

УДК 629.038

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, член-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.
главный научный сотрудник лаборатории бортовых мехатронных систем мобильных машин
E-mail: krasnevski_l@tut.by
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30.03.2021.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ. КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ ТЕХНОЛОГИИ «CLUTCH-TO-CLUTCH SHIFTS»: АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРЫ, ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА, РАЗВИТИЕ. ЧАСТЬ 1

Статья продолжает серию публикаций автора, в которых рассматриваются основные положения технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» (СТС) — технологии автоматического управления переключением ступеней автоматических трансмиссий (АТ), применяемой в мировом массовом производстве автомобилей, гибридных и батарейных электромобилей. Она обеспечивает высокое качество переключений, доведенное до уровня бесступенчатых передач. Развитие силовых установок в последние годы привело к быстрому увеличению числа ступеней АТ, которое сопровождается усложнением кинематических схем, конструкций, алгоритмов управления и в целом повышением роли мехатронных систем управления (МСУ) в обеспечении их высокого технического уровня. Эффективность технологии СТС зависит от совершенства используемых алгоритмов. Но их состав не оговорен, что при большом объеме информации затрудняет ориентацию в этом множестве для потенциальных пользователей. В данной работе предлагается (впервые в русскоязычном изложении) обобщенная структура комплекса типовых алгоритмов, необходимых для реализации данной технологии в МСУ АТ, которая разработана на основе их отбора из предварительно сформированной базы патентов и публикаций по теории и технике управления АТ, последующей классификации и группировки по признакам функционального назначения. По каждой позиции структуры даны примеры патентов с совпадающими названиями. Приведены детальные описания некоторых актуальных типовых алгоритмов СТС в МСУ АТ из патентов компании General Motors.

Ключевые слова: автоматическая трансмиссия, гидромеханическая передача, мехатронная система управления, мобильная техника, технология «Clutch-to-Clutch Shifts», алгоритмы управления технологии «Clutch-to-Clutch Shifts»

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-25-34>

Введение. Данная статья продолжает серию публикаций автора 2017–2020 гг., в которых рассматриваются основные положения технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» — технологии управления переключением ступеней автоматических трансмиссий, широко применяемой ведущими мировыми компаниями в массовом производстве автомобилей, гибридных и батарейных электромобилей.

В нашем понимании [1, 2] основы современной теории управления АТ могут быть представлены как единый мультидисциплинарный комплекс теории и техники управления (КТТУ) АТ, который состоит из шести взаимосвязанных базовых технологий. Технология СТС среди них является ключевой.

Переключение ступеней — один из самых сложных процессов управления, поскольку вместе с АТ в нем задействованы двигатель внутреннего сгорания (ДВС), электропривод (в электромоби-

лях), механические компоненты привода и масса движущегося автомобиля. В этом локальном процессе осуществляется принудительная управляемая синхронизация всех названных компонентов с учетом скорости автомобиля и воздействия внешней среды. При командном (ручном) управлении качество этого процесса зависит от уровня квалификации оператора. В силовых установках с раздельными системами управления АТ и ДВС все операции переключения (включая интеллектуальные решения, адаптацию к изменению внутренних и внешних параметров) выполняются мехатронной системой управления АТ. В силовых установках с интегрированными МСУ в процессах синхронизации вместе с фрикционными АТ принимает участие ДВС, а в электромобилях — еще электрические машины — мотор-генераторы (МГ).

Все это — операции технологии СТС. Ее задача — обеспечение плавного (без рывков и ударов, ощутимых для пассажиров) переключения без

разрыва потока мощности от ДВС (или тягового МГ) к ведущим колесам при поддержании заданного продольного ускорения автомобиля посредством согласованного управления участвующими в переключении фрикционами при минимизации их работы и мощности буксования. Основа технологии — алгоритмы управления всеми предусмотренными операциями.

Таким образом, данная технология (во взаимодействии с другими технологиями КТТУ АТ) оказывает непосредственное влияние на долговечность, безопасность и комфортабельность АТ, тягового привода и автомобиля в целом.

Краткая характеристика технологии СТС дана в [1]. Ее глобальные отличия от предшествующих технологий заключаются в следующем:

- переходный процесс переключения ступеней разделен на три фазы: *Fill Time* (подготовительная фаза — заполнение гидроцилиндра включаемого фрикциона с определением его длительности); *Torque Phase* (фаза крутящего момента); *Inertia Phase* (фаза инерции);
- основные типы процессов — переключения «вверх» и «вниз» под нагрузкой и без нагрузки;
- законы и алгоритмы управления изменяются в зависимости от типов, режимов и фаз процессов переключения;
- прецизионное управление — необходимое требование ко всем аппаратно-программным средствам МСУ (один из обязательных его элементов — точность идентификации момента окончания заполнения гидроцилиндра включаемого фрикциона, т. е. остановки его поршня).

Как показал анализ, началом формирования СТС можно считать появление в середине 60-х годов прошлого века бортовых электронных систем управления АТ вместо гидравлических, что позволило перейти к нелинейным законам управления моментом трения фрикционов вместо одиночных линейных. В современном виде она сформировалась к 1995–2000 гг. и продолжает непрерывно совершенствоваться. Более того, прогресс КТТУ (в том числе управления буксованием фрикционных пар) — одно из ключевых слагаемых развития АТ.

В упомянутой выше серии публикаций внимание уделялось основным положениям технологии СТС, ее компонентам, применению базовых алгоритмов (без детализации). Рассматривались алгоритмы с патентной защитой, закрепляющей дату их создания как объектов интеллектуальной собственности.

В контексте изложенного *цель данной статьи — анализ архитектуры, классификация, формирование обобщенной структуры комплекса алгоритмов, реализующих операции технологий СТС, с детальным рассмотрением некоторых актуальных типовых алгоритмов.*

О роли МСУ в развитии конструкций, массового производства и применения АТ. Элек-

тронные системы управления сыграли ключевую роль в развитии классических гидромеханических АТ, создании и внедрении в массовое производство следующих типов трансмиссий: автоматических механических (АМТ), с двумя сцеплениями (ДСТ), механических бесступенчатых клиноременных и сфероидальных (БСТ), а также целого класса гибридных электромеханических трансмиссий (ГЭМТ) для гибридных и батарейных электромобилей. Так, известна многолетняя история автоматизации обычных механических коробок передач с безуспешным созданием в прошлом веке разными компаниями образцов таких трансмиссий с электронными системами управления. Но современные АМТ достигли уровня качества и надежности, соответствующего требованиям массового производства и эксплуатации, лишь после 2000 г. А что касается ГЭМТ, то ручное управление ими невозможно в принципе.

Для реализации возможностей, предоставляемых современной бортовой электроникой и теорией управления, потребовались прецизионные мехатронные исполнительные устройства как интерфейс между электроникой и механизмами АТ. На этом фоне обострилась и проблема точности оценки действующих крутящих моментов в переходных процессах. В результате сложность и стоимость программно-алгоритмического обеспечения МСУ АТ существенно возросли.

