системы управления МГ в течение фазы инерции при пере-

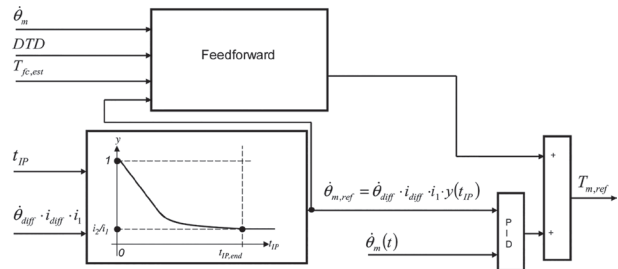


Рисунок 3 — Блок-схема feedforward–feedback системы управления МГ в фазе инерции переключения вверх
 Figure 3 — Block diagram of the feedforward–feedback MG control system during the inertia phase of the upshift

ключению вверх. Как сказано выше, на этой фазе АМТ имеет две степени свободы, так что можно одновременно управлять МГ и фрикционом. Система управления содержит блоки двух регуляторов — feedforward и PID, а также блок формирования задаваемого закона регулирования скорости МГ. Он имеет вид зависимости безразмерного отношения текущих значений передаточных чисел второй и первой ступеней от текущего момента времени фазы инерции. Ее профиль выбран так, что в первой части фазы задаваемая скорость МГ снижается быстро, а затем плавно падает до нуля. Форма профиля может настраиваться на требуемую длительность фазы инерции в зависимости от параметров БЭМ, требований к переключению вверх, восприятия разрыва потока мощности в момент окончания фазы инерции. Также анализируется динамика воздушного зазора МГ, который моделируется передаточной функцией первого порядка, и при этом учитывается, на каком участке своей характеристики он находится.

Требуемый профиль этой зависимости формируется с помощью законов управления скоростью и моментом МГ (рисунок 4). Здесь приведены графики изменения его скорости и крутящего момента, а также крутящих моментов на входе АМТ на первой и второй ступенях в процессе пе-

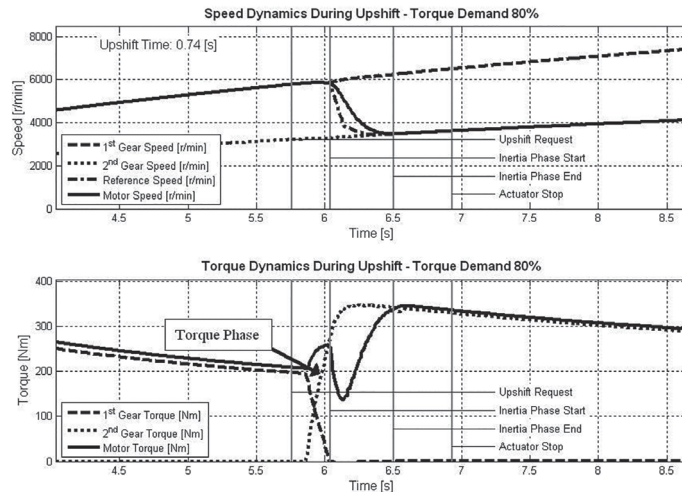


Рисунок 4 — Динамика МГ и крутящих моментов на входе АМТ во время переключения на вторую ступень при 80 % DTD (driver torque demand — запрашиваемый водителем крутящий момент)
 Figure 4 — Dynamics of the MG and the torques of the AMT input during upshifting at a DTD (driver torque demand) of 80 %

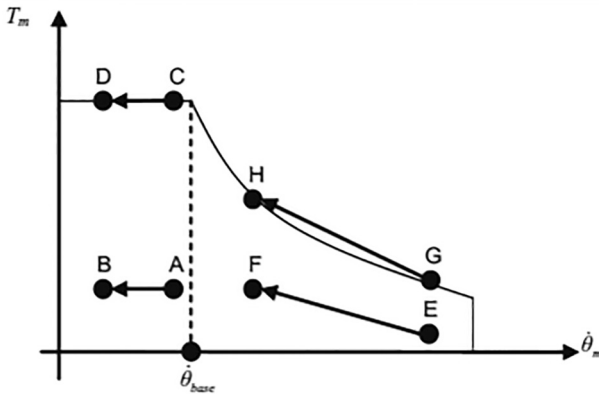


Рисунок 5 — Возможные условия переключения вверх на теоретической характеристике электродвигателя при условии постоянства положения педали акселератора во время переключения

Figure 5 — Possible upshift conditions on the theoretical characteristic of the electric motor under the condition of constant accelerator pedal position during manoeuvre

реключения на вторую ступень, обеспечиваемые системой управления. Вертикальными линиями отмечены моменты времени поступления команды на переключение (upshift request), начала и окончания фазы инерции (inertia phase), а также остановки актуатора (actuator stop). В фазе крутящего момента (torque phase) скорость мотора (верхний график, сплошная жирная кривая) практически не меняется, а в фазе инерции плавно повышается до синхронизации со скоростью на второй ступени. При этом его крутящий момент (нижний график, сплошная жирная) плавно повышается, с началом фазы инерции резко падает, а затем резко повышается до требуемой величины на второй ступени. В целом за время переключения профиль кривой момента мотора напоминает фрагмент синусоиды.

На рисунке 5 показана теоретическая характеристика МГ в координатах «скорость — крутя-

щий момент», на которой нанесены точки начала и окончания возможных переключений. Так, все описанные выше переключения происходили вверх из точки *A* в точку *B* или из *C* в *D* (при разных величинах подачи топлива), т. е. в зоне заданного водителем *постоянного максимального крутящего момента*.

В зоне постоянной мощности показаны возможные переключения вниз из *E* в *F* или из *G* в *H*, и нужно регулировать и крутящий момент, и скорость МГ, что влияет на ускорение и джerk движущегося БЭМ в процессе переключения. Таким образом, алгоритмы управления в данном случае сложнее. В [17] даны три их варианта.

На рисунке 6 в качестве примера приведен один из них — для переключения вниз в результате внезапного нажатия водителем на педаль газа (кик-даун) до 80 % со скорости 25 км/ч под нагрузкой. Сохранены обозначения по рисунку 4. Кольцом на линии скорости второй ступени обозначена зона начала фазы инерции. Здесь резко начинает буксовать выключаемый фрикцион вследствие перехода от высокого статического коэффициента трения к меньшему динамическому. Отмечается, что вследствие этого в данной зоне могут возникать крутильные колебания полуосей привода ведущих колес.

Как видим, здесь реализовано скоординированное управление МГ и фрикционом в переходном процессе переключения ступеней двухступенчатой АМТ.

В нашей работе [6] также рассматривалось управление двухступенчатой вальной АТ с двумя фрикционными, а также двухступенчатой АТ с одним планетарным рядом на примерах из [19, 20].

Повышение плавности переключения ступеней в интегрированных силовых установках БЭМ с двухступенчатыми АТ. В связи с начав-

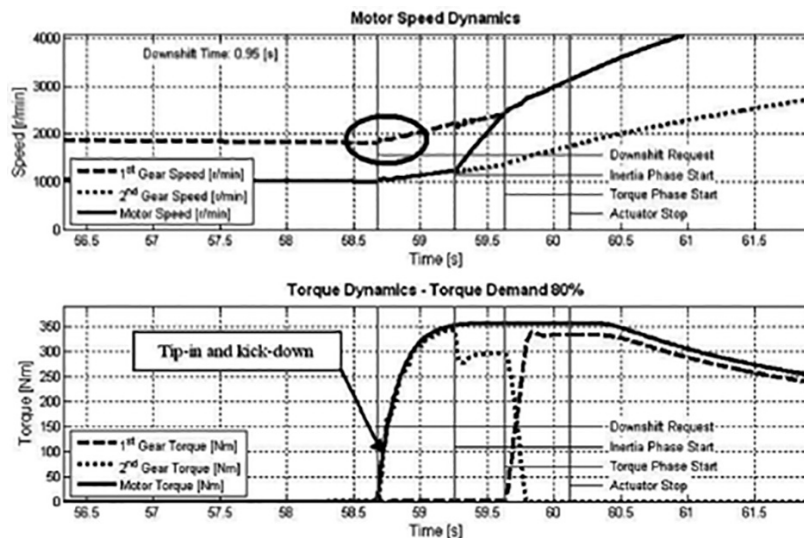


Рисунок 6 — Динамика скоростей и крутящих моментов в процессе переключения вниз со скорости 25 км/ч под нагрузкой с внезапным увеличением запрашиваемой водителем подачи топлива (режим кик-даун) до 80 % в конце процесса
Figure 6 — Speed and torque dynamics during downshifting from a speed of 25 km/h under load with a sudden increase in driver-requested fuel supply (Tip-in and Kick-down) up to 80 % at the end of the process

