



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 2

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/10.46864/1995-0470-2021-3-56-13-24>

Анализ типовых алгоритмов технологии СТС. Регуляторы давления с самодиагностикой [1]. Подробное рассмотрение алгоритмов начнем с устройств, обеспечивающих интерфейс между электронным контроллером и механическими (электрогидромеханическими) исполнительными механизмами МСУ АТ. Это однокаскадные и двухкаскадные электрогидравлические клапаны (ЭГК) — одни из важнейших элементов МСУ, так как их технические параметры (точность,

быстродействие, надежность и др.) ограничивают «сверху» функциональные возможности контроллера МСУ.

С другой стороны, ЭГК — одни из самых массовых и в то же время наиболее уязвимых элементов, случайные отказы которых могут создать высокую опасность для АТ и самого транспортного средства вплоть до смертельных ДТП, особенно если в АТ применяется технология «управление по проводам» (Fly-by-Wire).

Поскольку комплект ЭГК за время жизни АТ совершает огромное суммарное количество срабатываний, предъявляются высочайшие требования к наработке на отказ одиночного ЭГК. А если учесть, что каждый производитель фактически несет ответственность (по крайней мере, в отношении смертельных случаев) за безопасность эксплуатации парка выпущенных им АТ, использующихся по всему миру, количество срабатываний ЭГК в таком множестве возрастает до космических величин, а с ним — и требования к надежности. Подтверждением служат частые отзывы из эксплуатации для доработки сотен тысяч и даже миллионов машин. Понятно, почему каждая из ведущих мировых автомобильных компаний на протяжении десятков лет (совместно со специализированными компаниями-производителями ЭГК) совершенствует эти устройства.

В качестве первого примера здесь выбрано модернизированное устройство двухкаскадного ЭГК компании General Motors (рисунок 1) из патента [1]. Оно содержит оригинальные и эффективные технические решения, которые могут быть оценены профессионалами.

Механизм управления 10 содержит пилотный ЭГК 12, регулятор давления 14 с золотником 42 и диагностический переключатель 16. Полость 64 регулятора 14 соединена с фрикционом 18, а полость 60 — с диагностическим переключателем 16. Выход ЭГК 12 соединен с входным каналом 28 регулятора и с его торцовой управляющей полостью 54. Главное давление подается в канал 30 регулятора. Давление обратной связи подается от фрикциона 18 через дроссель 68 в пружинную полость 55 регулятора. Остальные его каналы с обозначением EX соединены со сливом. Электрический выход 24 переключателя 16 соединен с электронным блоком управления 20, а выход 22 последнего — с ЭГК 12. На рисунке также показан аккумулятор 19, напорная полость которого сообщается с торцовой полостью 54 регулятора. На рисунке 1 механизм показан в выключенном положении.

Аккумулятор предназначен для гашения колебаний выходного давления ЭГК, когда он работает в режиме ШИМ (широтно-импульсной модуляции — *pulse-width-modulation*), и при отсутствии необходимости может не устанавливаться.

Очень важно достоверно и без больших затрат диагностировать включение и выключение фрикционов, чтобы верифицировать процесс и регистрировать случайное включение/выключение. Это можно обеспечить как косвенно, анализируя крутящие моменты на входном и выходном валах, так и напрямую, установив датчики давления на всех фрикционах. Оба варианта возможны, только когда процесс переключения уже начался. Но этого совершенно недостаточно, если срабатывание ЭГК — случайное. Теоретически можно измерять

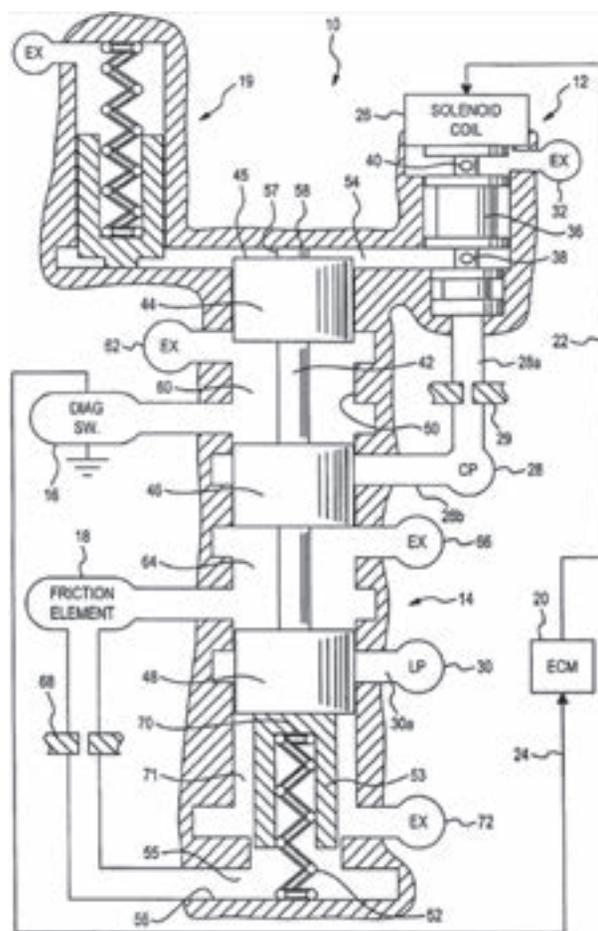


Рисунок 1 — Двухкаскадный механизм управления с самодиагностикой [1]

Figure 1 — Two-stage control mechanism with self-diagnostics [1]

пилотное давление или положение золотника регулятора, но это дорого и подвержено возмущениям из-за рабочих осцилляций золотника. Поэтому необходимо бюджетное устройство контроля давления во фрикционе, которое обеспечило бы достоверный диагностический сигнал в самом начале процесса управления.

В данном изобретении диагностический переключатель (*Diagnostic Switch*) 16 не предназначен для прецизионного определения какой-то заданной величины давления. Он подвергается воздействию либо очень низкого остаточного давления в гидроцилиндре выключенного фрикциона, либо, при его включении, — пилотного давления от ЭГК и должен только отличать одно от другого. Поэтому его сигнал не подвержен задержкам времени срабатывания, вызываемыми, например, гидравликой.

В итоге механизм обеспечивает своевременную и надежную диагностическую информацию о начале и прекращении подачи жидкости к фрикциону. При этом сам диагностический переключатель значительно проще, надежнее и дешевле других возможных решений. Фактически он работает как обычное реле, заменяя высокоточные датчики давления.

Рассмотрим алгоритм самодиагностики на примере показанного на рисунке 2 графика переключения пары фрикционов, каждый из которых имеет такой механизм управления.

На графике рисунка 2 а показано изменение давлений в выключаемом (левая кривая) и включаемом (правая кривая) фрикционах на этапах $t_0 \dots t_4$. По команде электронного блока 20 на переключение в точке t_0 регулятор выключаемого фрикциона понижает в нем давление до величины P_i в точке t_1 (но его переключатель остается включенным — см. рисунок 2 б). В этот момент регулятор включаемого фрикциона начинает подавать жидкость, и давление начинает повышаться одновременно в нем и в его переключателе, который мгновенно срабатывает под действием этого давления и подает диагностический сигнал о начале заполнения (см. рисунок 2 с). В момент t_2 заканчивается заполнение и начинается повышение давления во включаемом фрикционе, а в выключаемом оно понижается до небольшой остаточной величины. При ее достижении в точке t_3 переключатель выключаемого фрикциона выключается, что также является диагностическим сигналом. В момент t_4 давление во включаемом достигает максимальной величины. Но его переключатель остается включенным, что сигнализирует о нормальном состоянии механизмов.

