



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 62-235

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук

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 01.08.2019.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ: «БОЛЕВЫЕ ТОЧКИ» АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «CLUTCH-TO-CLUTCH SHIFTS»

В предыдущих публикациях автора показано, что основы современной теории и техники управления автоматическими трансмиссиями можно обобщенно представить в виде единого мультидисциплинарного комплекса, состоящего из шести взаимосвязанных базовых технологий. Среди них — широко применяемая технология «Clutch-to-Clutch Shifts» («Переключения от фрикциона к фрикциону», сокращенно СТС), обеспечивающая высокое качество переходных процессов автомобилей с современными автоматическими трансмиссиями. Оно обеспечивается применением комплекса специальных алгоритмов управления фрикционами трансмиссии при переключениях ее ступеней. В процессе их реализации ключевыми являются точки, в которых принятие решения оказывает значительное влияние на последующий процесс вплоть до возможности его дезорганизации, названные поэтому «болевыми». Это, в первую очередь, идентификация момента остановки поршня фрикциона в процессе переключения и калибровка трансмиссии и мехатронной системы управления, а также выбор прецизионных исполнительных электрогидравлических устройств. На основе анализа большого объема патентов и научных публикаций дан анализ методов решения этих задач, применяемых ведущими мировыми производителями АТ.

Ключевые слова: мобильные машины, автоматические трансмиссии, мехатронные системы управления, технология переключения ступеней «Clutch-to-Clutch Shifts»

Введение. Данная работа продолжает серию публикаций автора, посвященных современному состоянию теории и техники управления автоматическими трансмиссиями (АТ) как мехатронными объектами, сложившемуся в мировом автомобильном сообществе.

Почему данный предмет представляется актуальным, особенно для русскоязычной публикации? Ответ заключается в следующем. В развитых странах применение АТ на выпускаемых автомобилях достигло уровня 90 %. Резко возросли технический уровень, надежность, долговечность АТ. Вклад мехатронной системы управления (МСУ) в эти достижения, можно без преувеличения сказать, решающий. Сложилась единая теория и техника управления, применяемая всеми ведущими автомобильными компаниями при создании, производстве и эксплуатации АТ всех типов.

Но в то же время бесполезно искать учебники, которые позволяли бы освоить эту область до про-

фессионального уровня. Их нет не только на русском языке, но, как ни странно, и на английском (во всяком случае, автору они не встречались). В США и Германии регулярно издаются и переиздаются фундаментальные издания по теории, конструкции и расчету автомобильных трансмиссий справочного характера [1]. Однако, учитывая ширину охвата, предоставляемый в них печатный объем по каждой теме крайне ограничен, так что по теории управления АТ даются только сжатые общие сведения.

Технология СТС и «болевы точки» ее алгоритмов. Многолетний анализ конструкций силовых установок с АТ и в целом мобильной техники с такими установками неопровержимо показывает, что развитие конструкций практически всех типов АТ тесно связано с гидромеханическими трансмиссиями (ГМТ), поскольку все они (кроме автоматизированной механической — АМТ) содержат их компоненты — зубчатые механиз-

мы, фрикционы, гидросистемы, МСУ. А значит, применение вынесенной в заголовок технологии управления «Clutch-to-Clutch Shifts» (далее сокращенно СТС — транслитерация первых букв с английского), созданной специально для ГМТ, также необходимо для всех АТ, имеющих многодисковые фрикционы (далее МФ).

Термин СТС по смыслу соответствует уже привычному русскому термину «перекрытие» — переключение ступеней без разрыва потока мощности. Под ним понимается согласованное управление моментами трения во включаемом и выключаемом МФ, причем оба они на некоторое время оказываются включенными одновременно. Перекрытие применялось в гидравлических системах прошлых поколений, например, в системе ручного управления МФ трансмиссии советских колесных тракторов «Кировец» (К 700) и его модификаций для обеспечения переключения ступеней на ходу под нагрузкой при пахоте. Оно обеспечивалось с помощью гидроаккумулятора, поочередно подключаемого к нужному МФ системой управления. Величина перекрытия была постоянной, так как задавалась конструктивными параметрами, и поэтому не могла обеспечить высокую плавность переключений при разных режимах, что сказывалось на надежности МФ и ГМТ в целом.

В полной мере такое переключение осуществимо только с помощью МСУ в рамках технологии СТС. Ее применение в АТ за рубежом уже в 1990-х годах стало массовым, и сам этот термин получил широкое распространение.

В наших работах [2, 3] предложен мультидисциплинарный комплекс из шести базовых технологий, входящих в теорию и технику управления АТ, и дана краткая характеристика технологии СТС, которая занимает в них центральное место. Назовем некоторые из ее основных положений [3].

1. Типовой переходный процесс переключения ступеней состоит из трех фаз: Fill Time (подготовительная фаза — заполнение гидроцилиндра включаемого МФ с определением его длительности); Torque Phase (фаза крутящего момента); Inertia Phase (фаза инерции). Фазы инерции и крутящего момента в различных видах реальных процессов могут меняться местами.

2. Различные законы управления для различных типов, режимов и фаз переключений.