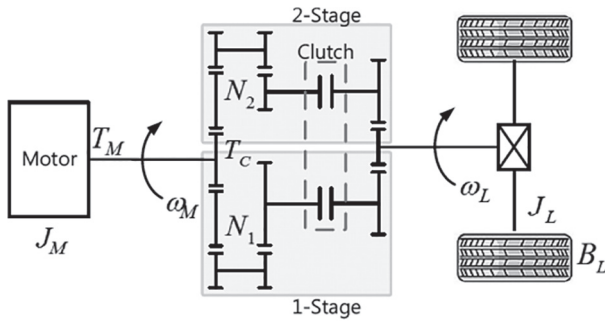


Рисунок 7 — Упрощенная модель силовой установки БЭМ с вальной двухступенчатой АМТ с двумя фрикционами: T_C, T_M — крутящие моменты на входе и выходе АМТ; J_L, B_L — момент инерции и коэффициент сопротивления качению колеса
Figure 7 — Simplified model of BEV powertrain with shaft dual-clutch AMT with two frictions: T_C, T_M — torques at the input and output of AMT; J_L, B_L — moment of inertia and rolling resistance coefficient of the wheel

шимся переходом электропривода БЭМ с одноступенчатых редукторов на ступенчатые и бесступенчатые АТ в ряде публикаций проведена оценка свойств и особенностей управления различных типов автомобильных трансмиссий с точки зрения применения на БЭМ [21–23]. Среди них в последние годы все большее внимание привлекают АМТ, которые, обладая свойствами классических АТ, существенно превосходят их по экономичности. ДСТ и АМТ с двумя механическими ступенями существенно улучшают экономичность и скоростные качества БЭМ по сравнению с одноступенчатыми редукторами. Однако, в отличие от последних, им присущ общий недостаток ступенчатых АТ. Это рывки и удары (shift shocks) при переключении ступеней, которые, в частности, ухудшают комфортабельность. Борьба с ними в силовых установках БЭМ имеет свои особенности.

В [21] для их уменьшения разработан быстродействующий алгоритм управления скоростью средних и больших БЭМ с двухступенчатыми АМТ (рисунок 7), имеющими по два фрикциона.

Здесь рывки при переключении ступеней обусловлены разностью скоростей МГ и выходного вала, соотношение которых во время буксования фрикционов не идентично передаточным числам. В силовых установках с ДВС это

компенсируется гидротрансформатором, имеющимся в АТ.

Известны два вида методов подавления шоксов при переключениях: управление крутящим моментом и управление скоростью. Первый применяется в АТ силовых установок с ДВС. Однако обеспечить точную синхронизацию скоростей за короткое время, управляя моментами трения фрикционов, достаточно сложно, поэтому здесь шоксы ожидаемы. Известны такие же установки с АМТ, в которых имеется управление скоростью. Но там применяется простой пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) управления дроссельной заслонкой подачи топлива, что также непригодно для БЭМ. Хотя появилось и управление скоростью с упреждением, сложно создать такую конструкцию контроллера, поскольку его выходом является электрическое напряжение, количественные характеристики связей которого со скоростью буксования фрикционов неизвестны.

Предлагаемый метод обеспечивает быструю синхронизацию этих скоростей с помощью *контроллера с упреждающей компенсацией команд управления скоростью* (speed command feedforward compensation) и *контроллера с обратной связью*. В результате, как отмечается, эффективно обеспечиваются переключения без каких-либо рывков [21].

Блок-схема системы управления АМТ, реализующей этот метод, показана на рисунке 8. Она была испытана на электробусе средней вместимости для анализа и экспериментов с целью демонстрации обоснованности метода. Для анализа ее частотных характеристик построена диаграмма Боде (как и в приведенном выше примере). В алгоритмах, в частности, учитывается зависимость момента трения фрикционов от влияния рабочей жидкости.

В процессе ходовых испытаний электробуса с двухступенчатой АМТ проводились исследования переключения ступеней контроллером, реализующим предлагаемый метод управления скоростью с компенсацией, и, для сравнения, с известным контроллером на базе ПИ-регулятора.

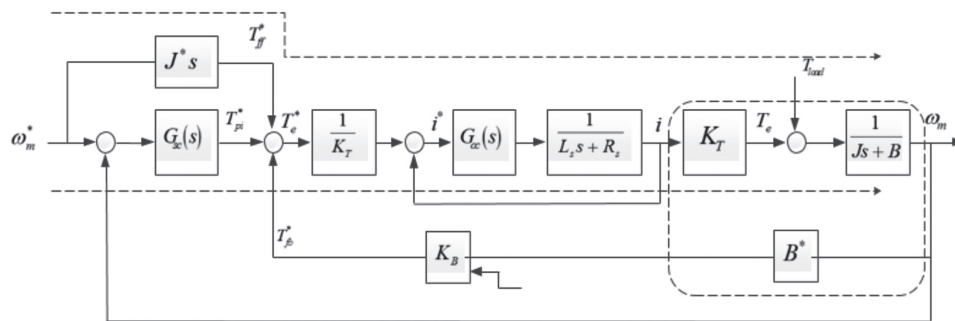


Рисунок 8 — Блок-схема предлагаемого метода управления [21]: $G_{sc}(s)$ и $G_{cc}(s)$ — передаточные функции названных контроллеров; остальные обозначения — по рисунку 7, а также по ссылке в оригинале
Figure 8 — Block diagram of proposed speed control method [21]: $G_{sc}(s)$ and $G_{cc}(s)$ — transfer functions of the named controllers; other notations are from Figure 7 and the original reference

На рисунке 9 представлены графики изменения параметров процесса переключения ступеней вверх. Вертикальные линии разделяют поля графиков на три зоны: левая — фаза крутящего момента (трогание с места на первой ступени и разгон), правая — включение высшей ступени, средняя — фаза инерции. На левом виден закон управления крутящим моментом и скоростью МГ в фазе инерции, на правом — скорость и колебания корпуса движущегося электробуса во время переключения. Испытания проводились по трем сценариям переключений: вверх, вниз, вниз с регенеративным торможением.

Сравнение результатов испытаний предлагаемого и известного контроллеров показало следующее. Время переключения сократилось с 2,87 до 1,89 с по сравнению с обычным ПИ-контроллером. Отмечается, что, если при данном контроллере уменьшить время переключения до 1,89 с, это приведет к появлению ударов, поскольку к его концу еще сохранится разность скоростей фрикционов. По данным испытаний, предлагаемый контроллер уменьшает величину удара почти в два раза (правый график, линия с колебаниями). При этом скорость электробуса в фазе инерции постоянна.

Таким образом, видно, что обеспечиваемые контроллером с компенсацией скорости характеристики управления лучше, чем с известным ПИ-контроллером.

Как отмечается в [22], многоступенчатые АТ могут улучшить функционирование и снизить стоимость БЭМ, однако они диктуют вызов: исключение джержка при переключениях, что иногда нереально из-за выхода на пределы возможностей — «насыщение» (saturation) МГ и фрикционов [22]. Даны условия, четко определяющие

фундаментальные ограничения переключений без джержка (являющегося результатом вмешательства МГ или актюатора).

Рассматриваются три сценария переключений (рисунки 10, 11):

- сценарий 1 — вверх со скорости 65 км/ч, зона ограниченной мощности МГ, ускорение 1 м/с², подача топлива 80 %;
- сценарий 2 — вниз со скорости 18 км/ч, зона ограничений момента МГ, ускорение 1 м/с², подача топлива 80 %;
- сценарий 3 — вниз, торможение, зона ограничений момента МГ, ускорение — 1,5 м/с², подача топлива отсутствует.

На рисунке 12 — график зависимости длительности фазы инерции в процессе переключения по сценарию 2 от текущего значения ускорения движения электробуса при условии отсутствия шока. Она базируется на том, что для предотвращения шока синхронизация скоростей соединяемых инерционных масс, осуществляемая в этой фазе, к ее окончанию должна быть закончена. Другими словами, разность скоростей в этот момент должна быть нулевой, так как именно незавершенная синхронизация и порождает шок.