Совершенно иначе механизм работает при случайном включении входящего в него ЭГК 12. Как показано на графиках рисунка 3, в этом случае от ЭГК давление в точке t_0 поступает (как и в прежнем случае) к регулятору и через него одновременно к фрикциону и к переключателю. Во фрикционе оно *неуправляемо* возрастает в точке t_1 до величины давления питания LP (Linear Pressure,

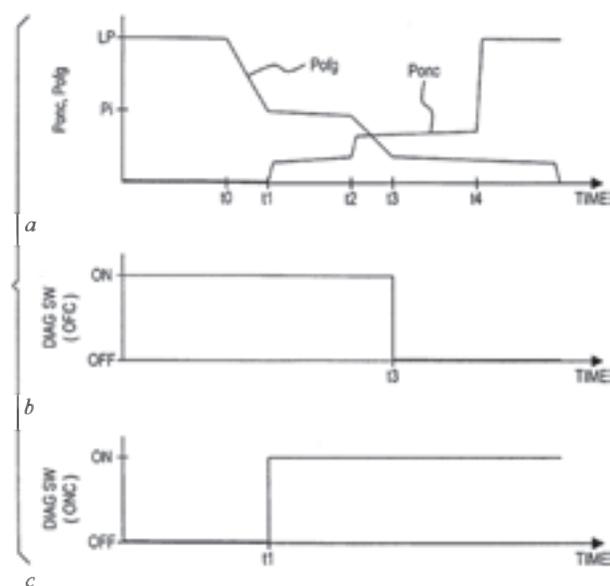


Рисунок 2 — Алгоритм самодиагностики на примере графика переключения пары фрикционов с механизмами по рисунку 1 [1]
Figure 2 — Self-diagnostics algorithm on the example of the switching graph of a friction pair with mechanisms according to Figure 1 [1]

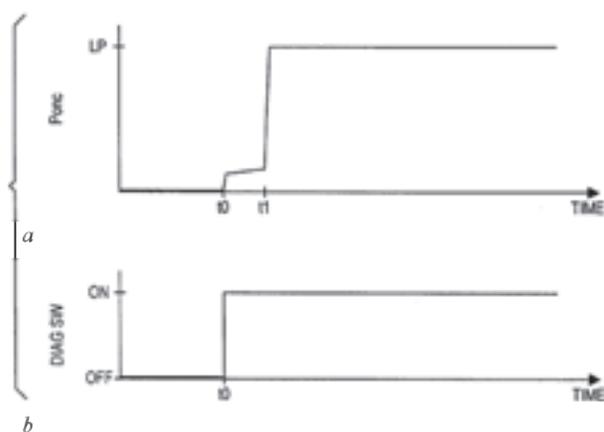


Рисунок 3 — Алгоритм самодиагностики на примере графика случайного включения ЭГК механизма по рисунку 1
Figure 3 — Self-diagnostics algorithm on the example of the random activation graph of the electrohydraulic valve mechanism according to Figure 1

см. рисунок 3 а). Но переключатель мгновенно срабатывает в точке t_0 и подает диагностический сигнал (см. рисунок 3 б). Этот сигнал поступает к электронному блоку 20, у которого ввиду длительности периода заполнения буксования и полного включения фрикциона есть некоторое время для принятия возможных мер по предотвращению аварийной ситуации — обесточиванию ЭГК 12.

Компания Allison Engine Company — крупнейший в мире производитель АТ для всех видов массовой тяжелой колесной и гусеничной техники, в том числе для армии США. Ее МСУ АТ имеют оригинальную архитектуру, которая последовательно совершенствуется на протяжении более полувека. Одна из ее особенностей — унифицированные двухкаскадные регуляторы давления для прецизионного управления фрикционами в рамках технологии СТС. К ним относится и описанная выше конструкция такого регулятора, которая содержит новые решения, существенно повышающие его надежность.

Управление фрикционами с замкнутой обратной связью при автоматическом переключении ступеней трансмиссии. В [2] представлен один из первых патентов компании General Motors, посвященный реализации технологии СТС с применением управления моментами трения фрикционов с замкнутой обратной связью (ЗОС) по скорости их буксования в процессе автоматического переключения ступеней АТ.

Изобретение направлено на улучшение управления переключениями с ЗОС, при котором давления жидкости в гидроцилиндрах фрикционов регулируются так, чтобы ускорять/замедлять входной и выходной валы АТ в ходе процесса переключения. Такое управление требует динамической информации о крутящих моментах на входном и выходном валах. Но здесь используется только оценка их воздействия, так что в процессе управления измеряются только скорости этих

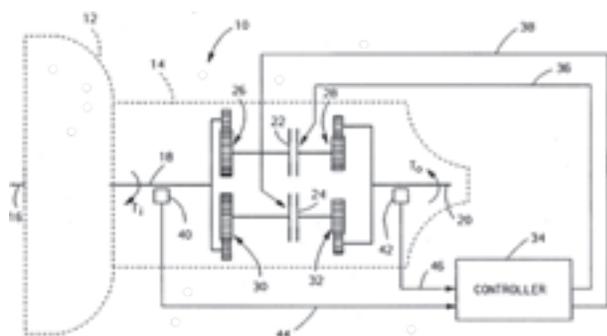


Рисунок 4 — Расчетная схема АТ для процесса СТС-переключения ступеней парой фрикционов с ЗОС [2]
Figure 4 — AT design scheme for the CTC process of switching of stages by the friction pair with closed-loop feedback [2]

валов. Оценки формируются с учетом различий между предполагавшимися и измеренными скоростями этих валов так, чтобы компенсировать ошибки управления крутящими моментами фрикционов, а также ошибки их оценок. На рисунках 4 и 5 приведены расчетные схемы АТ и первых двух блок-схем многоуровневого модуля алгоритмов управления с ЗОС, применяемых в данной АТ по технологии СТС.

Как видно из схем, для реализации алгоритмов необходимо проектное и онлайн компьютерное моделирование динамики переходного процесса переключения. В тексте [2] изложена методика построения алгоритмов с ЗОС на примере упрощенной (с одной парой фрикционов) расчетной схемой АТ по рисунку 4. Там же приведена математическая модель (содержащая 21 пронумерованную формулу), которая основана на системе уравнений баланса активных и инерционных крутящих моментов на входном и выходном валах, моментов трения фрикционов с привязкой к алгоритмам управления. Содержание команд компьютера дано на рисунке 5. Всего в этих алгоритмах 88 блоков.