3. Прецизионное управление — требование, распространяющееся на все аппаратно-программные средства МСУ на всех стадиях процессов СТС (подробнее в [4]).

4. Идентификация момента остановки поршня гидроцилиндра включаемого МФ (окончания фазы Fill time) — End of Fill Detection (сокращенно — EOF, иногда — Touch point, Kiss point) — обязательный элемент прецизионного управления.

Начнем с определения момента остановки поршня — EOF.

Почему так важно и, как увидим, сложно и дорого, точно определять этот момент, если это только точка на оси абсцисс графика переключения?

Что касается важности, то ее можно пояснить с помощью графика (рисунок 1) из публикации сотрудников компании General Motors [5]. Требуемый закон изменения давления в гидроцилиндре МФ при переключении вверх, обозначенный здесь жирными линиями, и время его заполнения задаются алгоритмами управления. По истечении этого времени (т. е. при наступлении момента EOF) подается команда на повышение давления. При непредусмотренных отклонениях от заданного времени произойдет раннее либо позднее заполнение (кривые Overfill и Underfill). При раннем МФ начинает работать раньше, чем предусмотрено (в частности, расчетами перекрытия с выключаемым МФ), что вызывает преждевременное падение скорости ДВС. При позднем, наоборот, возможен кратковременный разрыв потока мощности (фактически выход АТ на нейтраль) с резким ростом скорости ДВС (tie-up), который затем необходимо тормозить за счет буксования того же МФ. Параметры качества процесса (джерк и др.) в обоих случаях существенно ухудшаются. Корректный закон изменения давления в гидроцилиндре соответствует линии Correct fill, где команда на повышение давления подана точно в точке EOF.

Таким образом, *ошибки* при идентификации момента остановки поршня включаемого МФ — начальной процедуры управления моментом трения МФ — могут привести к отклонению всего последующего процесса от запрограммированных параметров вплоть до полной *дезорганизации*. Для их исключения должна быть предусмотрена *адаптация* алгоритмов управления к возможным отклонениям EOF от расчетного значения.

На практике каждый производитель сам решает, применять СТС или что-нибудь попроще, тем более, если речь идет не о массовом производстве АТ, а лишь о малых объемах. Так, в русскоязычных статьях и диссертациях, доступных в интернете, об идентификации EOF, трех фазах процесса и т. д., нет информации. Закон управления нарастанием давления (т. е. буксованием включаемого МФ) чаще всего представлен в виде одиночной наклонной прямой. О последствиях можно судить хотя бы по комментариям к рисунку 1. В какой-то степени это — наследие ранних этапов применения МСУ, когда единственно доступным признаком остановки поршня как для гидравлики, так и электроники была остановка потока жидкости в канале управления гидроцилиндром, что соответствовало уровню того периода.

Насколько известно автору, технология СТС была запатентована компанией General Motors. Она подала три заявки на изобретения 26 декабря 1989 г., в которых изложено описание данной технологии (на примерах МСУ ГМТ). Первым из них

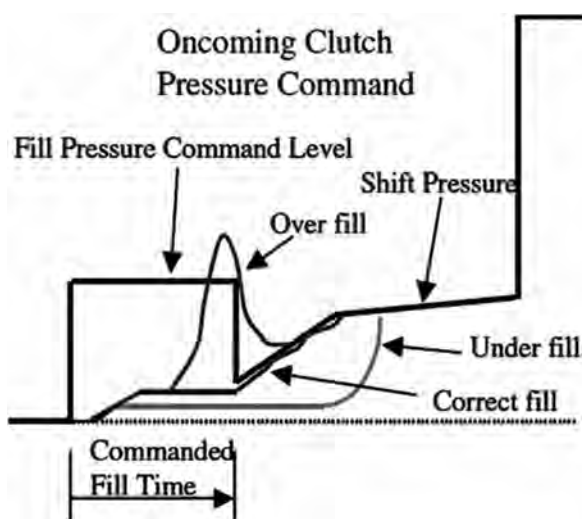
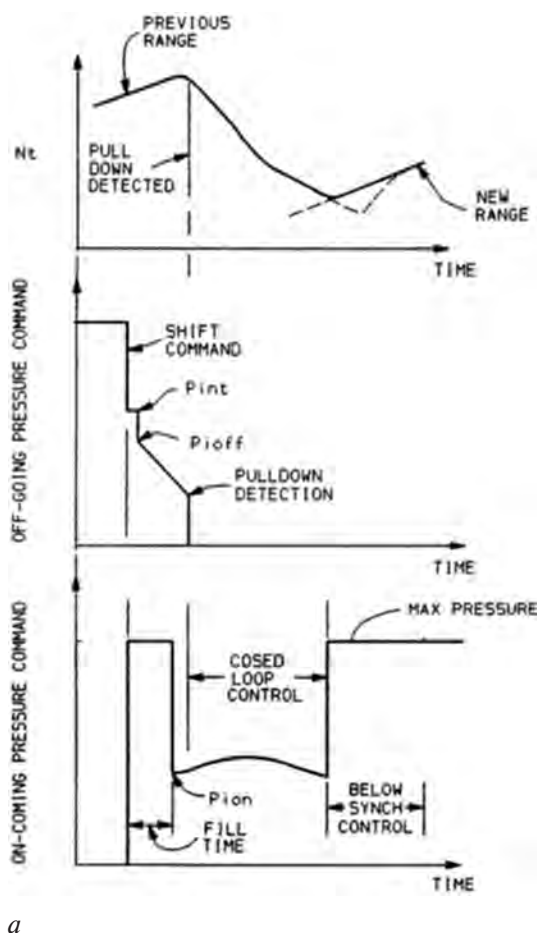