Таким образом, график показывает: чем больше ускорение движения, задаваемое водителем, тем большая продолжительность фазы инерции нужна для синхронизации из-за ограниченных скоростей реакции МГ и фрикционов. В принципе эта функция может выполняться контроллером, но при его отсутствии выход за ограничения вызовет шок при переключении.

Совместное управление МГ и фрикционами двухступенчатой АТ при переключениях ступеней в силовых установках гибридных электромобилей. Как отмечалось выше, недавнее по-

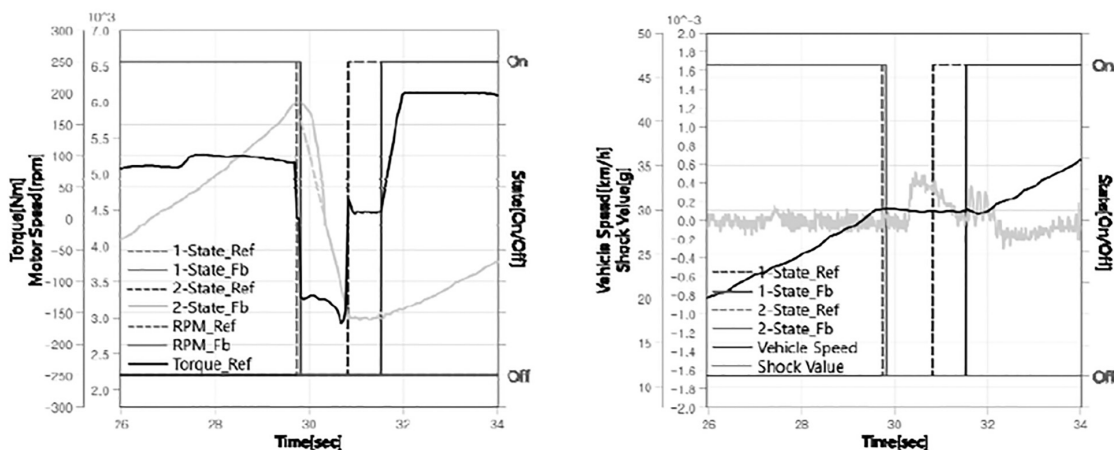


Рисунок 9 — Результаты испытаний предлагаемого метода управления скоростью при переключении вверх: крутящий момент, скорость МГ, скорость электробуса, состояние трансмиссии, величина вибраций [21]: оси абсцисс — время, с; левая ось ординат левого графика — крутящий момент и скорость мотора; правая — состояние переключения (вкл/выкл); левая ось ординат правого графика — скорость электробуса км/ч, шок [g]; правая — переключение (вкл/выкл). Кривые на графиках: сплошные жирные — крутящий момент; тонкие — скорость МГ (слева), скорость движения электробуса (справа), пунктирные — расчет

Figure 9 — Test results of the proposed speed control method for upshifting: torque, MG speed, electric bus speed, transmission state, vibration magnitude [21]: abscissa axes — time (s); left ordinate axis of the left graph — torque and motor speed; right axis — state [ON/OFF]; left ordinate axis of the right graph — electric bus speed km/h, shock [g]; right axis — switching (on/off). Curves on the graphs: solid bold ones — torque; thin ones — MG speed (left), electric bus speed (right), dashed ones — calculation

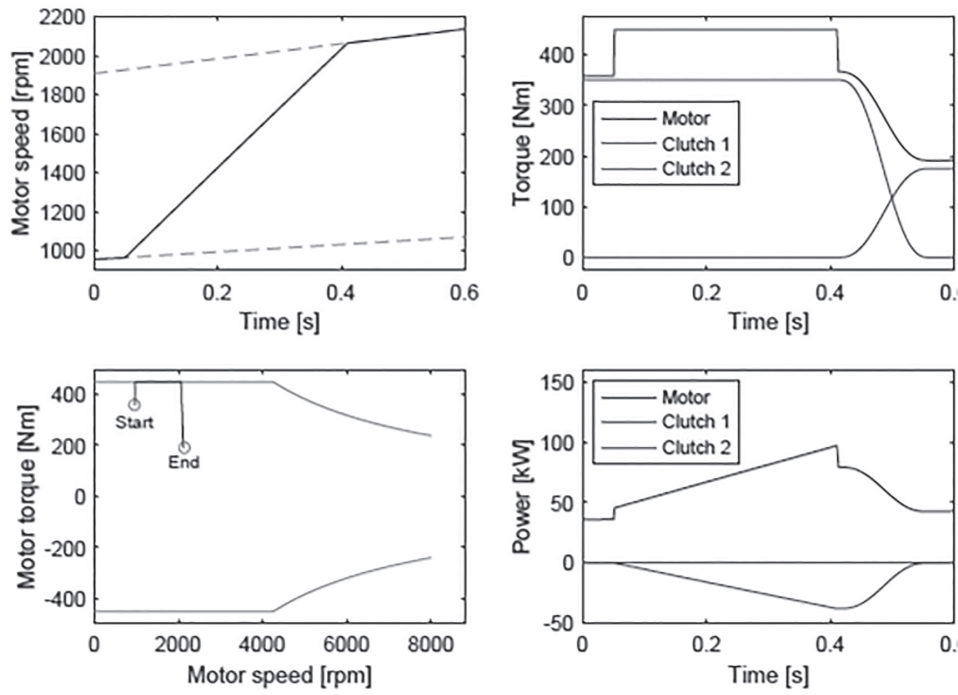


Рисунок 10 — Пример траектории переключения ДСТ по сценарию 2, которая возможна только при архитектурах ДСТ с двумя фрикционами или с двумя механизмами свободного хода
 Figure 10 — Example of a DCT shifting trajectory in scenario 2, which is only possible with dual friction or dual freewheel DCT architectures

явление БЭМ в массовом производстве можно рассматривать как результат развития электропривода в составе ГЭМ. В ходе многолетней массовой эксплуатации последних методология согласованного управления МГ и ДСТ в интегрированных гибридных силовых установках была доведена до совершенства. Целесообразность использования этого опыта при создании интегрированных

систем управления силовых установок БЭМ очевидна.

Сложность совместного управления МГ и ДСТ ГЭМ обусловлена тем, что для обеспечения высокого качества процессов переключения ступеней необходимо одновременно управлять источником мощности и актюаторами фрикционов. С этой целью предложена новая стратегия управления ДСТ

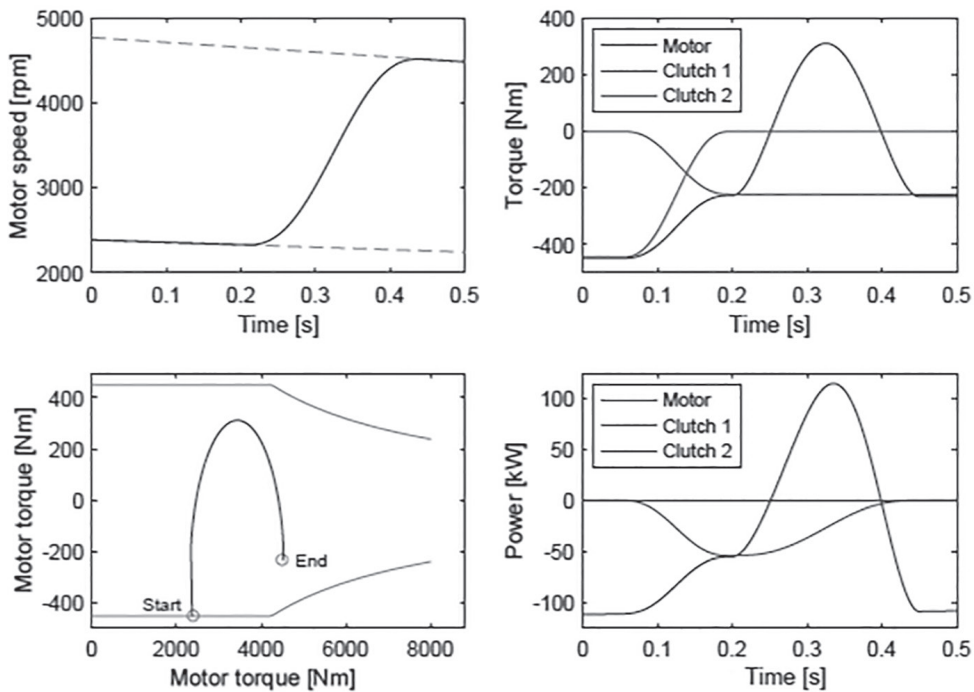


Рисунок 11 — Пример траектории переключения ДСТ по сценарию 3, возможной, если сцепление 1 — фрикционного типа
 Figure 11 — Example of a DCT shifting trajectory in scenario 3, possible if clutch 1 is of friction type