СТС-алгоритмы управления переключениями вниз под нагрузкой 6-ступенчатой 3-ступенной гидромеханической АТ, улучшенные по сравнению с аналогами [3]. На рисунке 6 показаны блок-схемы алгоритмов согласованного управления выключаемым (off-going) и включаемым (on-coming) фрикционами. Управление их согласованным буксованием с применением динамической модели обеспечивает такое изменение входного крутящего момента *по заданной расчетной траектории*, чтобы в конце переключения входная скорость приблизилась к синхронной величине, соответствующей новому передаточному числу. При приближении к этой точке крутящий момент включаемого фрикциона повышается с темпом, выбираемым с помощью динамической модели. В блоках схемы под их названиями указаны в скобках номера приведенных в тексте патента формул, используемых при вычислениях, соответствующих алгоритму каждого блока.

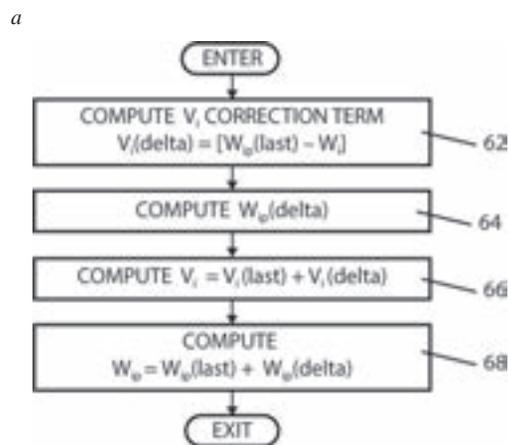
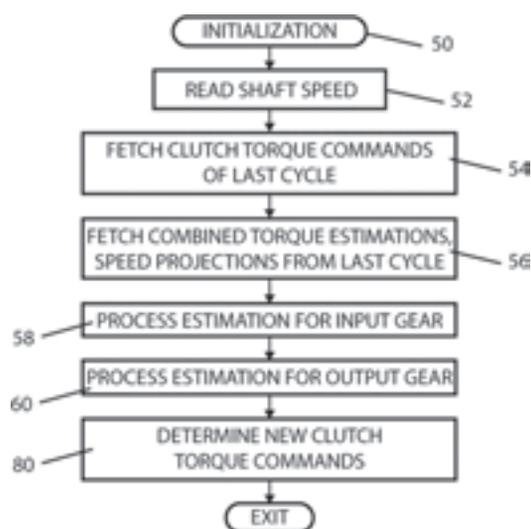


Рисунок 5 — Первые две блок-схемы инструкций компьютерной программы, выполняемой контроллером 34 (см. рисунок 4), реализующей алгоритмы управления с ЗОС [2]:
a: 50 — инициализация; 52 — прочитать скорости валов; 54 — выбрать команды по моментам из прошлого цикла; 56 — выбрать комбинированные оценки крутящих моментов, прогнозные значения скоростей из прошлого цикла; 58 — выполнение оценки для входной передачи; 60 — выполнение оценки для выходной передачи; 80 — определить новые команды по крутящим моментам фрикционов; выход; b: вход; 62 — вычислить коррекцию величины V_i , величину V_i по формуле; 64 — провести вычисления по формуле; 66 — провести вычисления по формуле; 68 — провести вычисления по формуле; выход
Figure 5 — The first two block diagrams of the instructions of the computer program executed by the controller 34 (see Figure 4), which implements the control algorithms with the closed-loop feedback [2]

Как показано на рисунке 7, в момент t_0 давление в выключаемом фрикционе понижается по прямой линии с углом наклона $RR1$ (Ramp Rate), а затем в момент t_2 понижается на величину DP , так что в этот момент начинает управляемо буксовать выключаемый фрикцион. До момента t_3 идет заполнение включаемого при давлении P_{fill} , а в момент t_4 он начинает буксовать до момента t_5 , в который входная скорость достигает синхронного для новой ступени значения. В этот момент давление выключаемого фрикциона понижается с уклоном $RR2$ до нуля. Давление во включаемом фрикционе скачком повышается до максимума. Значения давлений в обозначенных точках вычис-

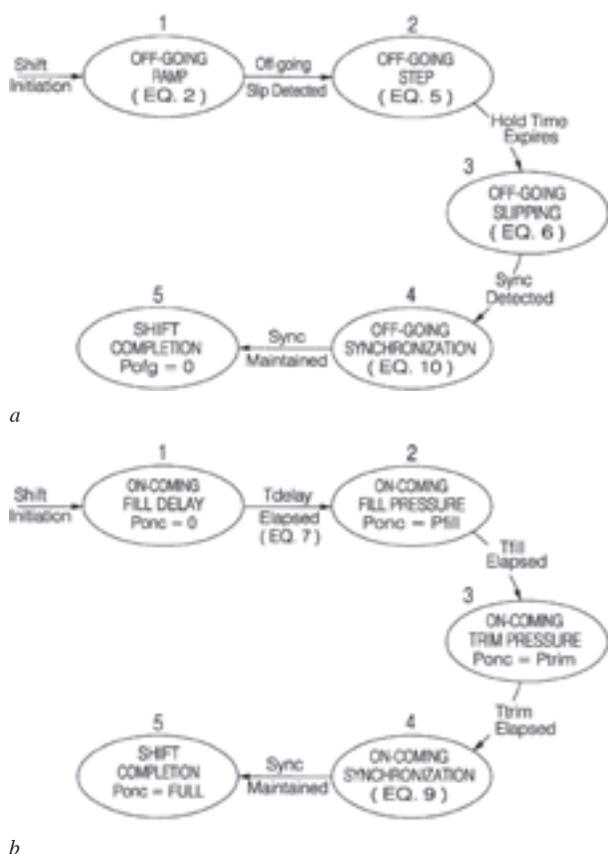


Рисунок 6 — Алгоритмы управления выключаемым (а) и включаемым (б) фрикциями АТ при однопарном CTC-переключении вниз под нагрузкой [3]
 Figure 6 — Algorithms for controlling the off-going (a) and on-coming (b) AT frictions with a single-pair CTC downshift under load [3]

ляются по формулам, номера которых приведены на рисунке 6.

Среди преимуществ данных алгоритмов отмечено более точное следование расчетным траекториям изменения параметров, повышение комфортности переключения, а также уменьшение числа параметров, требующих предварительной калибровки. Добавим, что давлением управляют ЭГК.

Система и метод переключений с двойными переходами трансмиссии, имеющей переходящий фрикцион с противоположными направлениями текущего и будущего буксования и крутящего момента [4]. Переключение с одной ступени на другую чаще всего вызывает изменение состояния двух фрикционов. Один из них включается (on-coming), а другой — выключается (off-going). Данное изобретение относится к классу переключений, осуществляющих две группы изменений состояния фрикционов. Обычно их называют переключениями с двойным переходом. Если они не скоординированы должным образом, *передаточное число АТ в начальный период может измениться в непредусмотренном направлении или степени*, что приводит к деградации качества переключения.

Перейдем к рассмотрению алгоритмов управления переключениями с двойными переходами на примере 11-ступенчатой 4-степенной планетарной АТ [4] (рисунок 8), схема которой подобна новой АТ, созданной совместно компаниями General Motors и Ford для легковых автомобилей.

В [4] рассматривается метод переключения ступеней для АТ с четырьмя степенями свободы, у которых на каждой ступени включено по два фрикциона, причем как минимум у одной пары смежных ступеней в комбинациях все четыре включенных фрикциона — разные. Поэтому при переключении с одной ступени на соседнюю необходимо выключить два и включить два других, т. е. в переключении участвуют все четыре фрикциона одновременно. Здесь применяют метод «переключения с двумя переходами» — Double Transition Shifts (DTS).