Этому способствовало быстрое увеличение числа ступеней АТ как легковых, так и грузовых автомобилей в последние годы. Оно также вызывает рост сложности контроллера, числа его входов и выходов, сенсоров, алгоритмов, программного обеспечения, что приводит к ускоренному росту объемов памяти МСУ.

Так, по данным компании *ZF Friedrichshafen AG (ZF)* [3, 4] (рисунок 1), ее 8-ступенчатая АТ имела объем постоянной памяти 2 Мб, а 9-ступенчатая — уже 3,5 Мб.

В той же публикации представлена информация о последовательном снижении расхода топлива и выбросов CO_2 *одинадцатью поколениями АТ ZF*, начиная с 3-, 4-ступенчатых до новой генерации 8-ступенчатых, которая предельно ясно иллюстрирует эффект увеличения числа ступеней. Как видно на диаграмме (рисунок 2), полный гибридный этой генерации по сравнению с 8-ступенчатой АТ предыдущей (третьей) генерации снижает расход топлива на 13 %, а электромеханическая (батарейная) АТ по сравнению с этим гибридом — на 70 % (в пересчете на топливо).

Высказывалось мнение, что быстрый рост электрификации транспорта приведет к сокращению производства АТ вместе с ДВС. Однако анализ показал, что АТ также необходимы гибридным и батарейным электромобилям. По опубликованным данным, суммарный годовой объем мировых продаж электромобилей за пятилетку

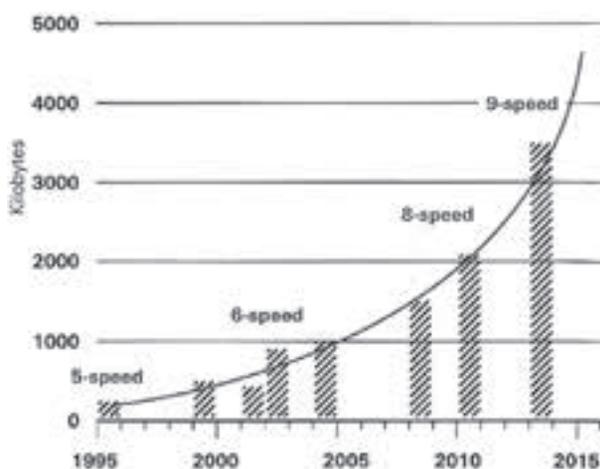


Рисунок 1 — Рост объема памяти МСУ с увеличением числа ступеней АТ по данным компании ZF Friedrichshafen AG [3]
 Figure 1 — Increase in the MCS storage capacity with a growth in the number of AT stages according to ZF Friedrichshafen AG data [3]

с 2013 по 2017 г. вырос почти в 8 раз (в том числе батарейных — почти в 4 раза), достигнув почти 3 млн. Планы ведущих компаний до 2030 г. и на дальнейшую перспективу свидетельствуют о стремлении к ускорению электрификации автомобильной техники. Полагают, что при росте по намечившейся траектории количество электромобилей (гибридов и батарейных) к 2050 г. достигнет миллиарда и тогда выбросы CO₂ снизятся до уровня 2005 г. [5]. АТ для грузовых электромобилей — в разработке, а применение на легковых уже началось.

Новейшая стадия увеличения числа ступеней — союз двух гигантских компаний-конкурентов — General Motors и Ford — по совместному созданию 10-ступенчатой АТ, которая была представлена в 2017 г. [6–8].

Их сотрудничество началось еще в 2013 г., когда они серийно выпускали 6-ступенчатые АТ. Ford разрабатывал 10-ступенчатый вариант АТ 10R80

для задне- и полноприводных машин, а General Motors — свою АТ Hydra-Matic 10L90.

В ходе разработки они получили лицензию компании ZF Friedrichshafen AG на некоторые элементы фрикционной системы ее 10-ступенчатой АТ TRW, входящей в защищенную рядом патентов технологию фрикционных устройств (там же отмечается, что Toyota и Honda также планировали представить свои новые 10-ступенчатые АТ в 2018 г., причем компания Aisin предоставила Toyota свою новую 10-ступенчатую).

Программа совместных работ по 10-ступенчатой АТ базировалась на трех главных принципах:

1. Оборудование должно быть максимально унифицировано, а программное обеспечение сохранено раздельным.

2. Недопущение производства сторонами отдельных частей.

3. Приглашение квалифицированных сотрудников сторон для совместного определения принадлежности и разрешения возникающих проблем.

В качестве обоснования указано следующее. Конструкторы хорошо знают, что отказы — это нормальное явление при доводке трансмиссий. Поэтому унификация позволяет ускорить поиск и устранение проблем, что дает экономию. *Совершенно иная ситуация с программным обеспечением электроники. Применяемые сторонами алгоритмы программного обеспечения МСУ и калибровок АТ совершенно разные. Помня об установленных снаружи АТ электронных модулях, которые ежесекундно выдают миллионы инструкций, каждая из сторон хотела бы использовать собственное отработанное программное обеспечение, чтобы состыковать новую АТ с ДВС, уже адаптированными к его автомобилям (функционирование, управление, сервис).*

10-ступенчатые АТ начали устанавливать в конце 2017 г. на автомобилях Ford F-150 Raptor

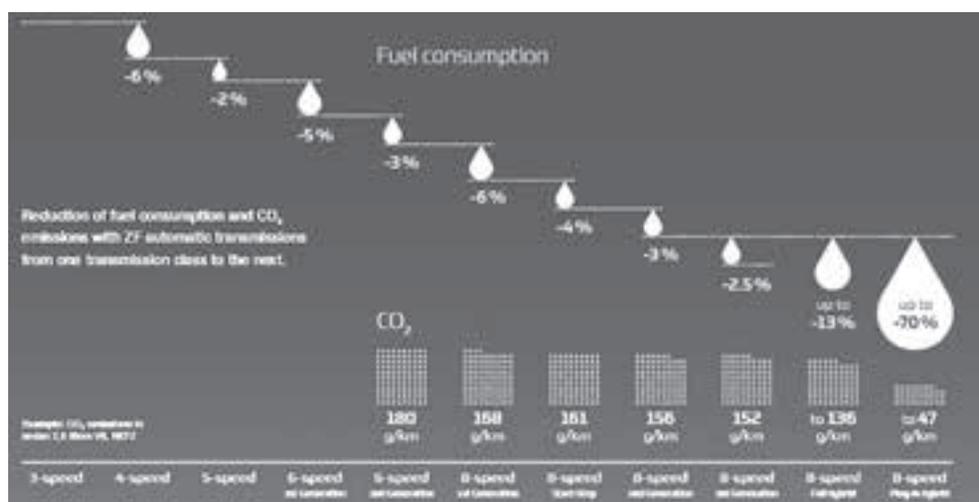


Рисунок 2 — Снижение расхода топлива и выбросов CO₂ поколений АТ ZF от 3-, 4-ступенчатых до новой генерации 8-ступенчатых [3]
 Figure 2 — Reduction of fuel consumption and CO₂ emissions of the AT generations of ZF from 3-, 4-speed to the new generation of 8-speed ones[3]

и F-150 (с двигателем EcoBoost V6 мощностью 350 л. с.) и General Motors на автомобиле Chevy Camaro ZL1 (с двигателем 6.2L LT4 мощностью 650 л. с.). Обе компании сообщали, что они будут также устанавливаться и на другие модели с 2018 г., в том числе на коммунальные, аварийные, мини-автотобусы, автомобили с жилым кузовом и др.