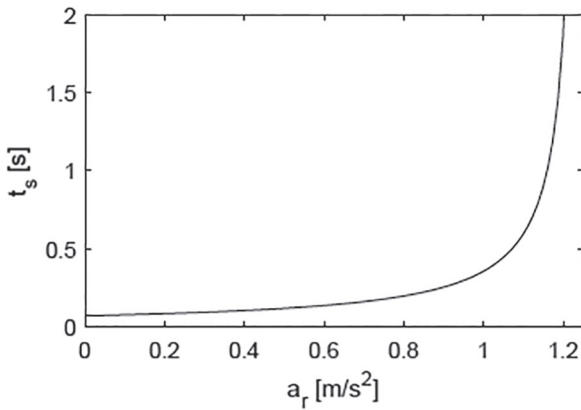


Рисунок 12 — Пример ограничений при переключении вниз под нагрузкой со скорости 18 км/ч с изменением ускорения: ось абсцисс — ускорение a_r , м/с²; ось ординат — длительность фазы инерции t_s , с
Figure 12 — Example of limitations during downshifting under load from a speed of 18 km/h with changing acceleration: abscissa axis — acceleration a_r , m/s²; ordinate axis — duration of the inertia phase t_s , s

в ГЭМ параллельной архитектуры, основанная на обратных связях по состоянию скоростей и крутящих моментов [23].

Для сравнения на рисунке 13 показан типичный переходный процесс автомобиля с ДСТ при переключении вверх с управлением по скорости мотора (пунктирная линия на верхнем графике). Как видим, в фазе инерции происходит значительное перерегулирование выходного крутящего момента, что приводит к ударному замыканию включаемого фрикциона и вибрациям в заключительной фазе (усиливаемым также переходом от динамического коэффициента трения к статическому).

На рисунке 14 показана структура интегрированной системы управления силовой установкой ГЭМ, реализующей предлагаемую новую стратегию в фазе инерции. Как видим, здесь, наряду с PID и feedforward-контроллерами, показан также контроллер формирования траектории крутящего момента. На выноске показана его структура, включающая инвертор.

Желаемая (предварительно выбранная, оптимальная) траектория регулирования крутящего момента МГ обозначена на рисунке 15 пунктиром. Дальше всех от нее — траектория контроллера с упреждением (точечная). Немного ближе траектория контроллера с обратной связью (сплошная линия). Наименьшие отклонения от желаемой траектории дает предлагаемая стратегия с обратной связью и упреждением (штрих-пунктирная линия).

Для экспериментальной проверки системы в целом были проведены стендовые испытания ДСТ. Некоторые из итоговых результатов приведены на рисунках 16, 17. Видно, что в фазе инерции траектории крутящего момента выходного вала обеспечивают плавное и быстрое включение фрикциона, так что колебания при его замыкании существенно снизились с помощью управления

в конце фазы. А обычная стратегия управления, основанная только на информации о скорости, не смогла непосредственно регулировать shift shock (большие колебания момента обнаружены на рисунке 17 d).

В результате экспериментально подтверждено, что интегрированное управление скоростью и крутящим моментом очень эффективно для управления ГЭМ с ДСТ.

Об интеграции электромотора и трансмиссии для легких электромобилей: оценка 2023 года перспектив и размерностей компонентов. Быстрый рост производства легких ЭМ с 2010-х по настоящее время требует дальнейшего развития их разработки и исследований. Система проектирования постепенно развивалась от обычных ГЭМ к подзаряжаемым и, наконец, к современным полностью электрическим технологиям (БЭМ), которые оптимально сочетают функциональность, эффективность, долговечность, ремонтпригодность и стоимость. Их описание применительно к легким ЭМ широко представлено в публикациях, в числе которых сравнительный анализ топологии и функционирования ЭМ

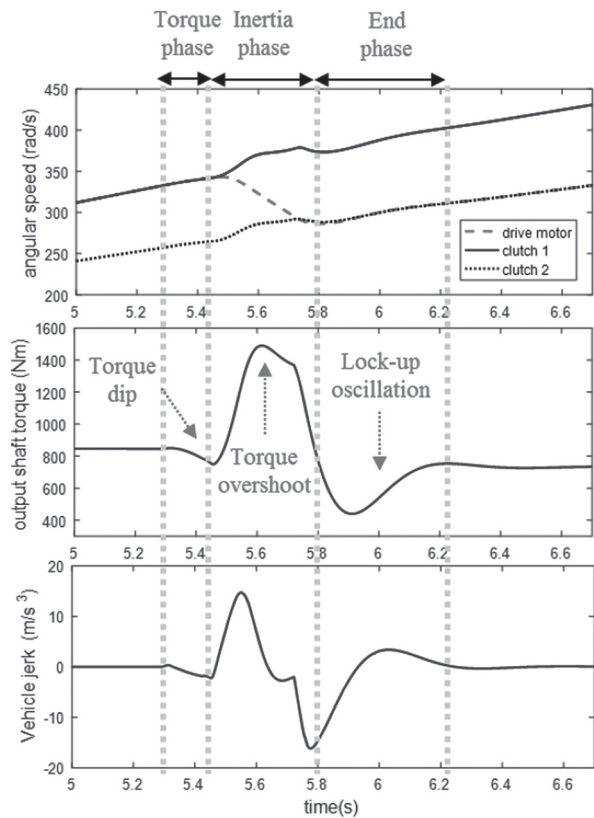


Рисунок 13 — Типичный отклик автомобиля с ДСТ при переключении вверх: оси абсцисс — время, с; верхняя ось ординат — угловая скорость, рад/с, средняя — крутящий момент выходного вала, Н·м; нижняя — джerk автомобиля, м/с³; Torque dip — падение крутящего момента; Torque overshoot — перерегулирование крутящего момента; Lock-up oscillation — колебания при замыкании фрикциона
Figure 13 — Typical response of a vehicle with DCT during an upshift: abscissa axis — time, s; upper ordinate axis — angular velocity, rad/s; middle one — output shaft torque, N·m; lower one — vehicle jerk, m/s³

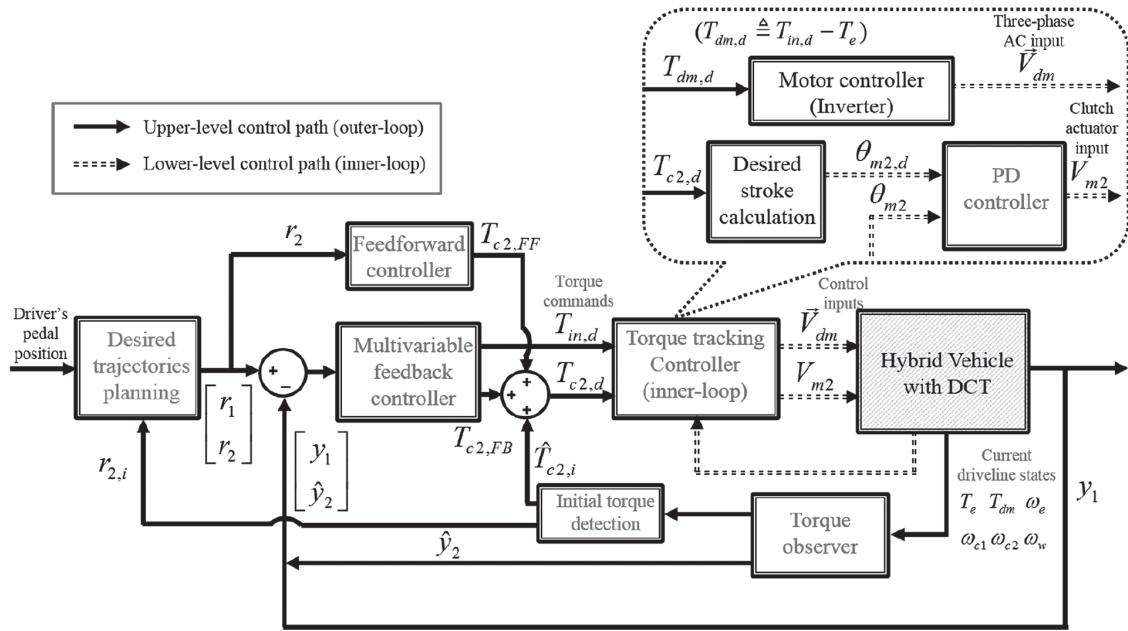


Рисунок 14 — Структура управления фазой инерции: обратная связь по нескольким переменным на основе наблюдателя плюс управление с упреждением
 Figure 14 — Inertia phase control structure: observer-based multivariable feedback control + feedforward control