В АТ по рисунку 8 такие переключения имеют место при переходе с 5-й на 6-ю ступень и обрат-

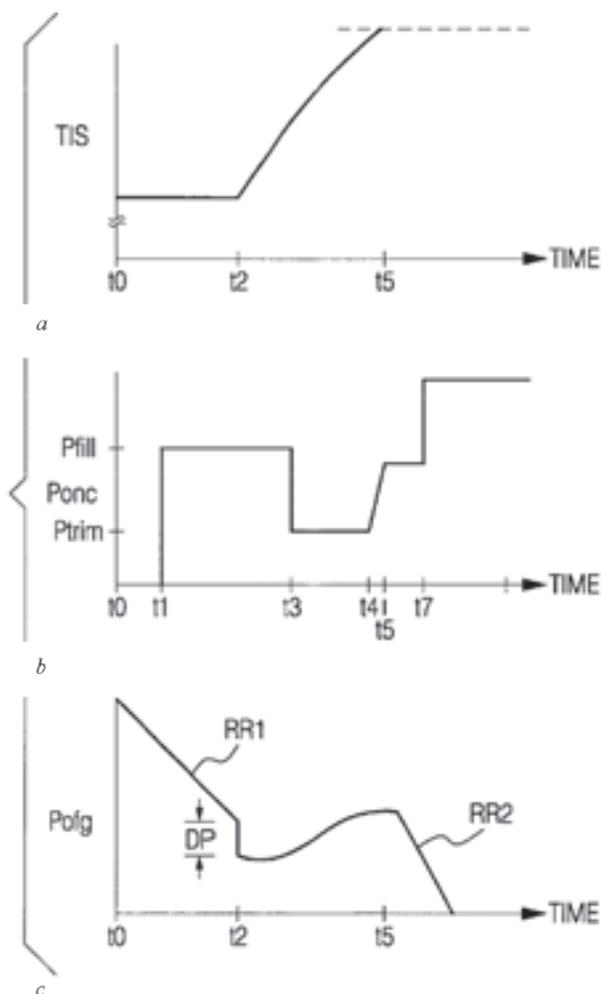


Рисунок 7 — Графики процесса переключения вниз под нагрузкой в соответствии с последовательностью алгоритмов по рисунку 6: а — входная скорость АТ; б — давление во включаемом фрикционе; с — давление в выключаемом фрикционе [3]
 Figure 7 — Graphs of the downshift process under load in accordance with the sequence of algorithms in Figure 6: а — AT input speed; б — pressure in the on-coming friction; с — the pressure in the off-going friction [3]

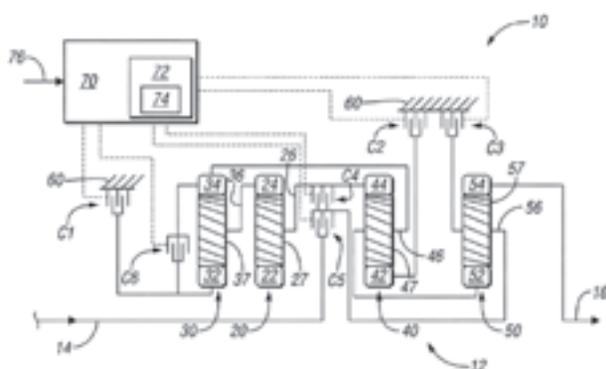


Рисунок 8 — Кинематическая схема 11-ступенчатой АТ для легковых автомобилей General Motors [4]
Figure 8 — Kinematic scheme of the 11-speed AT for General Motors passenger cars [4]

но. Они показаны стрелками в таблице 1, в которой включаемые на каждой ступени фрикционы обозначены буквой X, а DTS-переключения показаны стрелками.

Для применения предлагаемого метода необходимо, чтобы во время такого переключения буксовал хотя бы один фрикцион. Но есть ограничение: если на текущей ступени направление буксования одного из переключаемых фрикционов по отношению к вращению входного вала противоположно направлению, в котором он будет передавать крутящий момент на включаемой ступени, или, наоборот, направление момента на текущей ступени противоположно направлению буксования на включаемой, то в инерционной фазе процесса этот фрикцион не сможет создать реактивный крутящий момент во время переключения. Хотя допускается создание необходимого выходного момента и входного ускорения в этой фазе.

На примере переключения с 5-й на 6-ю ступень (рисунок 9) в [4] приведен расчет крутящих моментов согласно методу DTS. Здесь оси ординат 101, 103 соответствуют крутящим моментам на входном валу 14 и выходном 16, а ось 105 —

передаточному числу между ними. Линия 100 — давление в выключаемом фрикционе C2; 102 — во включаемом C5; 104 — во втором выключаемом C6; 106 — во втором включаемом C1; 110 и 112 — входной и выходной крутящие моменты; 118 — изменение передаточного числа АТ.

Линиями T1...T4 обозначены границы между фазами процесса. От начала координат до T1 АТ находится на 5-й ступени, от T1 до T2 проходит контролируемую фазу крутящего момента с «заполнением провала» крутящего момента, от T2 до T3 — комбинированную фазу инерции и буксования, от T3 до T4 — заключительный этап повышения давления до номинала, после которого АТ находится на 6-й ступени.

Особенности данного метода легко выявляются при сравнении с аналогичными графиками переходных процессов по технологии СТС. Здесь ограничимся его визуализацией, приведенной на рисунке 9, поскольку дальнейшее детальное описание алгоритмов в оригинале содержит ряд блок-схем, графиков, математических формул и текстовых пояснений.

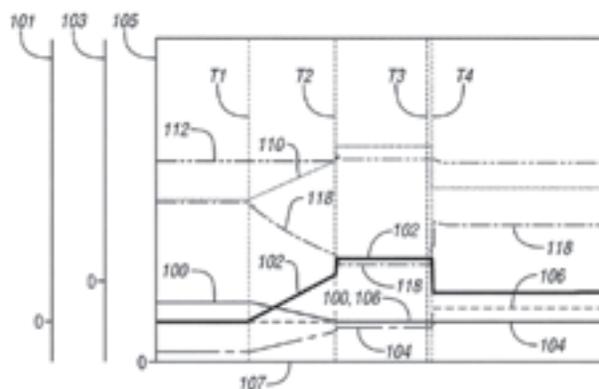


Рисунок 9 — График изменения крутящих моментов компонентов и передаточного отношения АТ во время DTS-переключения с 5-й на 6-ю ступень [4]
Figure 9 — Graph of changes in the torques of the components and the AT gear ratio during the double transition shifts (DTS) from the 5th to the 6th speed [4]

Таблица 1 — Порядок включения ступеней АТ по рисунку 8 [4]
Table 1 — Switching sequence of the AT steps according to Figure 8 [4]

Gear State	Gear Ratio	Ratio Step	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Rev	-4.409	—	—	X	X	—	—	X
Neutral	—	-0.94	X	X	X	—	—	—
1st	4.710	—	—	—	X	X	—	X
2nd	3.317	1.42	X	—	X	X	—	—
3rd	2.306	1.44	X	—	—	X	—	X
4th	1.964	1.17	X	X	—	X	—	—
5th	1.493	1.32	—	X	—	X	—	X
6th	1.296	1.15	X	—	—	X	X	—
7th	1.000	1.30	—	—	—	X	X	X
8th	0.867	1.15	—	X	—	X	X	—
9th	0.759	1.14	—	X	—	—	X	X
10th	0.729	1.04	X	X	—	—	X	—
11th	0.648	1.13	X	—	—	—	X	X

Данный метод обеспечивает и более сложные DTS-переключения с пропуском ступеней (*skip-shifts*) под нагрузкой — *Skip-at-sync control of sequenced power-on downshifts*, а также простые однопарные и режим переключений между нейтралью, передним и задним ходом (режим *Garage Shifts*).