Конструкция данной АТ содержит ряд инноваций, часть из которых отмечена надписями на рисунке 3 (среди них впервые отмеченное «управление по проводам», которое является одной из технологий, входящих в состав упоминавшегося мультидисциплинарного комплекса КТТУ АТ).

На рисунках 4 и 5 показаны два ее инновационных компонента — блок трех фрикционов и интегрированный механизм «прямого действия» [6], которые позволили значительно улучшить качество переключений ступеней по сравнению с предшествовавшими АТ.

На графиках рисунка 6 дано сравнение использования мощности ДВС автомобилями Ford F-150 с 6-ступенчатой и новой 10-ступенчатой АТ. Ford, благодаря сохранению своего исполнения программного обеспечения МСУ, с учетом своего опыта несколько уменьшил временные интервалы между ступенями 10-ступенчатой АТ для улучшения динамики при разгоне и буксировке прицепа. При этом использование мощности (особенно на низших ступенях) возросло, хотя скорость ДВС понизилась по сравнению с 6-ступенчатой АТ во всем рабочем диапазоне.

Компания ZF Friedrichshafen AG создала новую генерацию 8-ступенчатых АТ (ГЭМТ) для гибридных силовых установок, производство которых планируется с 2022 г. [3, 4]. Первая из них, показанная на рисунке 7, изначально проектировалась как гибридная. АТ выполнена по революционной модульной технологии, на которую ZF перешла с 2009 г. Специально для батарейных электромобилей в нее интегрирован модуль МГ. Она позволяет получать модификации для средних, полных и подзаряжаемых гибридов в диапазоне мощностей 24–160 кВт. При этой мощности, напряжении 300 В и крутящем моменте специально разработанного МГ 450 Н·м можно трогаться с места без участия ДВС. При этом обмотка стато-

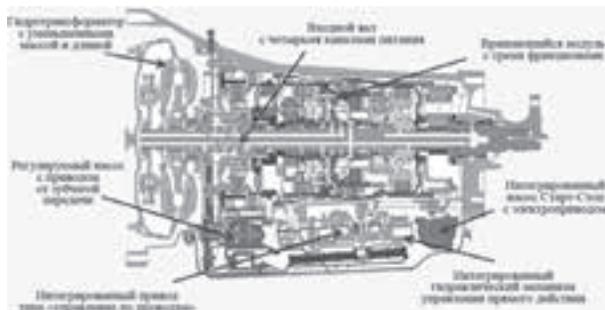


Рисунок 3 — АТ General Motors–Ford 10-ступенчатая [6]
Figure 3 — General Motors–Ford 10-speed AT [6]



Рисунок 4 — Блок трех фрикционов, расположенных посередине АТ по рисунку 3 [6]
Figure 4 — Block of three frictions located in the middle of the AT according to Figure 3 [6]

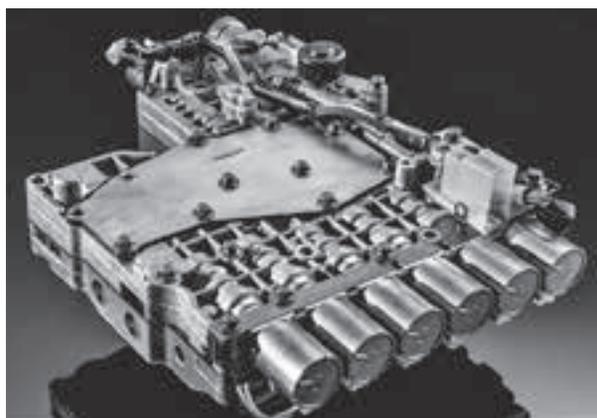


Рисунок 5 — Интегрированный гидравлический механизм управления прямым действием АТ по рисунку 3 [6]
Figure 5 — Integrated hydraulic direct-acting AT control mechanism according to Figure 3 [6]

ра МГ в виде сварных медных стержней (*hairpin technique*) вместо проволочной позволила повысить плотность мощности без увеличения габаритов. Электроника также интегрирована в картер АТ в тех же габаритах.

По оценке компании, к 2030 г. по крайней мере 70 % всех новых автомобилей еще будут иметь ДВС. И это — возможность применения подзаряжаемых гибридов, которые могут в течение рабочего дня пользоваться только электроприводом, что снижает загрязнение воздуха в городах.

По многочисленным сообщениям прессы, в 2019 г. она уже заключила крупнейший в своей истории контракт с компанией BMW на 10 млрд евро по их поставке [3, 4].

Также из данной генерации на рисунке 8 показана *электрогидромеханическая* модификация ГЭМТ для тяжелых условий эксплуатации на

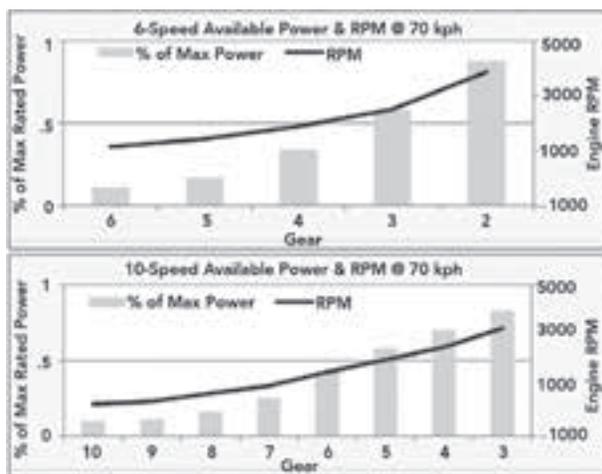


Рисунок 6 — Сравнение доли использования мощности ДВС автомобилей на ступенях 6-ступенчатой и 10-ступенчатой АТ General Motors и Ford [6]

Figure 6 — Share comparison of the use of internal combustion engine power of vehicles on the stages of 6-speed and 10-speed AT of General Motors and Ford [6]

мощность 100 кВт, содержащая модули МГ и гидротрансформатора [4].