с МГ на постоянных магнитах и другими известными типами МГ, что особенно важно в сложившихся условиях мотивации промышленности на снижение надежд на редкоземельные материалы. Эта информация позволяет определить тенденции развития их технологий, которые мигрируют в производство ЭМ. Ряд исследований посвящен новым конструкциям МГ и стратегиям управления, которые способны повысить плотность крутящего момента (torque density), снизить до нуля применение редкоземельных материалов, уменьшить колебания крутящего момента и/или улучшить его распределение для повышения дорожных качеств ЭМ [24].

В центре внимания данной работы — обзор технологий электроприводов прошлых, настоящих и развивающихся поколений ЭМ для обеспечения базовых требований и целей. Представлены основы их выбора для получения перспективного тягового усилия и динамики движения как вводный контекст для возможных или близких к производству электроприводов. Данные по конструкции, касающиеся комбинаций ЭМ и АТ, детализированы по показателям удельной энерговооруженности (объемной и массовой плотности мощности и момента). Тенденции развития их технологий рассмотрены и суммированы по выпускаемым и готовящимся к производству продуктам. Также приведен обзор размерностей ранних приводных систем и выбор требований, полученных при обследовании трех легких ЭМ. В заключение рассматривается развитие электрифицированных приводных модулей с потенциалом применения на легких ЭМ — от компактных легковых до полноразмерных грузовых.

Результаты обзора большого числа ЭМ и МГ, которые находятся в производстве, подготовлены к производству или имеют высокую вероятность производства, начиная с ранних 2000-х и до настоящего времени, суммированы на рисунках 18–20. Представленная на них информация позволяет сформировать представление о признаках и тенденциях интеграции силовых установок ГЭМ и БЭМ.

На рисунке 18 в координатах «максимальные скорость и мощность МГ» нанесены соответствующие

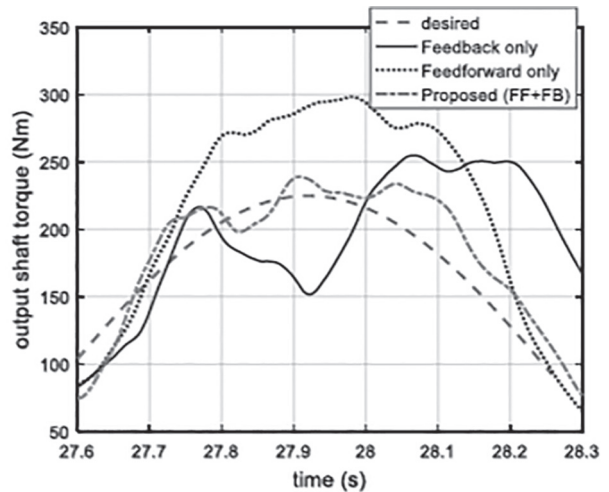


Рисунок 15 — Сравнение траекторий крутящего момента на выходном валу при следующих видах управления: сплошная — только с обратной связью (H-infinity loop shaping controller); точки — только с упреждением; штрих-пунктирная — с обратной связью и упреждением (предлагаемое); пунктир — желаемая; штрих-пунктир — предлагаемая (с обратной связью и с упреждением)

Figure 15 — Comparison of output shaft torque trajectories for the following control types: solid line— feedback control only (H-infinity loop shaping controller); dotted line— feedforward control only; dash-dotted line— feedback + feedforward control (proposed)

ющие данные подвергшихся анализу конкретных ЭМ. Кружками обозначены ЭМ ранней генерации, квадратами — современные легкие ЭМ, треугольниками — тяжелые ЭМ. Справа имеется шкала рабочих напряжений в интервале 100–1000 В. Напряжение 200–300 В соответствует ранней генерации, 500–600 В — современной, а 700–900 В — тяжелым ЭМ.

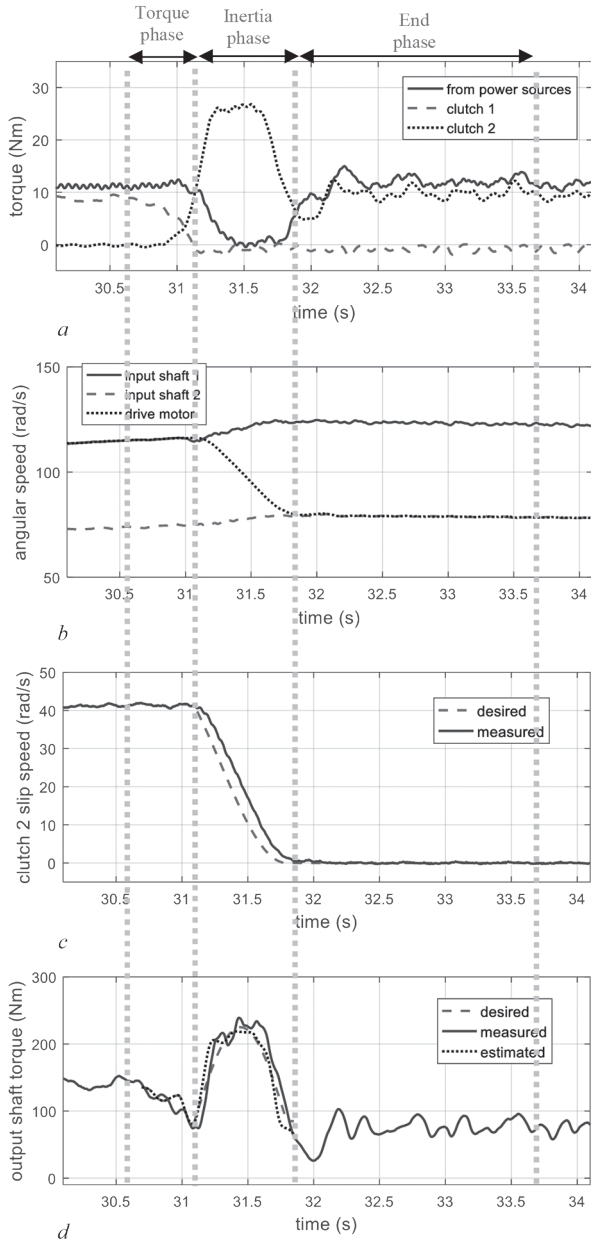


Рисунок 16 — Экспериментальные подтверждения предложенного метода управления: *a* — крутящие моменты: сплошная — источник мощности, пунктир — фрикцион 1, точки — фрикцион 2; *b* — угловые скорости: сплошная — входной вал, пунктир — фрикцион 1, точки — фрикцион 2; *c* — скорость буксования включаемого фрикциона: сплошная — желаемое, пунктир — измерение; *d* — крутящий момент выходного вала: сплошная — измерено, пунктир — желаемое, точки — ожидаемое
Figure 16 — Experimental validations of the proposed control method: *a* — torques: solid line — power source, dashed line — clutch 1, dotted line — clutch 2; *b* — angular speeds: solid line — input shaft, dashed line — clutch 1, dotted line — clutch 2; *c* — slip speed of on-coming clutch: solid line — desired, dashed line — measured; *d* — output shaft torque: solid line — measured, dashed line — desired, dotted line — estimated

Рядом с каждым значком на поле графика дано название конкретной обозначенной им модели ЭМ. Здесь показана связь максимальной мощности и крутящего момента двух генераций конструкций: ранней — от 2000 до 2014 года, существующей — от 2015 года до настоящего времени. Для сравнения также включены несколько МГ для тяжелых машин, характеристики которых существенно отличаются.