Применение DTS на данном режиме поясняется на примере кинематической схемы планетарной 6-ступенчатой АТ, порядок включения фрикционов которой приведен в таблице 2. F1 специально введен в кинематическую схему АТ для облегчения маневрирования на данном режиме за счет возможности движения накатом без выключения первой ступени.

Метод СТС-переключения автоматической трансмиссии вниз со сброшенным газом [5]. В таком процессе скорость буксования включаемого фрикциона снижается до нуля, следуя вычисленному контроллером профилю, путем использования алгоритмов с замкнутой обратной связью для управления давлением. МСУ также ведет мониторинг положения педали газа, и если подача топлива возобновится во время начавшегося переключения (когда в выключаемом фрикционе еще есть рабочее давление), *система перейдет к программе переключения «вниз» под нагрузкой.*

В каждой фазе процесса управления устанавливаются давления, градиенты давлений, времена или другие величины (“set”, “preset”, “given”, “certain” и др.) из числа *калиброванных значений* для конкретных условий работы АТ, положения педали и типа переключения (1–2, 2–3 и т. д.), помещенных в таблицы в памяти МСУ. Для гидротрансформатора и его фрикциона блокировки также могут потребоваться свои группы калиброванных величин.

В [5] приведены подробные блок-схемы алгоритмов и их описание, а также графики переходных процессов, которые представлены на рисунке 10.

На рисунке 10 а показаны профили изменения давлений во включаемом и выключаемом фрикционах. При подаче команды на переключение

давление во включаемом (верхний график) повышается до максимума на период его заполнения (FILL TIME). В это время давление в выключаемом (нижний график) ступенчато понижается до значений Pint, Ploff и до нуля. После этого во включаемом давление вновь повышается до начальной величины Pic1 для управления с замкнутой обратной связью. Затем оно линейно повышается до момента, в который (см. рисунок 10 б) начался разгон турбины гидротрансформатора (на нижнем графике — PULL UP), а значит, начал буксовать выключаемый фрикцион (на верхнем графике — SLIP DETECTED). В этот момент автоматически *запускается процесс управления буксованием включаемого с ЗОС по расчетному профилю.* Оно начинается при определенной (расчетной) скорости турбины, которая несколько больше ее скорости при исходном передаточном числе АТ, и заканчивается при достижении скорости включаемого фрикциона, соответствующей его скорости на новой ступени (т. е. синхронной скорости).

Управление с ЗОС на рисунке 10 б поясняется подробнее. Здесь на верхнем графике сплошными линиями показан расчетный профиль изменения скорости буксования включаемого фрикциона от максимальной до нулевой, а на нижнем графике — соответствующее изменение скорости турбины. Как видим, расчетный профиль буксования состоит из двух линейных участков с разными наклонами, а реальный (показанный пунктиром) сглаживает его плавной кривой. Принципы выбора профиля и расчетные формулы приведены в [5].

Также в [5] рассмотрен случай, когда в процессе начавшегося переключения внезапно произошло нажатие на педаль газа. Поскольку МСУ определяет, что произошло изменение типа переключения, и переходит к программе управления переключением «вниз» под нагрузкой (с подачей топлива), где алгоритмы принципиально отличны от описанных выше. В частности, управление с обратной связью там уже используется для вы-

Таблица 2 — Порядок включения ступеней АТ 6+1 [4]
Table 2 — Switching sequence of the АТ steps 6+1 [4]

Gear State	Gear Ratio	Ratio Step	C1A	C2A	C3A	C4A	C5A	F1
Rev	-2.943	—	X	—	G	—	—	—
Neutral	—	-0.64	O	—	—	—	—	—
1st	4.584	—	C	—	—	—	G	X
2nd	2.964	1.55	—	X	—	—	X	—
3rd	1.912	1.55	—	—	X	—	X	—
4th	1.446	1.32	—	—	—	X	X	—
5th	1.000	1.45	—	—	X	X	—	—
6th	0.746	1.34	—	X	—	X	—	—

Примечания: F1 — механизм свободного хода, установленный параллельно фрикциону (тормозу) C1A; X — фрикцион включен и передает момент; O — включен, но не передает крутящий момент; C — включен и передает крутящий момент для движения накатом; G — режим Garage Shifts