Об архитектуре многуровневого комплекса типовых алгоритмов МСУ АТ. Архитектура МСУ АТ как объекта управления. Безопасность, комфортабельность, экономичность современных автомобилей во многом определяется совершенством алгоритмов управления, реализуемых мехатронными системами их АТ.

Яркий пример роли алгоритмов управления мехатронными объектами, получивший мировую известность, — катастрофы в 2019 г. двух новых (после модернизации) самолетов Boeing 737 MAX в Эфиопии и Индонезии. В процессе модернизации в программное обеспечение пилотажной системы управления была включена дополнительная функция — автоматически (независимо от пилота) уменьшать угол тангажа самолета, если он превышает контрольную величину. Но данную информацию не внесли в инструкцию по эксплуатации

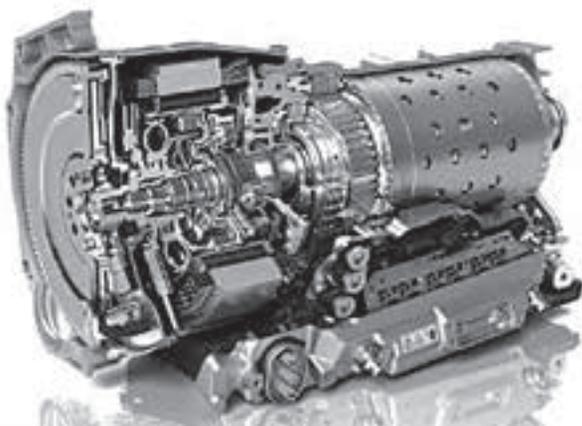


Рисунок 7 — Гибридная электромеханическая трансмиссия новой генерации компании ZF [3]

Figure 7 — ZF's new generation hybrid electromechanical transmission [3]

и в программы подготовки пилотов. В результате действие системы управления в полете могло восприниматься как неисправность, с которой экипаж начинал бороться. Что в конечном итоге привело к крушению самолетов, остановке эксплуатации таких машин во всем мире [9, 10].

Архитектура комплекса алгоритмов МСУ АТ, в том числе алгоритмов СТС, определяется многуровневой структурой АТ как объекта управления. Обобщенно (для основных типов АТ) в нее входит ряд модулей (подсистем и устройств), имеющих свои собственные (локальные) системы управления. Основные модули первого уровня — гидротрансформатор, коробка передач, тормоз-замедлитель, гидросистема, МСУ, компоненты электропривода (в варианте с ГЭМТ). Далее может быть развернут состав модулей первого уровня, что образует второй уровень, и так далее.

Рассмотрим в качестве примера архитектуру программно-алгоритмического комплекса МСУ многорежимной ГЭМТ из патента [11]: «Метод и устройство для определения предпочтительного выходного крутящего момента гибридной силовой установки при работе на фиксированном режиме и ступени с ограничениями крутящего момента фрикциона». Правообладатели: General Motors, Daimler, Chrysler, BMW. Список аналогов, представленный в патенте, содержит более 200 наименований. Судя по реквизитам, большинство из них принадлежат заявителям. Это пакет патентов на алгоритмы управления, входящие в состав ее МСУ.

Кинематическая схема данной многорежимной ГЭМТ показана на рисунке 9, а порядок включения режимов — в таблице 1. ГЭМТ имеет три планетарных ряда и четыре фрикциона C1...C4. Включая их в различных комбинациях, можно получить два сложных режима M1, M2 и четыре механические ступени G1...G4. На режимах M1, M2 ДВС может быть включен или отключен. При работающем ДВС и электроприводе в обоих случаях получают гибридный режим, но с разными передаточными числами. При отключении ДВС имеет место режим чистого электропривода. На режимах G ДВС работает, а электропривод отключен, т. е. ГЭМТ превращается в механическую 4-ступенчатую АТ.



Рисунок 8 — Гибридная электрогидромеханическая АТ компании ZF на мощность 100 кВт [4]

Figure 8 — ZF's hybrid electrohydraulic mechanical AT with a power of 100 kW [4]

Схема гидросистемы управления этой ГЭМТ [12] показана на рисунке 10. По принципам построения и компонентам она аналогична известным гидросистемам AT General Motors — Allison.

Таким образом, ГЭМТ по рисунку 9 содержит почти все перечисленные выше модули обобщенной многоуровневой архитектуры AT (кроме гидротрансформатора и гидрозамедлителя), что позволяет рассматривать эту архитектуру как *типовую*. Она представлена на рисунке 11.

Совместное функционирование перечисленных модулей обеспечивает *модуль 5 — система управления верхнего уровня (supervisory control and coordination)* — на основе обработки поступающих сигналов от оператора и остальных модулей. Они, в свою очередь, также имеют многоуровневую структуру.

Подробное описание архитектуры алгоритмов верхнего уровня модуля 5 в [11] показано на ряде блок-схем. Первая из них (здесь не приведена) начинается с последовательности блоков (алгоритмов) с названиями «Стратегическое управление» (Strategic control), «Выполнение переключения ступеней и старт/стоп ДВС» (Shift Execution and Engine Start/Stop), «Тактиче-

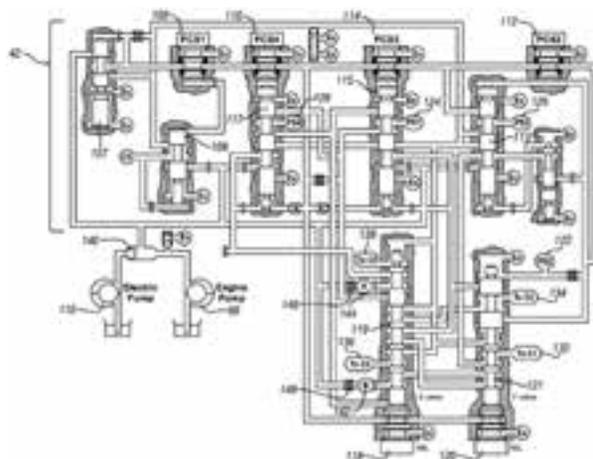


Рисунок 10 — Схема гидросистемы ГЭМТ по рисунку 9 [12]
Figure 10 — Scheme of the HEMT hydraulic system according to Figure 9 [12]

ское управление и работа» (Tactical Control and Operation) и т. д.

Архитектура и содержание алгоритмов других модулей по рисунку 9 раскрывается в ряде патентов упомянутого выше пакета (в которых, в частности, многократно повторяются кинематическая схема и архитектура ГЭМТ по рисункам 9 и 11).

Как следует из изложенного, при переходе к конкретной AT ее архитектура может отличаться от описанной типовой составом модулей в зависимости от особенностей конструкции. Так, при отсутствии электропривода вместо него появятся модули гидротрансформатора, тормоза-замедлителя и т. д. При этом может отпасть потребность в модуле 5 системы управления верхнего уровня. Но его функции (в измененном виде) перейдут к модулю 17 управления трансмиссией как аналогу *многоуровневого модуля обобщенной МСУ AT*. Тогда получим известную архитектуру МСУ массовых гидромеханических AT, в состав которой входят алгоритмы технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» в виде отдельного (также многоуровневого) модуля.