Рисунок 1 — Вариации заполнения включаемого фрикциона [5]
Figure 1 — Filling variations of the initiated clutch [5]

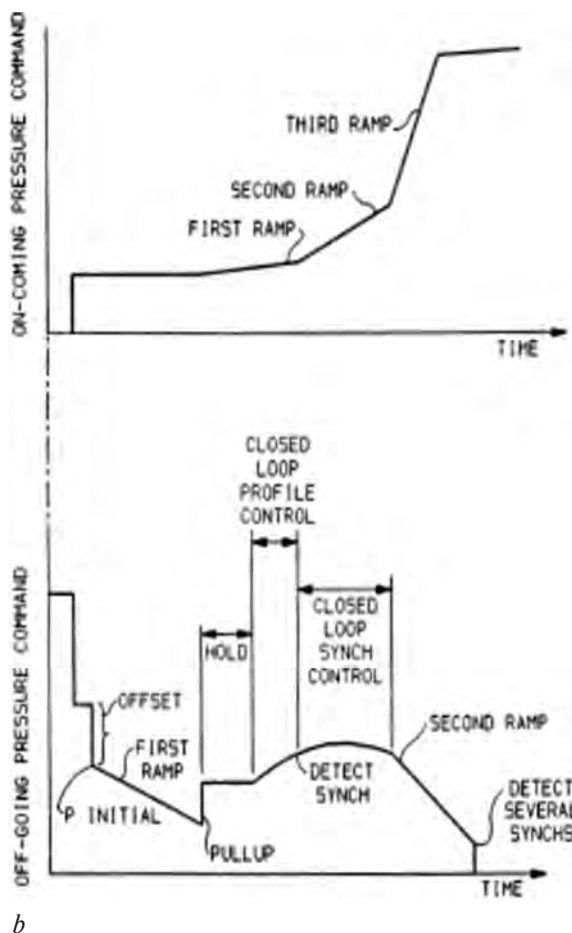
9 июля 1991 г. был опубликован патент США «Метод управления «clutch-to-clutch» переключением автоматической трансмиссии вниз под нагрузкой» [6]. Вторым 10 декабря 1991 г. опубликован патент «Адаптивное переключение автоматической трансмиссии вниз под нагрузкой» [10]. Третьим в тот же день 10 декабря 1991 г. выдан патент

«Адаптивное управление автоматической трансмиссией» [11]. Следует отметить, что авторские коллективы этих патентов возглавляет Карл А. Ленц (Carl A. Lentz). В названных патентах даны описания и подробные блок-схемы типовых алгоритмов автоматических переключений ГМТ вверх [6] и вниз под нагрузкой, которые по сути составляют технологию СТС. Появление в их названиях термина «адаптивное ...» обусловлено тем, что этот принцип является неотъемлемым элементом данной технологии (пояснения см. далее).

На рисунке 2 а показано согласованное изменение скорости турбины гидротрансформатора (верхний график) и давлений в гидроцилиндрах включаемого и выключаемого МФ (средний и нижний графики) в процессе переключения на высшую ступень. На нижнем графике отмечено время заполнения гидроцилиндра включаемого МФ (Fill Time) и момент его окончания (Pion), т. е. остановки поршня. Она идентифицируется по началу понижения скорости турбины (которая до этого — на текущей ступени — повышалась в процессе разгона автомобиля) вследствие начала буксования включаемого МФ. На верхнем графике остановка обозначена вертикальной линией (Pulldown Detection), проходящей через все три



a



b

Рисунок 2 — Графическое представление алгоритмов автоматического управления переключением на высшую (а) и низшую (б) ступени ГМТ с определением момента остановки поршня включаемого МФ [6]

Figure 2 — Graphical representation of algorithms for automatic control of switching to the higher (a) and lower (b) stages of the hydromechanical transmission with the determination of the moment of stopping the piston of the initiated multi-disc clutch [6]

графика. Это момент изменения знака производной скорости турбины, т. е. ее ускорения. Далее с этого момента начинается фаза управляемого торможения турбины, осуществляемого алгоритмом с замкнутой обратной связью (Closed Loop Control). В патенте также приведен целевой (расчетный) профиль этого торможения, служащий основой для формирования показанных выше законов изменения давлений посредством обратной связи (здесь не показан).

На рисунке 2 *b* представлено согласованное управление давлениями во включаемом (верхний график) и выключаемом (нижний график) МФ. Здесь момент остановки поршня идентифицируется по началу разгона турбины, т. е. также изменения знака ее ускорения. Как и на рисунке 2 *a*, для экономии места здесь также не показан профиль изменения скорости турбины. Отметим только, что алгоритмы управления в данном случае существенно сложнее алгоритмов переключения вверх, причем в первую очередь это касается управления выключаемым МФ.