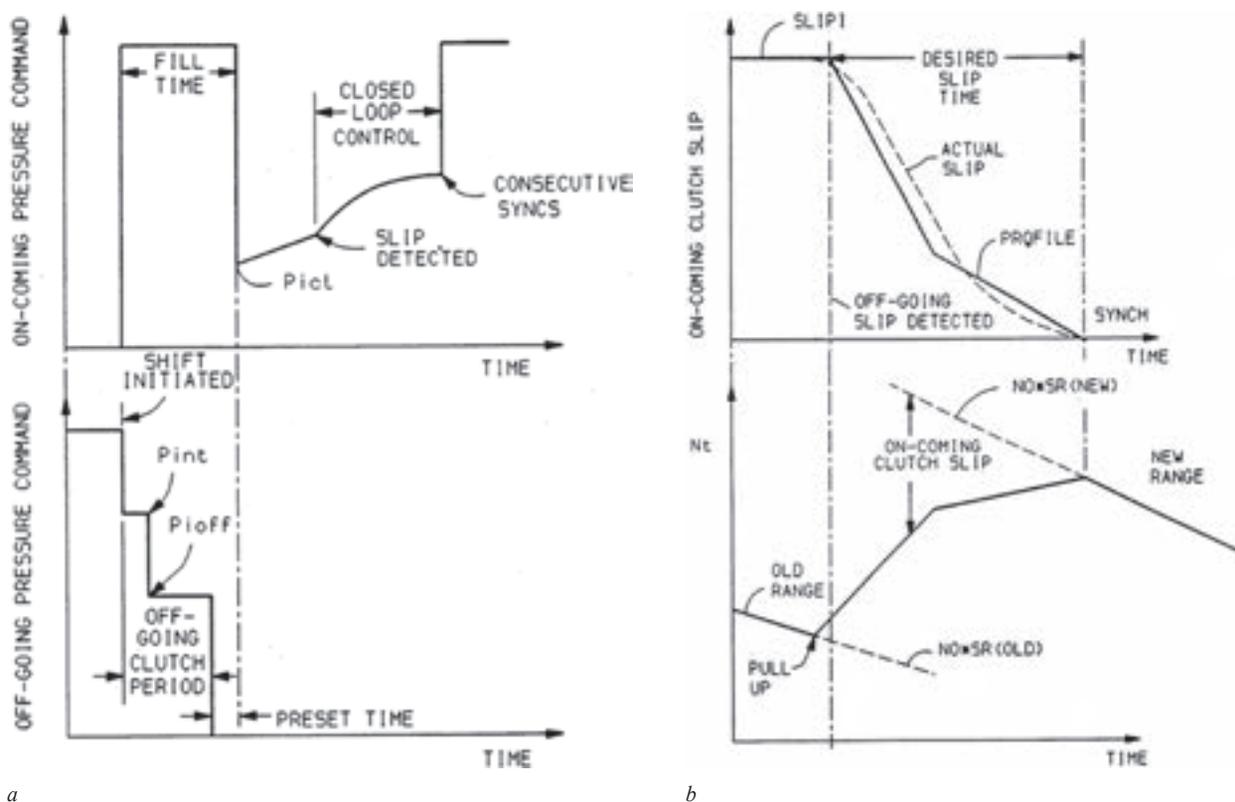


Рисунок 10 — Переключение «вниз» без нагрузки. Профили изменения давлений во включаемом и выключаемом фрикционах при управлении с замкнутой обратной связью (Closed Loop Control) [5]
 Figure 10 — Downshift without load. Pressure change profiles in the on-coming and off-going frictions during closed loop control [5]

ключаемого фрикциона, который буксует в течение всего переключения.

Отмечаются преимущества такого управления. В частности, использование промежуточной величины давления в выключаемом фрикционе уменьшает запаздывание его регулирования, связанное с динамикой ЭГК. Начальная величина P_{int} достаточна для возвращения на прежнюю ступень из-за нажатия на педаль, поскольку выключаемый фрикцион еще не успел опорожниться (что происходит только во время заполнения включаемого). Это также предотвращает замыкание включаемого фрикциона при незавершенном выключении другого, что привело бы к деградации качества переключения. Использование начала буксования выключаемого для детектирования разгона турбины позволяет автоматически запускать управление с обратной связью в нужный момент.

Применение технологии СТС: мониторинг, прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса АТ. В последние годы наблюдается рост числа публикаций, посвященных диагностике, мониторингу технического состояния и прогнозированию остаточного ресурса машин, механизмов и технических систем, в числе которых трансмиссии и в целом тяговые приводы автомобилей и другой мобильной техники.

При этом не всегда учитывается, что в современных автомобилях такие приводы чаще всего

являются автоматизированными, так как содержат АТ. А МСУ АТ, как показано в предыдущих разделах, имеют многоуровневые комплексы адаптивных алгоритмов управления, в составе которых есть алгоритмы диагностики, контроля исправности ответственных компонентов и в целом безопасности процессов управления. Так, алгоритмы безопасности предусматривают контроль исправности исполнительных устройств как обязательную операцию перед выполнением управляющей команды, а также оперативную реакцию на внезапный отказ. Таким образом, в АТ уже активно применяется бортовая автоматическая диагностика, мониторинг состояния.

Вместе с тем, в зарубежных публикациях все большее внимание уделяется определению остающегося полезного срока службы (Remaining Useful Lifetime — RUL), т. е. остаточного ресурса. Это период, остающийся до момента, когда объект больше не сможет отвечать заданным требованиям. Точное его определение — одна из центральных проблем систем прогнозирования и менеджмента технического состояния (*Prognosis and Health Management — PHM*). Знание RUL помогает минимизировать количество катастрофических отказов, динамически оптимизировать графики технического обслуживания, снизить стоимость эксплуатации [6]. Так, прогнозирование процента повреждений и RUL четырех основных компонентов легкового автомобиля (ДВС,

тормозных колодок, пружин подвески и шин) рассматривается в [6].

Компания General Motors запатентовала в 2013 г. устройство и метод для прогнозирования технического состояния трансмиссии [7] с приоритетом от 24.01.2008. На рисунке 11 показана типовая схема трансмиссии (гидромеханической АТ) и ее системы управления.

На рисунке 12 представлена блок-схема алгоритма, реализующего предлагаемый метод прогнозирования. В его обосновании отмечается, что качество переключения ступеней зависит от совместного выполнения ряда функций, таких как изменения давления в камерах фрикционов, длительность управляющих действий. Более того, производственные отклонения в каждой трансмиссии, изменения при износе компонентов, вариации качества рабочей жидкости и температуры, неодинаковые величины хода поршней, утечки жидкости ведут к деградации качества переключений, а значит, к ухудшению технического состояния трансмиссии.

Традиционно, чтобы определить, что АТ работает неудовлетворительно, оператор должен доставить автомобиль к провайдеру для сервиса и ремонта. Там специалисты должны скачать из МСУ АТ информацию обо всех необходимых адаптивных параметрах, обработать ее локально, и на основе сравнительного анализа с ранее накопленными их нормальными значениями определить, требует ли трансмиссия сервисного обслуживания. При этом нежелательно ждать, пока водитель сам распознает неисправность или ему подаст сигнал какой-либо другой индикатор.

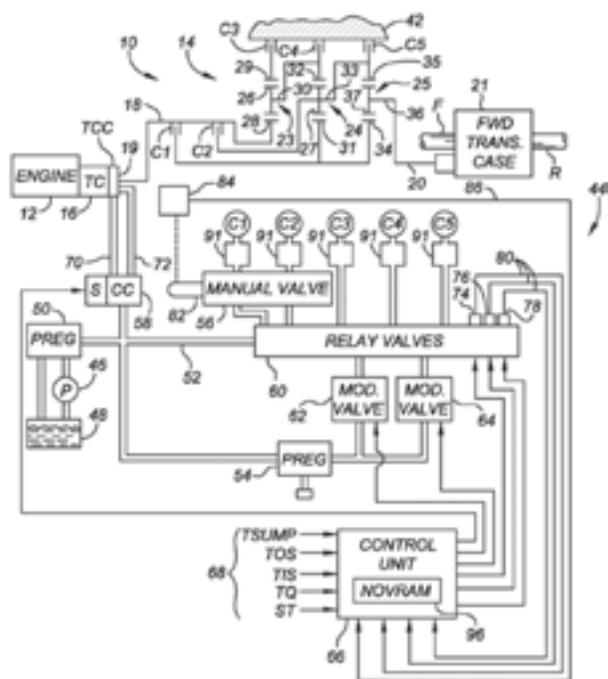


Рисунок 11 — Схема трансмиссии и системы управления гидромеханической АТ [7]
 Figure 11 — Scheme of the transmission and control system of the hydro-mechanical AT [7]