Полагая, что приведенная выше информация дает достаточное представление о среде и про-

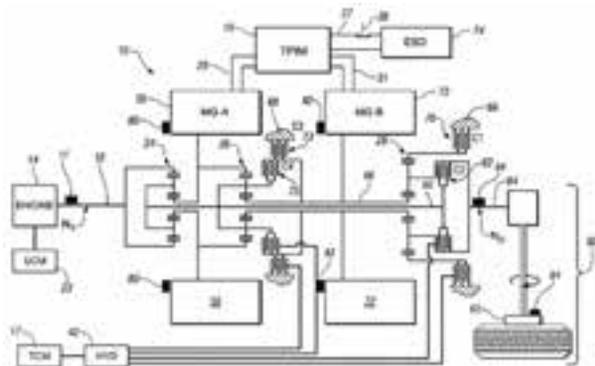


Рисунок 9 — Кинематическая схема многорежимной гибридной электромеханической трансмиссии (ГЭМТ) [11]
Figure 9 — Kinematic scheme of a multi-mode hybrid electromechanical transmission (HEMT) [11]

Таблица 1 — Порядок включения режимов ГЭМТ [11]
Table 1 — Procedure for enabling the HEMT modes [11]

Описание	Состояние ДВС	Состояние рабочего режима трансмиссии	Включенные фрикционы	
M1_Eng_Off	OFF	EVT Mode 1	C1 70	
M1_Eng_On	ON	EVT Mode 1	C1 70	
G1	ON	Fixed Gear Ratio 1	C1 70	C4 75
G2	ON	Fixed Gear Ratio 2	C1 70	C2 62
M2_Eng_Off	OFF	EVT Mode 2	C2 62	
M2_Eng_On	ON	EVT Mode 2	C2 62	
G3	ON	Fixed Gear Ratio 3	C2 62	C4 75
G4	ON	Fixed Gear Ratio 4	C2 62	C3 73

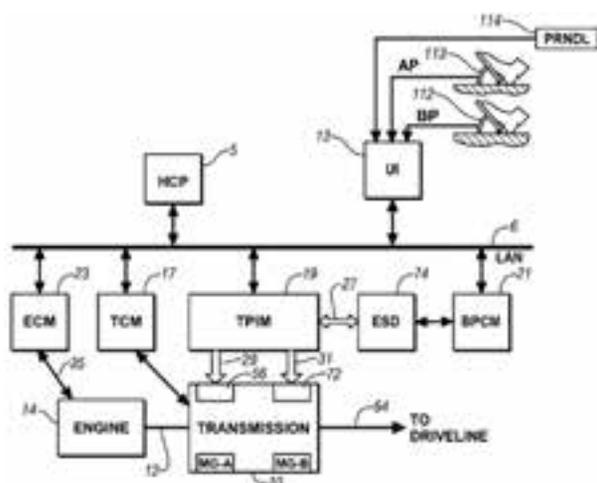


Рисунок 11 — Блок-схема модульной многоуровневой распределенной архитектуры многорежимной ГЭМТ по рисунку 9 [11]: 114 PRNDL — селектор трансмиссии; 113 AP — педаль акселератора; 112 BP — педаль тормоза; 5 HCP — модуль системы управления верхнего уровня (координации модулей 23, 17, 21, 19); 13 UI — интерфейс пользователя; 6 LAN — шлюз линии связи LAN; 23 ECM — модуль управления ДВС; 17 TCM — модуль управления трансмиссией; 19 TPIM — силовой модуль инверторов трансмиссии; 74 ESD — устройство накопления энергии; 21 BPCM — модуль управления батареей; 14 ENGINE — ДВС; 10 TRANSMISSION — трансмиссия (в ней обозначены инверторы 56, 72, а также мотор-генераторы MG-A, MG-B); 64 TO DRIVELINE — выходной вал трансмиссии (к приводу)

Figure 11 — Block diagram of a modular multi-level distributed architecture of a multi-mode HEMT according to Figure 9 [11]: 114 PRNDL — transmission selector; 113 AP — accelerator pedal; 112 BP — brake pedal; 5 HCP — upper level control system module (coordination of modules 23, 17, 21, 19); 13 UI — user interface; 6 LAN — LAN communication line gateway; 23 ECM — internal combustion engine control module; 17 TCM — transmission control module; 19 TPIM — transmission power inverter module; 74 ESD — energy storage device; 21 BPCM — battery pack control module; 14 ENGINE — internal combustion engine; 10 TRANSMISSION — transmission (in it inverters 56, 72, as well as motor-generators MG-A, MG-B are indicated); 64 TO DRIVELINE — transmission output shaft (to the drive)

цессах, в которых функционирует эта технология, далее ограничимся рассмотрением структуры модуля алгоритмов СТС.

Структура многоуровневого модуля алгоритмов технологии СТС. Отбор алгоритмов, включаемых в состав данного модуля, выполнен на основе анализа большого объема информации из предварительно сформированной базы данных о конструкциях АТ, их МСУ и алгоритмах управления, запатентованных ведущими мировыми производителями (General Motors, Allison, Ford, Chrysler, Mercedes-Benz, ZF Friedrichshafen AG, Toyota, Komatsu, Caterpillar, Eaton и др.).

Далее алгоритмы в полученной выборке сгруппированы по признакам функционального назначения в *тематические группы* (без математически строгого перечисления). Это позволило выявить и сформировать из полученных групп укрупненную структуру модуля алгоритмов управления, реализующих технологию СТС. На ее основе можно построить блок-схему многоуров-

невой архитектуры модуля СТС-алгоритмов по аналогии с рисунком 11.

Однако далее ограничимся расшифровкой только первого уровня его компонентов, чтобы затем перейти к рассмотрению содержания алгоритмов конкретных МСУ АТ по наиболее важным группам.

Некоторые пояснения. 1. Предлагаемая структура, хотя и не является исчерпывающей, позволяет представить те алгоритмы верхнего уровня, которые можно рассматривать как *базовые* или *типовые* в пределах своих тематических групп (модулей).

Единственное исключение составляет включенный в структуру *модуль алгоритмов диагностики, прогнозирования и мониторинга технического состояния (PNH), остаточного ресурса АТ.*

За последние годы в мировом автомобилестроении состоялся переход к интегрированным силовым установкам с объединенной МСУ ДВС и АТ, в которых ДВС участвует в регулировании скоростей компонентов АТ наряду с фрикционными. *В ГЭМТ электромобилей аналогичные функции вместо ДВС выполняют электрические машины.* Соответствующие алгоритмы управления ввиду необходимости большого объема дополнительного описания здесь не рассматриваются.