Конструкции существующей генерации имеют увеличенную максимальную мощность — от 35 до 400 кВт. Отмечается рост рабочего напряжения постоянного тока — от 300–400 В до 800 В и более. Максимальные рабочие скорости большинства ранних конструкций — около 20 000, а у нескольких существующих поднялась до 30 000 об/мин.

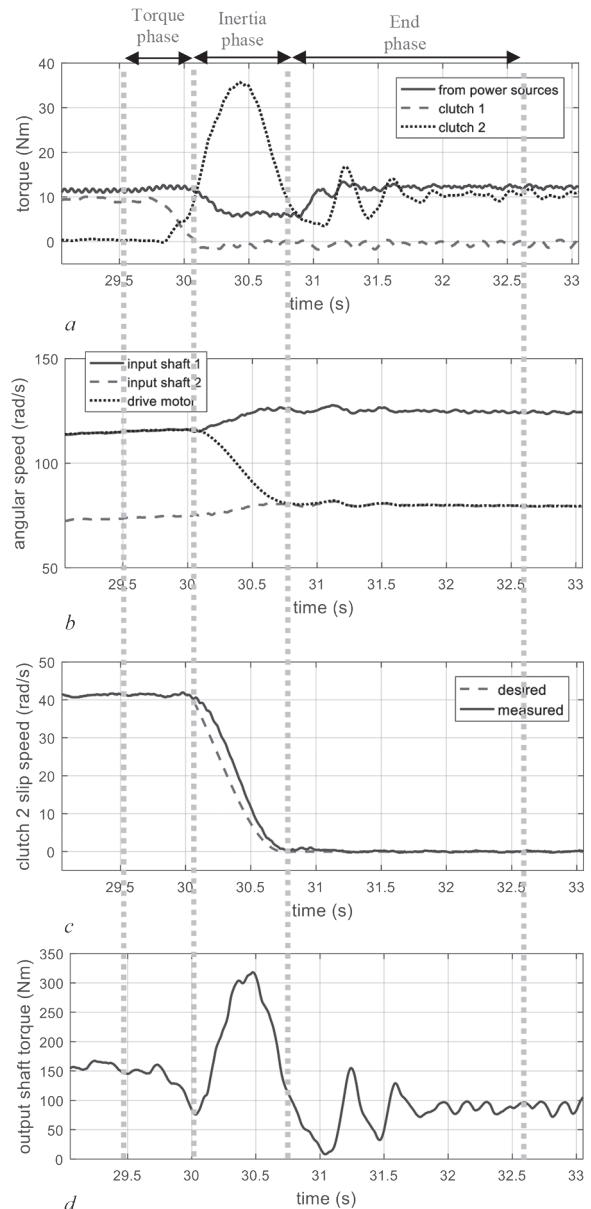


Рисунок 17 — Результаты обычного управления по скорости для сравнения (обозначения по рисунку 16)
Figure 17 — Results of conventional speed control for comparison (designations according to Figure 16)

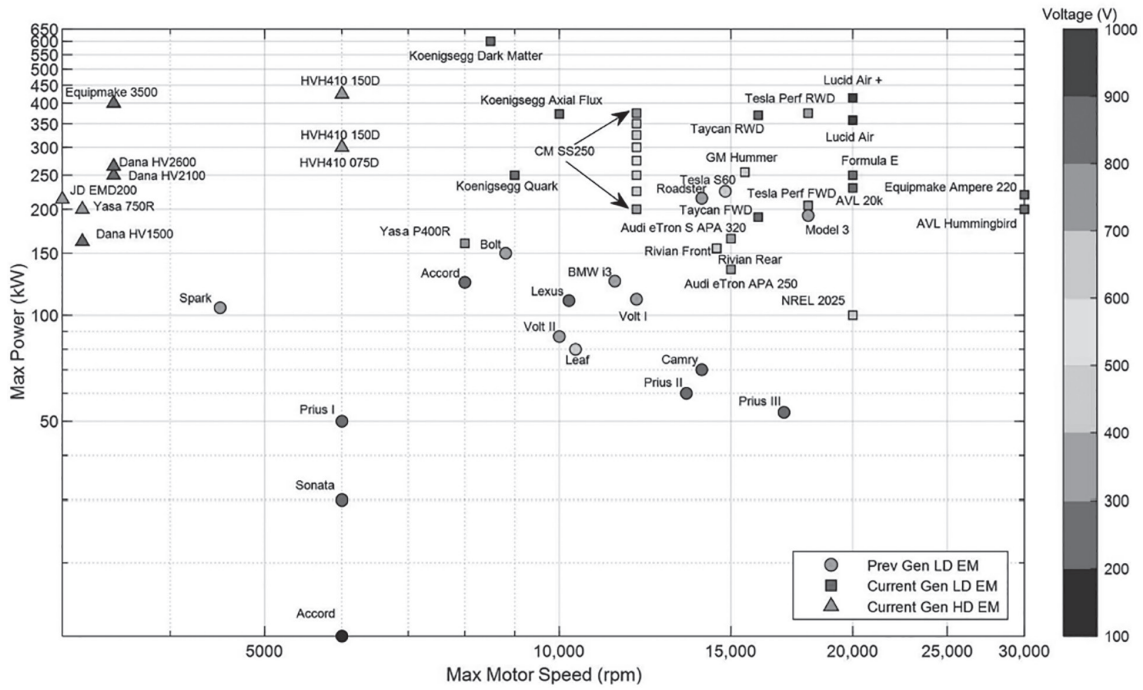


Рисунок 18 — Обзор плотности максимальной мощности и максимальной скорости МГ от различных источников и производственных поколений
 Figure 18 — Survey of maximum power density and maximum MG speed from different sources and production generations

Максимальная плотность мощности, скорости и момента сами по себе еще не определяют интеграцию. С точки зрения требований будущей эксплуатации ЭМ при выборе МГ и АТ критичны пиковый момент и базовая скорость. На рисунке 20 показаны зависимости базового крутящего

момента от базовой скорости МГ для легких ЭМ, представленных на рисунках 18 и 19. Анализ показывает, что от ранней генерации к современной точки максимального момента на базовой скорости смещаются в направлении увеличения в соответствии с тенденцией самой базовой скорости.

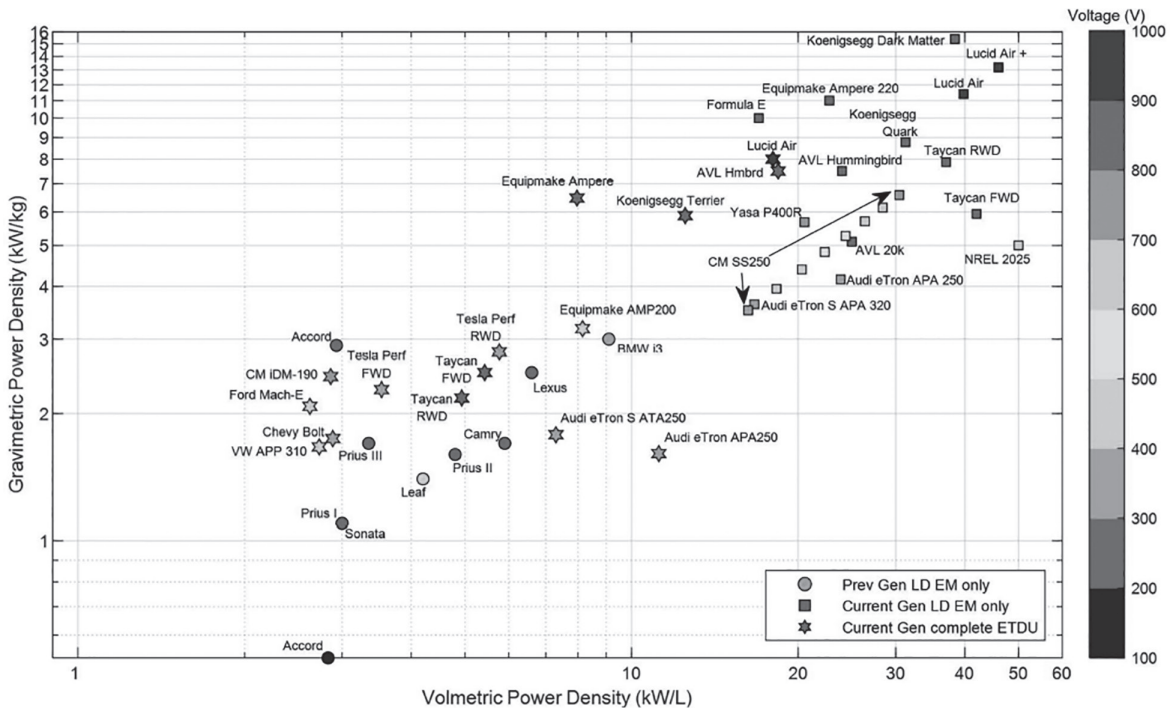


Рисунок 19 — Обзор гравиметрической и волюметрической плотности мощности МГ от различных источников и производственных поколений: звездочка — комплектная интегрированная силовая установка (ETDU); остальные — те же, что и на рисунке 18
 Figure 19 — Survey of gravimetric and volumetric MG power density from MG from different sources and production generations