Необходимо отметить, что в дальнейшем эта теория и техника развивалась и совершенствовалась не только данной компанией, но и другими, применяющими СТС, в частности, теми, кто поставляет свою продукцию в США и подчиняется законодательству об интеллектуальной собственности. Мы приводим здесь только первые из большого числа известных сегодня патентов еще и для того, чтобы показать, что СТС как общепризнанная теория и техника известна и массово применяется уже тридцать лет.

Вместе с тем, очевидно, что с появлением описанной в этих патентах технологии СТС, ее широким освоением и освещением, публикации прежнего уровня де-факто стали архаичны. А они появлялись до 2010 года, и даже после, тогда как СТС — результат десятилетий совершенствования прежних технологий МСУ с применением методов оптимизации, апробированных в производстве и многолетней эксплуатации миллионов АТ.

Сказанное выше показывает, что EOF — это точка, алгоритмы действий (тем более, ошибки) в которой оказывают значительное влияние на качество последующего процесса управления. Ее значение проявляется уже на стадии проектирования, когда выбираются алгоритмы, в конечном счете — технология управления.

EOF — первая по времени, но не единственная из таких точек процесса управления, в которых принятие решения (выбор дальнейших действий) имеет такое же важное значение. Это позволяет назвать их «*болевыми точками*», чтобы привлечь внимание и предупредить возможные ошибки при выборе и реализации технологии управления АТ.

Практическое применение технологии СТС в современных силовых установках с АТ на примере развития МСУ АТ компании Caterpillar, в сжа-

том виде представленное в нашей статье [7], может быть иллюстрацией сказанного выше. Из материалов, приведенных в ней, выбраны для первоочередного анализа в данной работе (на наш взгляд, наиболее актуальные на первых этапах) *три «болевые точки»*:

- EOF;
- калибровка АТ и МСУ в реальном масштабе времени на борту;
- прецизионные электрогидравлические клапаны (ЭГК).

Рассмотрим, как проблемы, связанные с ними, решаются в патентах ведущих мировых компаний: General Motors, Toyota, Ford, Chrysler, Eaton, John Deere, Case, Zahnradfabrik Friedrichshafen, Komatsu, Honda, Hyundai.

Из патентов США, касающихся АТ названных компаний, были отобраны для анализа встречавшиеся нам в процессе работ по АТ, причем только такие (всего около 120), в названиях которых присутствовали приведенные выше или другие термины, имеющие прямое отношение к процессу подготовки к включению МФ. Следует отметить, что они относятся к периоду 1973–2017 годов, причем более трети — патенты General Motors. Учитывая ограниченный объем статьи, ниже приведены только некоторые характерные технические решения из описаний патентов.

«Болевая точка» 1. Заполнение и остановка поршня гидроцилиндра МФ (Fill Time, EOF). Рассмотрим сначала, как эти проблемы решались в период до появления МСУ на примере системы командного управления трехступенчатой тяжелой ГМТ компании General Motors (рисунок 3). Здесь

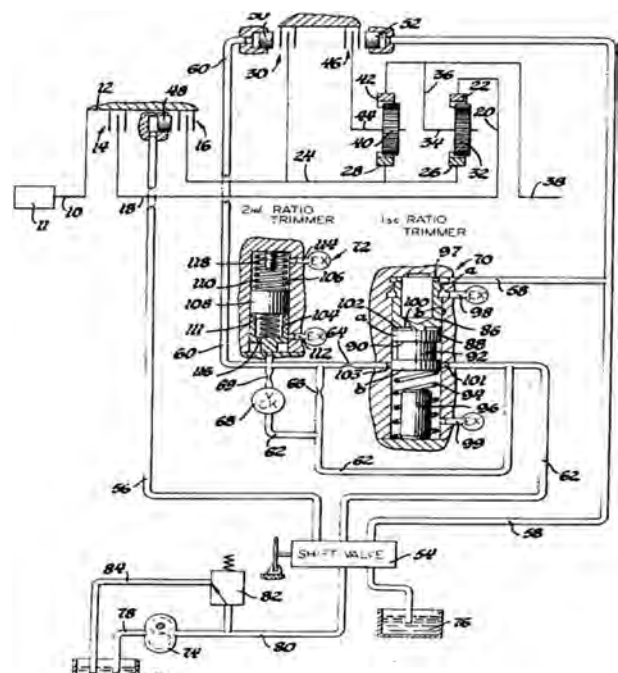


Рисунок 3 — Система командного управления трехступенчатой тяжелой ГМТ General Motors [8]

Figure 3 — Command control system of General Motors three-stage heavy duty hydromechanical transmission [8]