2. Сложилась четкая методология создания алгоритмов технологии СТС современных АТ. Она предусматривает их комплексное исследование, отработку и оптимизацию с помощью компьютерного моделирования динамики переходных процессов переключений АТ на основе математических моделей, их расчетной и натурной оценки и оптимизации. Применение математической модели *указывается в названиях ряда патентов*, а в их описаниях приводятся и сами модели [13].

Математическая модель архитектуры по рисунку 11, как и в реальном переходном процессе, включает, кроме АТ, также ДВС и массу автомобиля. Алгоритмы, управляющие таким процессом, считаются *алгоритмами верхнего уровня (supervisory control)*, а задействованные только в некоторых его частях, — *локальными алгоритмами.*

Два этих важнейших модуля (группы) образуют первый уровень многоуровневого модуля МСУ АТ. Далее в статье рассматриваются только они.

3. Названия алгоритмов, используемые в описании предлагаемой структуры данных модулей, составлены с использованием названий ряда патентов. Каждое из них объединяет некоторое множество алгоритмов, решающих родственные задачи. Так, многие из них в процессе непрерывного совершенствования стали *адаптивными*, используют *методы самообучения* и др. Таким образом, каждое название обозначает многоуровневый *комплекс алгоритмов*, который *будем называть группой*, чтобы отличать его от комплекса (модуля) верхнего уровня.

4. Множество алгоритмов управления порождается совокупностью конструктивных особенно-

стей объектов управления (АТ и МСУ), решаемых задач и т. д. Так, множество кинематических схем механической части АТ — коробок передач — порождается комбинациями тройки их кинематических параметров — количества ступеней, элементов управления и степеней свободы. Число их сочетаний велико и может оцениваться с помощью методов комбинаторики (подробнее в [14], глава 2 «Основы структурной теории управления многоступенчатыми передачами»). Здесь важно, что число степеней свободы определяет число элементов управления, необходимых для включения каждой ступени АТ: оно на единицу меньше числа степеней. В двухступенных АТ для включения ступени нужно включить один элемент, в трехступенных — два и т. д.

Классическая технология «Clutch-to-Clutch Shifts» была разработана для переключений дословно «от фрикциона к фрикциону», т. е. с одним включаемым и одним выключаемым. При большем числе степеней свободы она применима лишь при условии, что комбинации фрикционов соседних ступеней отличаются только одним из них. Такие переключения известны как *single transition*

shift (по-русски — *однопарные*), что имеет место в двухступенных, а также, при указанных условиях, трехступенных схемах, которые и применяются в большинстве массовых АТ.

Однако эта технология не работает при увеличении числа фрикционов, участвующих в переключении, до четырех, т. е. пары включаемых и пары выключаемых (при четырех степенях свободы). Здесь сложности автоматического управления порой затрудняют применение в АТ многоступенных кинематических схем. Для четырехступенных АТ применяют специальные алгоритмы — «переключения с двумя переходами» (*Double Transition Shifts — DTS*).

С учетом изложенного получена представленная в таблице 2 структура комплексов алгоритмов верхнего уровня и локальных алгоритмов. По каждому из них для примера дана ссылка на один-два патента с близким названием, соответствующим терминологии, установившейся в зарубежных публикациях.

Некоторые из актуальных типовых алгоритмов будут детально рассмотрены в составе конструкций МСУ АТ во второй части данной статьи.

Таблица 2 — Структура комплексов типовых алгоритмов управления технологии CTC
Table 2 — Structure of sets of generic control algorithms of the CTC technology

Обозначение на русском языке	Обозначение на английском языке	Источник
Алгоритмы верхнего уровня		
Переключения вниз под нагрузкой	Clutch-to-Clutch Power-on Downshifts	[13, 15]
Переключения вверх под нагрузкой	Clutch-to-Clutch Power-on Upshifts	[16, 18]
Переключения вниз без нагрузки	Clutch-to-Clutch Power-off Downshifts	[17]
Переключения между нейтралью, передним и задним ходом АТ	Automatic Transmission Garage Shifts	[19]
Переключения с двумя переходами	Double Transition Shifts, Double Swap Shifts	[20]
Переключения с пропусками ступеней	Skip Shifts	[21]
Калибровки АТ и ее систем	Calibration of AT	[22]
Обеспечение подвижности при обесточивании МСУ и др.	Limp Home, Drive Home Capability	[23]
Управление прерванными переключениями	Control of Interrupted Shifts	[24]
Локальные алгоритмы		
Замкнутая система управления моментом трения фрикционов при переключении ступеней АТ	Closed-loop Clutch Control During Transmission Shift	[25]
Управление электрогидравлическими клапанами при переключениях ступеней – широтно-импульсная модуляция, гистерезис, вибрация	Pulse-Width-Modulated Current Signal, Hysteresis, Dither-Modulation, Variable Bleed Solenoid	[26, 27]
Управление фрикционом блокировки гидротрансформатора АТ	Torque Converter Clutch Control	[28]
Управление регуляторами давления гидросистемы АТ	—	[29]
Управление заполнением включаемого фрикциона	Fill Time	[30, 31]
«Управление по проводам»	Fly-by-wire	[32]
Безопасность при отказах	—	[33]
Диагностика, мониторинг технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса АТ	Diagnostics, Prognostics and Health Management (PHM) of AT	[34]