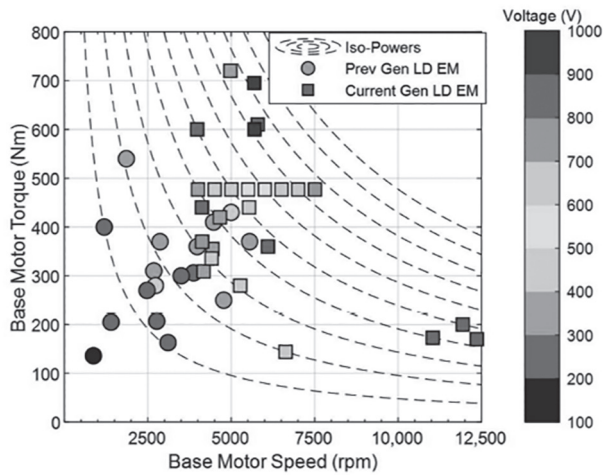


Рисунок 20 — Обзор базовых скоростей и базовых моментов (в точке максимальной мощности) МГ ранних и современных производственных генераций

Figure 20 — Survey of previous and current generation MG base speed and torque (point of maximum power)

В итоге на рисунках 18–20 обобщен и в компактной форме представлен большой объем информации о базовых параметрах и тенденциях мирового развития легких электромобилей.

Заключение. Электропривод большинства современных БЭМ содержит, как правило, одноступенчатый МГ с одноступенчатым редуктором. В ходе массового производства и эксплуатации повышались мощность и скорость МГ, что в результате привело к расширению его рабочих режимов в зоны пониженного КПД на топографической характеристике. Стало очевидно, что устранение этого и других недостатков БЭМ возможно путем перехода от одноступенчатых редукторов к ступенчатым (хотя бы двухступенчатым) АТ.

Мировое автомобильное сообщество по итогам исследований и обсуждений пришло к консенсусу о необходимости установки АТ на БЭМ, причем ряд авторов рекомендует для этой цели двухступенчатые АТ типа ДСТ. В 2019 году появилось сообщение об установке АТ на спортивный автомобиль Porsche Taycan, который должен был стать первым БЭМ с двухступенчатой АТ.

Быстро возрастающее количество публикаций по данной тематике — свидетельство значительного роста как числа производителей БЭМ с АТ, так и объемов их исследований. Большинство из них содержит результаты теоретических исследований функционирования двухступенчатых АТ в составе БЭМ, организации процесса переключений ступеней, принципов адаптивного и оптимального управления переключениями без разрыва потока мощности, управления синхронизаторами в ДСТ, влияния кинематической схемы, характеристик гидросистемы. Таким образом, видно, что за последние год–полтора основное внимание в них все больше обращается на проблемы управления АТ в переходных процессах,

что соответствует начальному этапу освоения их массового производства.

Организация и динамика переключений ступеней ДСТ в составе интегрированных силовых установок БЭМ принципиально отличаются от переключений в ГСУ с ДВС. Причина — в особенностях типовых характеристик крутящего момента МГ.

ДСТ и АМГ с двумя механическими ступенями существенно улучшают экономичность и скоростные качества БЭМ по сравнению с одноступенчатыми редукторами. Однако, в отличие от последних, им присущ общий недостаток ступенчатых АТ. Это рывки и удары при переключении ступеней, которые в частности ухудшают комфортабельность. Борьба с ними в силовых установках БЭМ имеет свои особенности.

Оценка свойств такой динамической системы в частотной области с помощью логарифмических амплитудно-частотных характеристик на трех фазах процесса переключения ступеней ДСТ показала, что, в отличие от ГЭМ с обычными АТ, в фазе инерции возможно резкое повышение ее собственной частоты. Это может привести к проблемам в области динамики, а также к шуму, вибрациям и рывкам в случае неоптимальной настройки элементов управления (например, фрикционных) и их системы управления.

Приведен пример блок-схемы feedforward–feedback системы управления МГ с дополнительным блоком формирования задаваемого закона регулирования скорости МГ в фазе инерции переключения вверх в варианте интегрированной силовой установки ГЭМ с двухступенчатой АМГ. Он имеет вид зависимости отношения значений изменяющихся передаточных чисел второй и первой ступеней от текущего момента времени фазы. Таким образом, здесь реализовано скоординированное управление МГ и фрикционом в переходном процессе переключения ступеней двухступенчатой АМГ.

Сложность совместного управления МГ и ДСТ ГЭМ обусловлена тем, что для обеспечения высокого качества процессов переключения ступеней необходимо одновременно управлять источником мощности и актюаторами фрикционных. С этой целью предложена новая стратегия управления ДСТ в ГЭМ параллельной архитектуры, основанная на обратных связях по состоянию скоростей и крутящих моментов.

Появление БЭМ в массовом производстве — результат развития электропривода в составе ГЭМ. В ходе многолетней массовой эксплуатации последних методология согласованного управления МГ и ДСТ в интегрированных гибридных силовых установках была доведена до совершенства. Целесообразность использования этого опыта при создании интегрированных систем управления силовых установок БЭМ очевидна.

Список литературы

1. Красневский, Л.Г. Состояние и перспективы развития автоматических трансмиссий мобильных машин / Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2012. — Вып. 1. — С. 115–121.
2. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: анализ и перспективы применения на гибридных и батарейных электромобилях. Часть 1 / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 2(51). — С. 16–29.
3. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: анализ и перспективы применения на гибридных и батарейных электромобилях. 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>.
4. Красневский, Л.Г. О технических требованиях к мехатронным системам управления автоматическими трансмиссиями батарейных электромобилей / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко, А.В. Белевич // Механика машин, механизмов и материалов. — 2023. — № 3(64). — С. 5–16. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-5-16>.
5. Автомобиль с комбинированной энергоустановкой: пат. ВУ 7500 U / Л.Г. Красневский, П.Л. Мариев, В.И. Адашкевич, А.В. Белевич. — Опубл. 30.08.2011.
6. Красневский, Л.Г. Управление силовыми установками батарейных электромобилей с автоматическими трансмиссиями / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко, А.В. Белевич // Механика машин, механизмов и материалов. — 2022. — № 1(58). — С. 13–23. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-13-23>.
7. 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.
8. A concept dual-motor powertrain for battery electric vehicles: Principle, modeling and mode-shift / Y. Tian [et al.] // Mechanism and Machine Theory. — 2023. — Vol. 185. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105330>.
9. Liang, Y. Multi-objective optimization of gear ratios in two-speed dual clutch transmissions for electric vehicles / Y. Liang, H. Du // Transportation Research Procedia. — 2023. — Vol. 70. — Pp. 146–153. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.013>.
10. Coordinated control strategy for braking and shifting for electric vehicle with two-speed automatic transmission / Y. Liu [et al.] // eTransportation. — 2022. — Vol. 13. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100188>.
11. Optimal coordinating gearshift control of a two-speed transmission for battery electric vehicles / Y. Tian [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2020. — Vol. 136. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106521>.
12. Performance comparison of pure electric vehicles with two-speed transmission and adaptive gear shifting strategy design / H. Bolin [et al.] // Energies. — 2023. — Vol. 16, iss. 7. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073007>.
13. Liu, T. MPC-based coordinated control of gear shifting process for a power-split hybrid electric bus with a clutchless AMT / T. Liu, X. Zeng, D. Song // Chinese Journal of Mechanical Engineering. — 2022. — Vol. 35. — DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00816-y>.
14. Supervisor control strategy of synchronizer for wet DCT based on online estimation of clutch drag torque / T. Lu [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2016. — Vols. 66–67. — Pp. 840–861. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.05.02>.
15. Zhang, W. Influence of a new type of two-speed planetary gear automatic transmission on the performance of battery electric vehicles / W. Zhang, J. Yang, W. Zhang // Energies. — 2022. — Vol. 15, iss. 11. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en15114162>.
16. Study on oil pressure characteristics and trajectory tracking control in shift process of wet-clutch for electric vehicles / J. Li [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. — 2016. — Vol. 2016. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4869891>.
17. Analysis and simulation of the gearshift methodology for a novel two-speed transmission system for electric powertrains with a central motor / A. Sornioiti [et al.] // Proc. IMechE Part D: J Automobile Engineering. — 2012. — Vol. 226, iss. 7. — DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407011431415>.
18. Heath, R.P.G. Zeroshift. A seamless automated manual transmission (AMT) with no torque interrupt / R.P.G. Heath, A.J. Child // SAE International. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1307>.
19. Two-speed DCT electric powertrain shifting control and rig testing / B. Zhu [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2013. — Vol. 2013. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/323917>.
20. 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>.
21. A speed control for the reduction of the shift shocks in electric vehicles with a two-speed AMT / Y.-K. Kim [et al.] // Journal of Power Electronics. — 2016. — Vol. 16, iss. 4. — Pp. 1355–1366. — DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/JPE.2016.16.4.1355>.
22. Beaudoin, M.-A. Fundamental limitations to no-jerk gearshifts of multi-speed transmission architectures in electric vehicles / M.-A. Beaudoin, B. Boulet // Mechanism and Machine Theory. — 2021. — Vol. 160. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104290>.
23. Kim, S. Cooperative control of drive motor and clutch for gear shift of hybrid electric vehicles with dual-clutch transmission / S. Kim, S.B. Choi // IEEE/ASME Transactions on Mechatronic. — 2020. — Vol. 25, iss. 3. — Pp. 1578–1588. — DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2980120>.
24. Robinette, D.L. Electric motor and transmission integration for light-duty electric vehicles: A 2023 benchmarking perspective and component sizing for a fleet approach / D.L. Robinette // Vehicles. — 2023. — Vol. 5, iss. 3. — Pp. 1167–1195. — DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles5030065>.