требуемое время заполнения гидроцилиндров МФ обеспечивалось подбором проходных сечений трех постоянных дросселей 64, 68, 69, установленных в гидролиниях управления. Определение момента остановки поршней гидроцилиндров и последующее плавное нарастание давления в них выполнялось с помощью двух клапанов плавности 70 и 72 (на рисунке — 2nd Ratio Trimmer и 1st Ratio Trimmer). Это золотниковые регуляторы давления с переменной настройкой за счет регулирования усилия пружин. Их конструкция хорошо известна. Она применялась в тяжелых GMT Allison на протяжении многих последующих лет — до перехода на двухкаскадные механизмы плавности с ЭГК в пилотном каскаде. Вход каждого из клапанов подключен параллельно к гидролинии управления одного из МФ. При его включении в процессе заполнения гидроцилиндра возникает значительный перепад давления между входом и выходом гидролинии (отчасти создаваемый дросселем). В момент остановки поршня и, соответственно, потока жидкости перепад давления исчезает и оно начинает выравниваться по всей длине гидролинии. При достижении величины, соответствующей начальной настройке регулятора, он срабатывает и начинает плавно повышать давление по линейному закону ввиду постепенного поджатия пружины. При достижении заданной величины он закрывается, а давление в гидролинии и гидроцилиндре скачком повышается до величины давления питания.

Таким образом, здесь доступными физическими параметрами, сопутствующими наступлению EOF, являются резкое изменение эпюры давления по длине гидролинии, а затем реакция на него — срабатывание регулятора давления (перемещение его золотника).

Далее этот принцип нашел применение во многих устройствах идентификации EOF уже в составе МСУ АТ.

Следует также отметить, что получаемый закон управления — одиночная прямая линия — оказался, как упоминалось выше, очень живучим.

Яркий пример воплощения описанного принципа идентификации EOF — двухкаскадный механизм плавности с пилотным золотниковым ЭГК для GMT большегрузного карьерного автомобиля-самосвала японской компании Komatsu по патенту США 2000 года (рисунок 4). Он содержит ЭГК 10 с электромагнитом 3 и регулятором давления с дифференциальным золотником 61, клапан потока 20 с дифференциальным золотником 22 и электромеханический индикатор заполнения (на рисунке — Filling Detection). В пояске большого диаметра золотника 22 имеются дроссельные отверстия 77. Входное отверстие 91 соединяют с насосом, а выходное 93 — с гидроцилиндром МФ. Для его включения шток электромагнита 3 перемещает золотник 61 в положение,

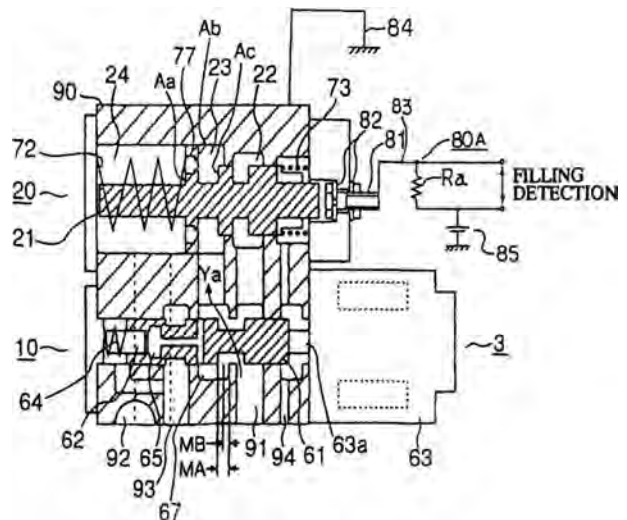
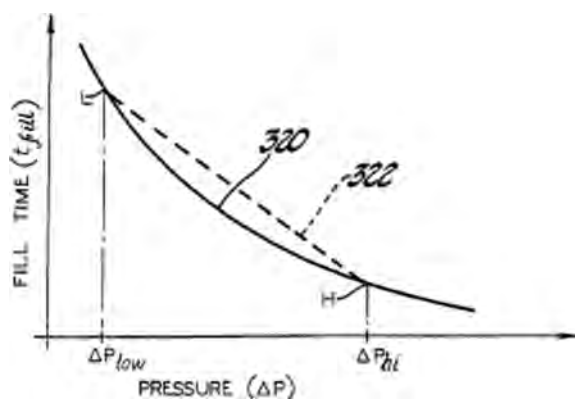


Рисунок 4 — Механизм плавности карьерного автомобиля-самосвала Komatsu [9]

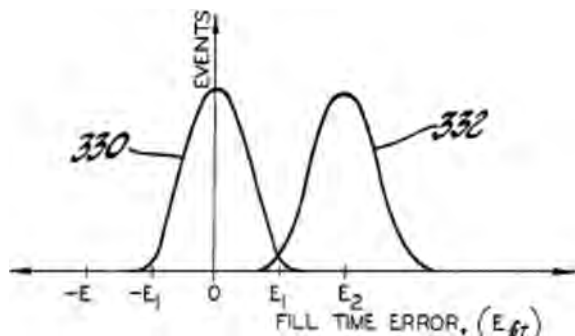
Figure 4 — Smoothness mechanism of Komatsu dump truck [9]

показанное на рисунке 4. Через него жидкость из канала 91 попадает в дифференциальную полость клапана потока 20 по стрелке Ya и через дроссельные отверстия 77 и выход 93 — в гидроцилиндр (на рисунке 4 не показан). Из-за дросселирования потока возникает значительный перепад давления между полостями 23 и 24, под действием которого золотник 22 перемещается влево до упора (как на рисунке 4), соединяя каналы 91 и 93 напрямую для быстрого заполнения гидроцилиндра МФ. При наступлении EOF и остановке потока перепад на дросселях 77 исчезает, и золотник 22 под действием пружины возвращается вправо до упора в контакт 81, соединяя через него и резистор 80А батарею 85 с массой. Падение напряжения на резисторе и есть электрический сигнал EOF, который служит сигналом для МСУ на запуск алгоритмов управления процессом переключения СТС.