Список литературы

1. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: технология «Clutch- to-Clutch Shifts» — история и современное состояние / Л.Г. Красневский, А.В. Белевич // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 1(42). — С. 5–13.
2. Поддубко, С.Н. Управление динамикой переходных процессов автомобильных силовых установок с автоматизированными приводами: современная теория и техника / С.Н. Поддубко, Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2015 — Вып. 6. — С. 66–75.
3. ZF introduces new generation 8-speed automatic transmission for hybrid drives [Electronic resource] // ZF. — Mode of access: <http://www.zf.com>.
4. Efficient and dynamic: Transmission Technology from ZF [Electronic resource] // ZF. — Mode of access: https://www.zf.com/master/media/en/corporate/m_zf_com/company/download_center/products/passenger_cars/getriebetechnologie.pdf.
5. IEA. Eight countries join IEA electric vehicle initiative [Electronic resource], 2010. — Mode of access: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
6. The Need For 10-Speeds [Electronic resource] / Bob Chabot. — Mode of access: <https://www.motor.com/magazine-summary/need-10-speeds>.
7. 11 Things You Need to Know about Ford & GM’s 10-Speed Transmission [Electronic resource] / Jason Cook // Autoinfluence. — Mode of access: <https://www.autoinfluence.com/11-things-you-need-to-know-about-ford-gms-10-speed-transmission/>.
8. Ford Transit Now Available with Efficient and Durable New 10-Speed Automatic Transmission [Electronic resource] // Ford Media Center. — Mode of access: <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/en/news/2020/06/04/ford-transit-now-available-with-efficient-and-durable-new-10-spe.html>.
9. В катастрофе Boeing 737 MAX в Эфиопии обвинили производителя [Электронный ресурс] // DW. — Режим доступа: <https://p.dw.com/p/3Z6tK>.
10. Boeing знал о проблемах в системе 737 MAX с 2017 года [Электронный ресурс] // DW. — Режим доступа: <https://www.dw.com/ru/boeing-знал-о-проблемах-в-системе-737-max-с-2017-года/a-48612750>.
11. Method and apparatus to determine a preferred output torque in mode and fixed gear operation with clutch torque constraints for a hybrid powertrain system: pat. US 8285462 B2 / A.H. Heap, T.-M. Hsien, B. Wu. — Publ. date: 09.10.2012.
12. Method for model based clutch control and torque estimation: pat. US 9140337 B2 / J.-J. F. Sah, B.R. Snyder, A.K. Naqvi. — Publ. date: 22.09.2015.
13. Model-based control of an automatic transmission power-on downshift: pat. US 6415213 B1 / G.A. Hubbard, J.K. Runde, A.H. Heap. — Publ. date: 02.07.2002.
14. Красневский, Л.Г. Управление гидромеханическими многоступенчатыми передачами мобильных машин / Л.Г. Красневский. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 256 с.
15. Method and apparatus for adaptive control of power-on downshifts in an automatic transmission: patent application publication US 2006/0089775 / M.D. Whitton, R.L. Williams. — Publ. date: 27.04.2006.
16. Clutch-to-clutch control in an automatic transmission: pat. US 5058460 / J.A. Hibner, C.A. Lentz. — Publ. date: 22.10.1991.
17. Adaptive clutch control of a closed-throttle downshift: pat. US 6308125 B1 / S.E. Gleason, J.K. Runde. — Publ. date: 23.10.2001.
18. Model-based on-coming clutch pressure control for an automatic transmission upshift: pat. US 6332860 / G.A. Hubbard, J.K. Runde. — Publ. date: 25.12.2001.
19. Methods and systems for drive-to-neutral and neutral-to-drive transmission garage shift quality improvement: pat. US 7789797 B2 / G. Chen, H.A. Dourra, M. Choucair. — Publ. date: 07.09.2010.
20. Electronic adaptive swap-shift control for an automatic transmission for automotive vehicles: pat. US 7115069 B2 / I. Soliman, B. Keyse, S. Cicala, K. Sovel, Ch. Suter, B. Riedle. — Publ. date: 03.10.2006.
21. Shift control system for automatic power transmission with feature of suppression of shift shock during 4-2 downshift: pat. US 5094130 / I. Hirose, K. Hayasaki, H. Okahara. — Publ. date: 10.03.1992.
22. Method of determining initial transmission calibration: pat. US 7069767 B2 / J.K. Runde, K.L. Kluemper, S.T. Kluemper. — Publ. date: 04.07.2006.
23. Fly-by-wire limp home and multi-plex system: pat. US RE42131 E / C.F. Long, P.F. McCauley, D.J. Weber, S.E. Mundy, J.E. Shultz. — Publ. date: 08.02.2011.
24. Method of controlling interrupted shifts for a powershift transmission: pat. US 5505100 / R.M. Mitchell, A.L. Stahl, J.R. Talbott. — Publ. date: 09.04.1996.
25. Closed-loop torque phase control for shifting automatic transmission gear ratios based on friction load sensing. pat. US 8255130 B2 / Y. Fujii, G.M. Pietron, S.-H. Lee, J.W.L. McCallum, M. Redissi, D. Popejoy, J. Butwin, R.O. Burkhart, D. Yanakiev. — Publ. date: 28.08.2012.
26. Mode selection and switching logic in a closed-loop pulse width modulation valve-based transmission control system: patent application publication US 2008/0082242 A1 / M.L. Dell’Eva, A. Surianarayanan, D.E. Herbert. — Publ. date: 02.10.2007.
27. Dynamic current compensation: pat. US 9671032 B2 / A.R. Castora, H. Najmolhoda, D.L. Seid. — Publ. date: 06.06.2017.
28. Torque converter hydraulic control system for an automatic transmission: pat. US 9341199 B2 / C.G. Benson, T.R. Berger. — Publ. date: 17.05.2016.
29. Adaptive pressure control for an automatic transmission: pat. US 5251509 / S.B. Pollack, J.L. Wanamaker. — Publ. date: 12.10.1993.
30. Method and apparatus for detecting touch point of clutch: pat. US 9494203 B2 / Min-hyo Kim. — Publ. date: 15.11.2016.
31. Hydraulic clutch and method for determining an adaptive clutch fill volume of the hydraulic clutch: pat. US 8843289 / M. Postic, M. Rambert, E. Dalais, E. Hoff, N. Wilke. — Publ. date: 23.09.2014.
32. Electronically controlled range valve for multi-speed planetary transmission: pat. US 8371988 B2 / C.F. Long, C.T. Taylor. — Publ. date: 12.02.2013.
33. Power train control sensor malfunction detection and control arrangement: pat. US 5033328 / Sh. Shimanaka. — Publ. date: 23.07.1991.
34. Apparatus and method for predicting the health of a power transmission: pat. US 8463482 / M.A. Rains, B.R. Caldwell. — Publ. date: 11.06.2013.

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
 E-mail: krasnevski_l@tut.by
 Joints Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 30 March 2021.

AUTOMATIC TRANSMISSIONS. COMPLEX OF ALGORITHMS OF “CLUTCH-TO-CLUTCH SHIFTS” TECHNOLOGY: ANALYSIS OF ARCHITECTURE, GENERALIZED STRUCTURE, DEVELOPMENT. PART 1

The article continues the series of the author publications, which considers the main provisions of the “Clutch-to-Clutch Shifts” (CTC) technology — technology for automatic controlling the switching

of automatic transmission (AT) stages, used in the global mass production of vehicles, hybrid and battery electric vehicles. It provides high-quality shifts, brought to the level of continuously variable transmissions. Development of power units in recent years has led to a rapid increase in the number of AT stages, which is accompanied by a complication of kinematic schemes, designs, control algorithms and, in general, an increase in the role of mechatronic control systems (MCS) in ensuring their high technical level. Effectiveness of the CTC technology depends on the perfection of the algorithms used. But their composition is not specified, which, with a large amount of information, makes it difficult for potential users to navigate in this set. In this paper, we propose (for the first time in the Russian language) the generalized structure of a set of standard algorithms necessary for the implementation of this technology in the AT MCS, which is developed on the basis of their selection from a pre-formed database of patents and publications on the theory and technology of AT control, following classification and grouping by functional purpose. For each item of the structure, there are links to patents with matching names. Detailed descriptions of several typical CTC algorithms in the AT MCS of General Motors patents are given.