KRASNEVSKIY Leonid G., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof. Chief Researcher of the R&D Center “Electromechanical and Hybrid Power Units of Mobile Machines”
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

DYNAMICS OF GEAR SHIFTING PROCESSES OF DUAL-CLUTCH AUTOMATIC TRANSMISSIONS IN INTEGRATED POWERTRAINS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES

In connection with the beginning transition of mass-produced battery electric vehicle (BEV) powertrains from single-gear gearboxes to specially configured automatic transmissions (AT), the number of publications devoted to justification and research of their architecture, as well as optimization of applied design solutions, is rapidly increasing. A large number of publications focus on dual-clutch AT (i. e. DCT) with two clutches (or frictions) in the first stage application. A clear recent trend in their subject matter is a shift of interest in DCT control, especially in transient automatic gear shifting with joint control of the motor-generator (MG) and frictions in an integrated powertrain. It is shown that smoothness of shifting here is of no less importance than in classical AT, not only because of shift shocks, which deteriorate comfort, but also because of the possibility of excitation of oscillating modes in the electric drive. The paper analyzes several published variants of a strategy for controlling such shifting processes and their computer and physical implementation. We believe that, given the lack of Russian-language materials on this subject, this information is published for the first time.

Keywords: battery electric vehicles, integrated powertrains, automatic transmissions, dual-clutch transmissions

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-5-20>

References

- Krasnevskiy L.G. Sostoyanie i perspektivy razvitiya avtomaticheskikh transmissiy mobilnykh mashin [State and prospects of development of automatic transmissions of mobile machines]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2012, iss. 1, pp. 115–121 (in Russ.).
- 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.
- 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.).
- Krasnevskiy L.G., Poddubko S.N., Belevich A.V. O tekhnicheskikh trebovaniyakh k mekhatronnym sistemam upravleniya avtomaticheskimi transmissiyami batareynykh elektromobiley [On specifications for mechatronic control systems for automatic transmissions of battery electric vehicles]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2023, no. 3(64), pp. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-5-16> (in Russ.).
- Krasnevskiy L.G., Mariev P.L., Adashkevich V.I., Belevich A.V. *Avtomobil s kombinirovannoy energoustanovkoy* [Vehicle with combined power unit]. Patent BY, no. 7500 U, 2011 (in Russ.).
- Krasnevskiy L.G., Poddubko S.N., Belevich A.V. Upravlenie silovymi ustanovkami batareynykh elektromobiley s avtomaticheskimi transmissiyami [Control of power units of battery electric vehicles with automatic transmissions]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 1(58), pp. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-13-23> (in Russ.).
- Halvorson B. *Porsche Taycan electric car: 2-speed could be first of many in EVs*. 2019. Available at: https://www.greencarreports.com/news/1124924_porschetaycan-electric-car-2-speed-could-be-first-of-many-in-evs.
- Tian Y., Wang Z., Ji X., Ma L., Zhang L., Hong X., Zhang N. A concept dual-motor powertrain for battery electric vehicles: Principle, modeling and mode-shift. *Mechanism and machine theory*, 2023, vol. 185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105330>.
- Liang Y., Du H. Multi-objective optimization of gear ratios in two-speed dual clutch transmissions for electric vehicles. *Transportation research procedia*, 2023, vol. 70, pp. 146–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.013>.
- Liu Y., Gao D., Zhai K., Huang Q., Chen Z., Zhang Y. Coordinated control strategy for braking and shifting for electric vehicle with two-speed automatic transmission. *eTransportation*, 2022, vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100188>.
- Tian Y., Yang H., Mo W., Zhou S., Zhang N., Walker P.D. Optimal coordinating gearshift control of a two-speed transmission for battery electric vehicles. *Mechanical systems and signal processing*, 2020, vol. 136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106521>.
- Bolin H., Chen Y., Wei Q., Wang C., Wei C., Li X. Performance comparison of pure electric vehicles with two-speed transmission and adaptive gear shifting strategy design. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073007>.
- Liu T., Zeng X., Song D. MPC-based coordinated control of gear shifting process for a power-split hybrid electric bus with a clutchless AMT. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2022, vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00816-y>.
- Lu T., Li H., Zhang J., Hao H. Supervisor control strategy of synchronizer for wet DCT based on online estimation of clutch drag torque. *Mechanical systems and signal processing*, 2016, vols. 66–67, pp. 840–861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.05.02>.
- Zhang W., Yang J., Zhang W. Influence of a new type of two-speed planetary gear automatic transmission on the performance of battery electric vehicles. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15114162>.
- Li J., Wang Y., Chen J., He Z. Study on oil pressure characteristics and trajectory tracking control in shift process of wet-clutch for electric vehicles. *Mathematical problems in engineering*, 2016, vol. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4869891>.
- Sornioiti A., et al. Analysis and simulation of the gearshift methodology for a novel two-speed transmission system for electric powertrains with a central motor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 2012, vol. 226, iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407011431415>.
- Heath R.P.G., Child A.J. *Zeroshift. A seamless automated manual transmission (AMT) with no torque interrupt*. SAE Technical Paper, no. 2007-01-1307, 2007. DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1307>.

19. 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. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/323917>.
20. 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>.
21. Kim Y.-K., et al. A speed control for the reduction of the shift shocks in electric vehicles with a two-speed AMT. *Journal of power electronics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 1355–1366. DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/JPE.2016.16.4.1355>.
22. Beaudoin M.-A., Boulet B. Fundamental limitations to no-jerk gearshifts of multi-speed transmission architectures in electric vehicles. *Mechanism and machine theory*, 2021, vol. 160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104290>.
23. Kim S., Choi S.B. Cooperative control of drive motor and clutch for gear shift of hybrid electric vehicles with dual-clutch transmission. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2020, vol. 25, iss. 3, pp. 1578–1588. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2980120>.
24. Robinette D.L. Electric motor and transmission integration for light-duty electric vehicles: a 2023 benchmarking perspective and component sizing for a fleet approach. *Vehicles*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 1167–1195. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles5030065>.