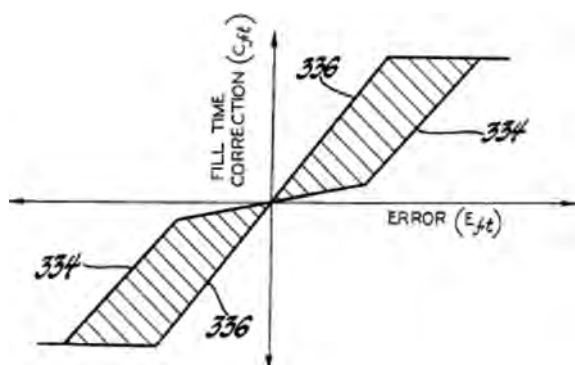
В описанной выше системе не рассматривается влияние возможных отклонений фактического времени заполнения от записанного в программе. Метод адаптивной автоматической коррекции представлен в [10]. Расчетное время заполнения вычисляется с помощью его зависимости от давления, представленной на рисунке 5 а. Пунктирной линией 322 соединены допустимые пределы его изменения — точки L и H. При дополнительном учете влияния вязкости жидкости эта линейная зависимость трансформируется в нелинейную зависимость 320, по которой методом интерполяции вычисляется время (т. е. точка EOF). Далее оно сравнивается с фактическим, определяемым (при переключении вверх) по началу падения скорости турбины гидротрансформатора, которое соответствует началу фазы инерции. Результаты используются для коррекции времени заполнения путем изменения положения точек L и H. Оценка правильности определения этого времени поясняется рисунком 5 б, где показаны два варианта



a



b



c

Рисунок 5 — К методу адаптивной автоматической коррекции времени заполнения [10]

Figure 5 — To the method of adaptive automatic correction of filling time [10]

кривых статистического распределения ошибок (Fill Time Error) при его определении. Здесь $+E1$, $-E1$ — предельно допустимые ошибки. Кривая 330, центрированная относительно начала координат, соответствует точно откалиброванной МСУ, так как в ее пределах сформированные алгоритмами процессы переключений будут иметь высокую повторяемость и высокое или, в крайних случаях, приемлемое качество. Кривая 332, центрированная относительно $E2$, говорит о плохой калибровке МСУ, так как даже минимальные ее ошибки превышают допустимые, и настройка времени заполнения требует адаптивной компенсации. Если, например, предполагаемая длительность первой фазы — фазы крутящего момента — составляет 30 мс, а снижение скорости турбины после EOF —

также через 30 мс, значит, время заполнения корректно и не требует адаптивной компенсации. Но если снижение началось через 60 мс, то расчетное время заполнения слишком мало (гидроцилиндр не успел заполниться до конца) и МФ развил крутящий момент на 30 мс позже требуемого. А если снижение началось через 10 мс после EOF, то расчетное время слишком велико и крутящий момент МФ появился на 20 мс раньше требуемого. В обоих случаях необходима адаптивная компенсация ошибок времени заполнения.

Величина коррекции находится с помощью нелинейных зависимостей, графически представленных на рисунке 5 с. При малых ошибках применяется линия 336, при больших — 334, а при промежуточных — в заштрихованной зоне.

В реализуемую МСУ программу коррекции также входит алгоритм адаптивного управления заполнением гидроцилиндра, показанный на рисунке 6. Для краткости ограничимся расшифровкой только двух его блоков. Блок 422: «Время заполнения больше заданного?». Если «Да» — перейти к Блоку 424. Если «Нет» — вернуться в начало. Блок 424: установить флажок «Заполнение закончено», вернуться в начало.

Необходимым условием реализации технологии СТС является наличие полноценной МСУ. Процесс их создания повсеместно был достаточно длительным и, как оказалось, состоял из ряда типовых этапов, через которые прошли все участники с разным временным лагом. Яркий при-