Keywords: automatic transmission, hydromechanical transmission, mechatronic control system, mobile machinery, “Clutch-to-Clutch Shifts” technology, control algorithms of “Clutch-to-Clutch Shifts” technology

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-25-34>

Список литературы

- Krasnevskiy L.G., Belevich A.V. Avtomaticheskie transmissii: tekhnologiya “Clutch-to-Clutch Shifts” — istoriya i sovremennoe sostoyanie [Automatic transmissions: technology “Clutch-to-Clutch Shifts” — history and current status]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 1(42), pp. 5–13 (in Russ.).
- Poddubko S.N., Krasnevskiy L.G. Upravlenie dinamikoy perekhodnykh protsessov avtomobilnykh silovykh ustanovok s avtomatizirovannymi privodami: sovremennaya teoriya i tekhnika [Control of the dynamics of transient process in automotive power plants with automated drives: modern theory and technology]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2015, iss. 6, pp. 66–75 (in Russ.).
- ZF introduces new generation 8-speed automatic transmission for hybrid drives. Available at: <http://www.zf.com>.
- Efficient and dynamic: Transmission technology from ZF. Available at: https://www.zf.com/master/media/en/corporate/m_zf_com/company/download_center/products/passenger_cars/getriebetechnologie.pdf.
- IEA. Eight countries join IEA electric vehicle initiative. 2010. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- Chabot B. The need for 10-speeds. *MOTOR information systems*, 2017. Available at: <https://www.motor.com/magazine-summary/need-10-speeds>.
- Cook J. 11 things you need to know about Ford & GM’s 10-speed transmission. *Autoinfluence*, 2019. Available at: <https://www.autoinfluence.com/11-things-you-need-to-know-about-ford-gms-10-speed-transmission/>.
- Ford transit now available with efficient and durable new 10-speed automatic transmission. 2020. Available at: <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/en/news/2020/06/04/ford-transit-now-available-with-efficient-and-durable-new-10-spe.html>.
- Tikhomirova O. V katastrofe Boeing 737 MAX v Efiopii obvinili proizvoditelya [In the crash of the Boeing 737 MAX in Ethiopia, the manufacturer was blamed]. *DW*, 2020. Available at: <https://p.dw.com/p/3Z6tK> (in Russ.).
- Mylnikov P. Boeing znal o problemakh v sisteme 737 MAX s 2017 goda [Boeing has known about the problems in the 737 MAX system since 2017]. *DW*, 2019. Available at: <https://www.dw.com/ru/boeing-znal-o-problemakh-v-sisteme-737-max-c-2017-goda/a-48612750> (in Russ.).
- Heap A.H., Hsien T.-M., Wu B. *Method and apparatus to determine a preferred output torque in mode and fixed gear operation with clutch torque constraints for a hybrid powertrain system*. Patent USA, no. 8285462 B2, 2012.
- Sah J.-J.F., Snyder B.R., Naqvi A.K. *Method for model based clutch control and torque estimation*. Patent USA, no. 9140337 B2, 2015.
- Hubbard G.A., Runde J.K., Heap A.H. *Model-based control of an automatic transmission power-on downshift*. Patent USA, no. 6415213 B1, 2002.
- Krasnevskiy L.G. *Upravlenie gidromekhanicheskimi mnogostupenchatymi peredachami mobilnykh mashin* [Control of hydromechanical multi-stage transmissions of mobile machines]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990. 256 p. (in Russ.).
- Whitton M.D., Williams R.L. *Method and apparatus for adaptive control of power-on downshifts in an automatic transmission*. Patent application publication USA, no. 2006/0089775, 2006.
- Hibner J.A., Lentz C.A. *Clutch-to-clutch control in an automatic transmission*. Patent USA, no. 5058460, 1991.
- Gleason S.E., Runde J.K. *Adaptive clutch control of a closed-throttle downshift*. Patent USA, no. 6308125 B1, 2001.
- Hubbard G.A., Runde J.K. *Model-based on-coming clutch pressure control for an automatic transmission upshift*. Patent USA, no. 6332860, 2001.
- Chen G., Dourra H.A., Choucair M. *Methods and systems for drive-to-neutral and neutral-to-drive transmission garage shift quality improvement*. Patent USA, no. 7789797 B2, 2010.
- Soliman I., Keyse B., Cicala S., Sovel K., Suter Ch., Riedle. *Electronic adaptive swap-shift control for an automatic transmission for automotive vehicles*. Patent USA, no. 7115069 B2, 2006.
- Hirose I., Hayasaki K., Okahara H. *Shift control system for automatic power transmission with feature of suppression of shift shock during 4-2 downshift*. Patent USA, no. 5094130, 1992.
- Runde J.K., Kluemper K.L., Kluemper S.T. *Method of determining initial transmission calibration*. Patent USA, no. 7069767 B2, 2006.
- Long C.F., McCauley P.F., Weber D.J., Mundy S.E., Shultz J.E. *Fly-by-wire limp home and multi-plex system*. Patent USA, no. RE42131 E, 2011.
- Mitchell R.M., Stahl A.L., Talbott J.R. *Method of controlling interrupted shifts for a powershift transmission*. Patent USA, no. 5505100, 1996.
- Fujii Y., Pietron G.M., Lee S.-H., McCallum J.W.L., Redissi M., Popejoy D., Butwin J., Burkhart R.O., Yanakiev D. *Closed-loop torque phase control for shifting automatic transmission gear ratios based on friction load sensing*. Patent USA, no. 8255130 B2, 2012.
- Dell’Eva M.L., Surianarayanan A., Herbert D.E. *Mode selection and switching logic in a closed-loop pulse width modulation valve-based transmission control system*. Patent application publication USA, no. 2008/0082242 A1, 2007.
- Castora A.R., Najmolhoda H., Seid D.L. *Dynamic current compensation*. Patent USA, no. 9671032 B2, 2017.
- Benson C.G., Berger T.R. *Torque converter hydraulic control system for an automatic transmission*. Patent USA, no. 9341199 B2, 05.2016.
- Pollack S.B., Wanamaker J.L. *Adaptive pressure control for an automatic transmission*. Patent USA, no. 5251509, 1993.
- Kim M.-H. *Method and apparatus for detecting touch point of clutch*. Patent USA, no. 9494203 B2, 2016.
- Postic M., Rambert M., Dalais E., Hoff E., Wilke N. *Hydraulic clutch and method for determining an adaptive clutch fill volume of the hydraulic clutch*. Patent USA, no. 8843289, 2014.
- Long C.F., Taylor C.T. *Electronically controlled range valve for multi-speed planetary transmission*. Patent USA, no. 8371988 B2, 2013.
- Shimanaka Sh. *Power train control sensor malfunction detection and control arrangement*. Patent USA, no. 503328, 1991.
- Rains M.A., Caldwell B.R. *Apparatus and method for predicting the health of a power transmission*. Patent USA, no. 8463482, 2013.