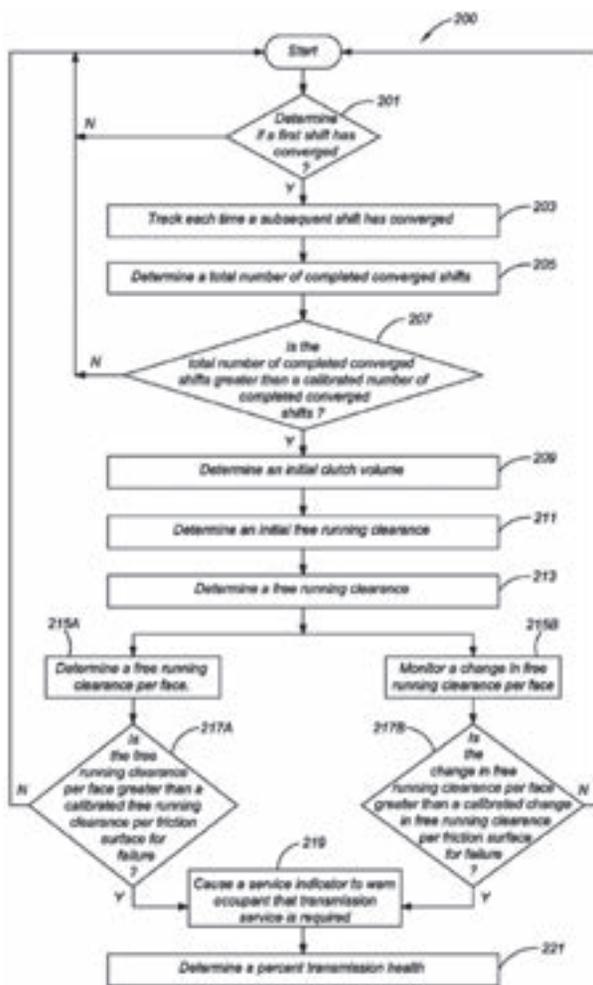


Рисунок 12 — Блок-схема алгоритма, реализующего метод прогнозирования технического состояния гидромеханической АТ [7]
 Figure 12 — Block diagram of an algorithm implementing a method for predicting the technical condition of a hydro-mechanical AT [7]

Для количественной оценки остаточного ресурса трансмиссии предлагается параметр «процент здоровья» — *percent health parameter (PH)*. Он равен минимальному значению процента допустимой деградации фрикциона — максимально допустимому проценту деградации адаптивных параметров.

Рекомендуется выполнять вычисление PH для каждого фрикциона при каждом переключении и предъявлять оператору одновременно с подачей сигнала о необходимости обслуживания трансмиссии, а также по запросу оператора при отсутствии такой необходимости.

Предлагаемый метод включает:

- мониторинг общего числа законченных переключений ступеней после того, как закончено первое переключение;
- если ДА, то определение начального объема камеры фрикциона и зазора между дисками каждой его пары трения в выключенном состоянии;
- определение увеличения этого зазора сверх величины, выбранной при калибровке как признак неисправности;

- если ДА, то активация сервисного индикатора, сконфигурированного для предупреждения пассажиров, что требуется обслуживание трансмиссии.

Данный алгоритм выполняется при каждом переключении ступеней. Рассмотрим содержание основных его блоков [7].

Блок 201 (первый после старта) определяет, завершено ли первое переключение. Если ДА, перейти к блоку 203. Очевидно, имеется в виду, что первым зачетным является первое переключение, выполненное в начале эксплуатации АТ на автомобиле (прим. автора).

Блок 203. Определить и зафиксировать время выполнения очередного завершеного переключения.

Блок 205. Определить общее число завершённых переключений.

Блок 207. Общее число завершённых переключений превышает калибровочное (предварительно заданное) число завершённых переключений? Если НЕТ, вернуться к началу. Если ДА, перейти к блоку 209.

Блок 209. Определить начальный объем камеры фрикциона. Перейти к блоку 211. Объем камеры («воздушный объем») определяется при каждом переключении путем вычисления поступившего при заполнении количества жидкости в камеру 172, подробнее в [7] (прим. автора).

Блок 211. Определить начальный зазор между дисками выключенного фрикциона. Перейти к блоку 213.

Блок 213. Определить зазор между дисками выключенного фрикциона. Перейти к блокам 215А, 215В.

Блок 215А. Определить зазор между парой дисков выключенного фрикциона. Перейти к блоку 217А.

Блок 217А. Зазор между парой дисков больше величины, соответствующей зазору при калибровочной величине неисправности? Если НЕТ, перейти в начало. Если ДА, перейти к блоку 219.

Блок 217В. Скорость изменения зазора между парой дисков больше величины, соответствующей скорости изменения зазора при калибровочной величине неисправности? Если НЕТ, перейти в начало. Если ДА, перейти к блоку 219.

Блок 219. Активировать сервисный индикатор для предупреждения о необходимости сервисного обслуживания трансмиссии. Перейти к блоку 221.

Блок 221. Определить процент технического состояния трансмиссии.

Некоторые пояснения. Как видно из изложенного, непрерывное вычисление указанного параметра (при каждом переключении) фактически представляет собой *определение остаточного ресурса работоспособности* АТ до наступления необходимости ремонта и, более того, с упреждением ее поломки.

В основе алгоритма лежит перманентная оценка величины и скорости увеличения зазоров между дисками каждого из фрикционов АТ как ха-

рактеристик их постепенного износа, в конечном счете — точного определения величины перемещения поршня гидроцилиндра фрикциона. А это, как известно, сложная задача, имеющая много запатентованных решений. Конечно, она могла быть решена и специально в интересах прогнозирования ресурса.

Но в данном случае главное в том, что она была решена и применяется в массовом производстве всех видов АТ в рамках технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» достаточно давно. Точное определение времени, величины перемещения и момента остановки поршня включаемого фрикциона и их изменений — одна из базовых задач технологии СТС, которая подробно рассматривается в [8, 9]. Для ее решения МСУ имеет адекватный инструментарий.

Таким образом, можно полагать, что каждая МСУ, обладающая технологией СТС, способна реализовать и технологию прогнозистики РНМ в пределах своих технических возможностей.

С другой стороны, возникают вопросы о выборе в рассмотренном примере исходной калибровочной величины критерия предельного износа, под которым подразумевается максимальное число переключений ступеней или включений фрикционов. Видимо, здесь подробности вторичны, так как главное — в методике назначения предельного числа переключений как критерия исчерпания ресурса АТ. Хотя общепризнано, что фрикционы — главный лимитирующий компонент АТ, и накоплены базы данных о реальных сроках их службы при массовой эксплуатации АТ. Из них, очевидно, можно получить требуемую статистическую информацию для выбора критерия.

В данном примере оценка скорости износа пар трения фрикционов связана только с ростом числа включений, а влияние их реальной нагруженности не учитывается. Могут использоваться средние статистические данные о сроках службы каждого из комплекта фрикционов, полученные в процессе испытаний и эксплуатации АТ.

Но в то же время в рамках технологии СТС определяются и минимизируются мощность и работа буксования фрикционов при каждом переключении. Текущий крутящий момент гидротрансформатора легко определяется по его характеристике, а момент ДВС доступен в цифровом виде, особенно в интегрированных силовых установках. Более того, как показано выше, математические модели динамики переходных процессов переключений — основа алгоритмов управления — предусматривают вычисление всех действующих моментов и начинают применяться в бортовых МСУ АТ.

Это означает, что созданы условия для определения бортовой системой (МСУ) текущего нагружения и накопления информации о нарастающей суммарной реальной нагруженности фрикционов

на основе технологии СТС, а значит, для более точной оценки остаточного ресурса АТ.