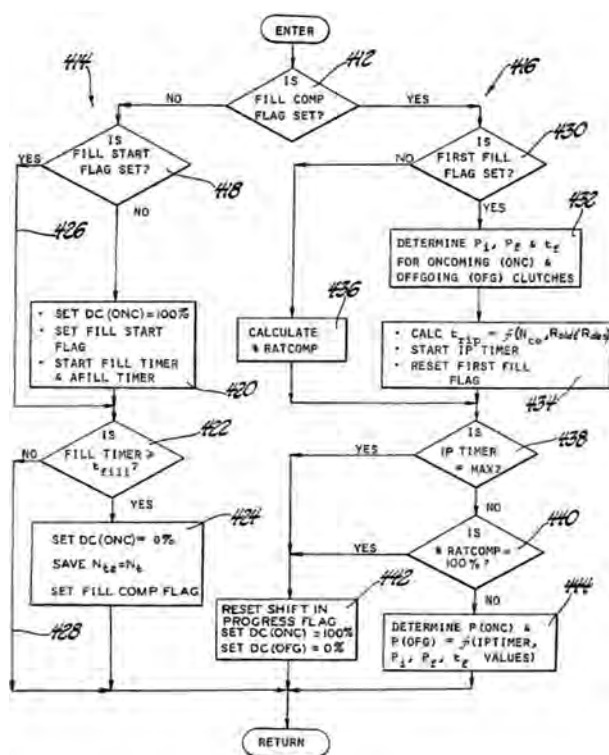


Рисунок 6 — Алгоритм адаптивного управления заполнением гидроцилиндра МФ [10]

Figure 6 — Algorithm of adaptive control of filling of the hydraulic cylinder of multi-disc clutch [10]

мер — путь компании Caterpillar, который подробно рассматривался в нашей работе [7]. Из десяти патентов за период с 1991 по 2011 год по данной теме, найденных нами, большинство так и называется: «End of fill detector for fluid operated clutch» (с небольшими различиями). Их количество и названия сами по себе — свидетельство того значения, которое компания придавала этой процедуре в процессе создания и доводки МСУ для объекта управления — тяжелых многоступенчатых АТ для карьерных самосвалов.

Все современные МСУ де-факто, а часто и по наименованию, являются *адаптивными*. Не исключение и системы контроля заполнения МФ. Среди них есть и патент компании Caterpillar с названием «Adaptive control method for automatic transmission» [11]. В нем представлен метод адаптивного управления заполнением МФ многоступенчатой ГМТ карьерного самосвала.

Здесь в процессе каждого переключения после определения момента EOF находят фактическое время заполнения МФ, которое складывается из трех фаз, показанных на рисунке 7 [11]: импульса высокого давления (pulse), спада (ramp), удержания (hold). Затем оно сравнивается со временем, полученным в предыдущем таком же переключении.

Полученное фактическое значение оценивается с помощью графика (не показан), на котором по оси абсцисс отложено время заполнения с отметками значений, оцениваемых как *желаемое* (вблизи центра координат), *хорошее*, *допустимое*. Между ними отмечены зоны максимума и минимума. В зависимости от того, в какую зону попадает это значение, принимаются соответствующие решения и алгоритмы действий. В частности, если оно попадает в зону «неприемлемая», то принимается решение о неправильном определении момента EOF, *которое по этой причине выполняется повторно*, и т. д. Пример корректировки параметров заполнения приведен на графике, показанном на рисунке 8 а. Видно, что фактическое EOF

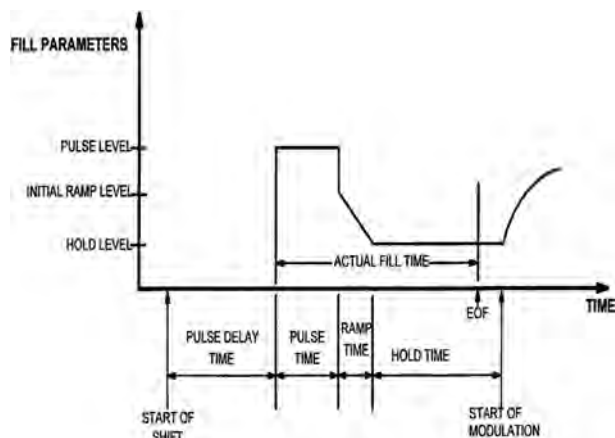


Рисунок 7 — К определению параметров процесса заполнения МФ [11]

Figure 7 — To the determination of the parameters of filling process of multi-disc clutch [11]

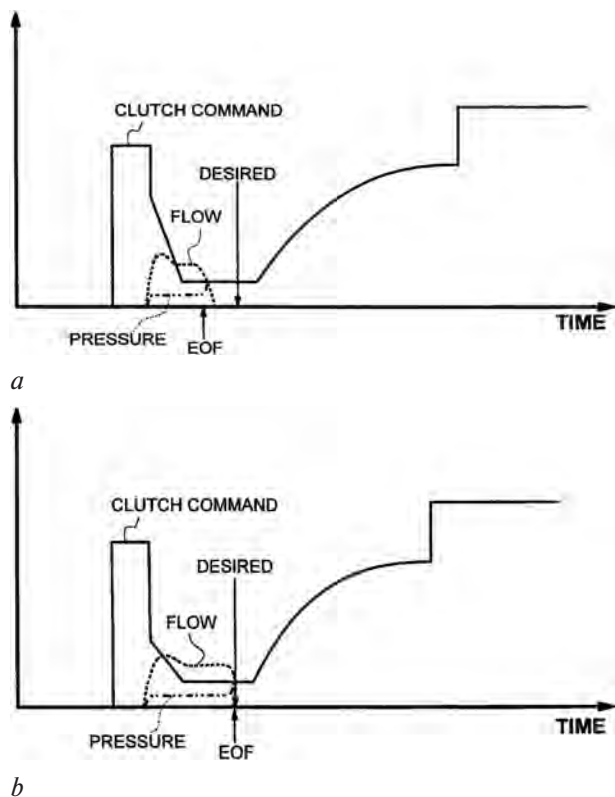


Рисунок 8 — К корректировке параметров заполнения МФ [11]

Figure 8 — To the correction of the parameters of filling the multi-disc clutch [11]

левее желаемого, т. е. время заполнения меньше заданного. Точками обозначены линии изменения расхода жидкости в МФ (flow, верхняя линия) и давления (pressure, нижняя линия). Видно, что раннее заполнение вызвано большим расходом жидкости, подаваемой в МФ в фазе удержания.