Заключение. 1. СТС — массовая промышленная технология управления АТ, которая совершенствуется и успешно применяется уже более 40 лет. Она обеспечивает самое высокое качество переключений ступеней современных автомобильных АТ, доведенное практически до уровня плавности бесступенчатых передач. Одна из главных трудностей, возникающих при ее практическом освоении, — сложность создания соответствующего алгоритмического и программного обеспечения и его отладки в составе объектов управления.

Яркий пример — соглашение компаний General Motors и Ford о совместном создании новой 10-ступенчатой АТ, представленной в 2017 г. Они договорились о строгой унификации самой АТ и ее компонентов, *но применении каждой стороной собственного программного обеспечения* МСУ АТ, совместимого с другими компонентами бортовых сетей (семействами применяемых ДВС и др.), т. к. его унификация привела бы к колоссальным по сложности, трудоемкости, длительности и стоимости доработкам каждой стороной программного обеспечения своих сетей для совместимости с новой АТ.

2. Одна из особенностей современного этапа развития автомобильных силовых установок — неожиданное быстрое увеличение числа ступеней АТ. Так, на легковых автомобилях давно ушли в историю 6-ступенчатые АТ. Недолго удерживались рекорды 7-, 8-, 9-ступенчатых. Новейшая стадия увеличения числа ступеней — упомянутая программа General Motors и Ford по созданию 10-ступенчатой АТ, которая находится в стадии реализации.

Этот процесс сопровождается повышением сложности кинематических схем и конструкций АТ, значительным усилением роли их МСУ, усложнением алгоритмов управления, увеличением объема программного обеспечения контроллеров.

3. Основная идея технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» и даже основной алгоритм понятны из самого названия. Но при длительном ее совершенствовании на основе опыта массовой эксплуатации произошла дифференциация алгоритмов с их привязкой к конкретным фазам и условиям переключений. В результате появились комплексы алгоритмов для каждой из типовых задач, а в итоге — *комплекс алгоритмов* (а точнее — совокупность комплексов), реализующих данную технологию в целом. Авторские права на такие алгоритмы, как правило, защищены национальными и международными патентами.

4. Для получения высокого эффекта от применения технологии СТС необходимо задействовать полноценный комплект ее алгоритмов. Его состав, несмотря на большое число публикаций, не ограничен и не оговорен, хотя очевидно, что он имеется

у ведущих компаний как ноу-хау. Насколько известно автору, в настоящее время отсутствует описание структуры, классификации или каких-то других инструментов для ориентации в этом множестве алгоритмов, что создает очевидные трудности для специалистов и организаций, заинтересованных в практическом освоении технологии СТС.

В данной работе впервые в русскоязычном изложении предлагается структура комплекса необходимых для реализации данной технологии в МСУ АТ *типовых алгоритмов*, отобранных из предварительно сформированной базы патентов и публикаций. По каждой позиции структуры приведены ссылки на публикации, содержащие описание применения соответствующих алгоритмов в МСУ АТ.

5. Приведены описания некоторых типовых алгоритмов СТС-управления. В их числе:

- регулятор давления с самодиагностикой для программируемого управления моментом трения фрикциона;
- управление фрикционами с замкнутой обратной связью при автоматическом переключении ступеней;
- управление переключениями вниз под нагрузкой 6-ступенчатой 3-ступенной гидромеханической АТ;
- система и метод переключений с двойными переходами фрикционов трансмиссии;
- метод переключения АТ вниз со сброшенным газом;
- применение технологии СТС: мониторинг, прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса АТ.

Представленная информация может быть полезна специалистам, связанным с созданием, исследованием и эксплуатацией АТ легковой и тяжелой автомобильной техники, в том числе гибридной и батарейной.

Список литературы

1. Self-diagnosing pressure regulator apparatus: pat. US 6382248 / Ch.F. Long, M.L. Duhaimе, M.R. Dadel. — Publ. date: 07.05.2002.
2. Closed loop clutch control of an automatic shift transmission: pat. US 5046176 / W.C. Lin. — Publ. date: 03.09.1991.
3. Model-based control of an automatic transmission power-on downshift: pat. US 6415213 / G.A. Hubbard, J.K. Runde, A.H. Heap. — Publ. date: 02.07.2002.
4. System and method of executing double transition shift in transmission with transitioning clutch having opposite clutch slip and torque carrying directions: pat. US 8983745 / V.A. Neelakanthan, N.E. Wilke. — Publ. date: 17.03.2015.
5. Method of clutch-to-clutch closed throttle downshift in an automatic transmission: pat. US 5046174 / C.A. Lentz, J.A. Hibner. — Publ. date: 03.09.1991.
6. Modelling and prediction of remaining useful lifetime for maintenance scheduling optimization of a car fleet [Electronic resource] // CIMPLO: cross-industry predictive maintenance optimization platform. — Mode of access: <https://cimplo.nl/2019/12/11/modelling-and-prediction-of-remaining-useful-lifetime-for-maintenance-scheduling-optimization-of-a-car-fleet/>. — Date of access: 20.03.2021.
7. 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.
8. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии. Технология «Clutch-to-Clutch Shifts»: практика применения /

Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 48–59.

9. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: «боле-вые точки» алгоритмов управления технологии «Clutch-to-Clutch Shifts» / Л.Г. Красневский // Механика машин, меха-низмов и материалов. — 2019. — № 4(49). — С. 20–31.

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

Joint 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 2

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/10.46864/1995-0470-2021-3-56-13-24>

References

1. Long Ch. F., Duhaime M.L., Dadel M.R. *Self-diagnosing pressure regulator apparatus*. Patent USA, no. 6382248, 2002.
2. Lin W.C. *Closed loop clutch control of an automatic shift transmission*. Patent USA, no. 5046176, 1991.
3. Hubbard G.A., Runde J.K., Heap A.H. *Model-based control of an automatic transmission power-on downshift*. Patent USA, no. 6415213, 2002.
4. Neelakantan V.A., Wilke N.E. *System and method of executing double transition shift in transmission with transitioning clutch having opposite clutch slip and torque carrying directions*. Patent USA, no. 8983745, 2015.
5. Lentz C.A., Hibner J.A. *Method of clutch-to-clutch closed throttle downshift in an automatic transmission*. Patent USA, no. 5046174, 1991.
6. Modelling and prediction of remaining useful lifetime for maintenance scheduling optimization of a car fleet. *CIMPLO: cross-industry predictive maintenance optimization platform*, 2019. Available at: <https://cimplo.nl/2019/12/11/modelling-and-prediction-of-remaining-useful-lifetime-for-maintenance-scheduling-optimization-of-a-car-fleet/> (accessed 20 March 2021).
7. Rains M.A., Caldwell B.R. *Apparatus and method for predicting the health of a power transmission*. Patent USA, no. 8463482, 2013.
8. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii. Tekhnologiya “Clutch-to-Clutch Shifts”: praktika primeneniya [Automatic transmissions. “Clutch-to-Clutch Shifts” technology: practical application]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 48–59 (in Russ.).
9. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii: “bolevye tochki” algoritmov upravleniya tekhnologii “Clutch-to-Clutch Shifts” [Automatic transmissions: “pressure points” of control algorithms of “Clutch-to-Clutch Shifts” technology]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 4(49), pp. 20–31 (in Russ.).