Если необходимо сохранить EOF без изменения, то при неизменной заданной длительности адаптация будет заключаться в таком понижении расхода жидкости, чтобы точка EOF на графике рисунка 8 б совместилась с отметкой «желаемое».

В числе последних патентов Кэтерпиллер по теме Fill time — устройство «Clutch end-of-fill detection strategy» [12]. Оно содержит двухкаскадные электрогидравлические регуляторы давления (ЭРГД) с ЭГК в пилотном каскаде и датчиком давления на выходе (по числу МФ).

Здесь, так же как и в предыдущих механизмах, используется остановка потока жидкости в гидролинии, соединяющей регулятор с МФ и выравнивание эпюры давления в ней. Учитывая сходство с описанными выше конструкциями, рассмотрим здесь только идентификацию EOF (подробнее см. [7]).

Остановка поршня и потока жидкости вызывает рост давления и срабатывание регулятора — настройку на величину начального давления (зона 42) для последующего его повышения. При этом возникает кратковременный пик давления на выходе ЭРГД и в гидроцилиндре. На рисунке 9, изображающем этот процесс, показана зона 41

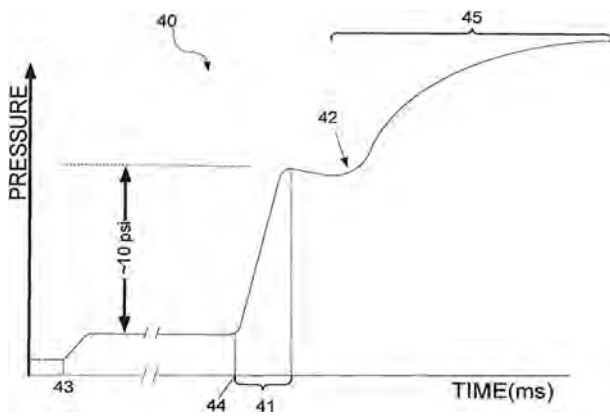


Рисунок 9 — К идентификации момента окончания заполнения по пику давления [12]

Figure 9 — To the identification of the moment of the end of filling on pressure peak [12]

возникновения пика, величина которого — 10 psi относительно давления заполнения в зоне 43–44. Затем давление несколько снижается в зоне 42. Электронный блок МСУ воспринимает и оценивает величину пика, принимает решение о наступлении EOF в конечной точке зоны 41 и где-то в зоне 42 подает команду на регулируемое увеличение давления в МФ в зоне 45.

На первый взгляд, по устройству система проста. Однако последующее описание в [12] условий ее практической реализации говорит об обратном.

В тексте говорится, что чем выше пик, тем легче его обнаружить, но тем жестче будет переключение. С другой стороны, от требуемых параметров датчика (диапазона, чувствительности и точности) существенно зависит его цена. Чем выше пик, тем она ниже. Но чувствительность должна быть такой, чтобы не было ложных срабатываний от шумов — колебаний давления в гидросистеме АТ, амплитуда которых в приведенном примере — до 5 psi. В данном случае принято, что датчиком служит реле давления (в тексте — switch). Оно должно реагировать на пик давления с максимальной амплитудой до 10 psi, длительностью до 4 мс и иметь быстроедействие, достаточное для реакции на такой сигнал. Частота опроса электронным блоком МСУ (loop time) должна обеспечить время реакции не более 2,5 мс, чтобы пик давления не оказался между тактами и был пропущен. Кроме того, могут возникнуть возмущения в гидросистеме, которые подавят этот пик, и EOF также будет утерян. Для таких случаев предусмотрено контрольное время (в данном случае указано 0,625 с), в течение которого отсутствие сигнала EOF будет считаться его пропуском. По истечении контрольного времени, как и после EOF, подается команда на повышение давления во включаемом МФ.

Компания Honda запатентовала устройство и метод управления работой МФ в АТ [13]. Оно содержит ЭГК и детектор для распознавания условий, наступающих в момент непосредственно перед началом работы МФ, на основе изменений

давления. Контроллер МСУ подает команду на повышение силы тока в ЭГК согласованно с сигналом детектора, что позволяет уменьшить время заполнения гидроцилиндра МФ за счет возможности поддержания высокого давления в фазе заполнения. Детектор содержит датчик давления.

В патенте General Motors 1993 года [14] при каждом переключении определяется длительность заполнения гидроцилиндра, скомпенсированная с учетом текущего значения производительности насоса и температуры жидкости. Время заполнения включаемого МФ АТ определяется в соответствии с эмпирическими величинами времени, записанными в памяти МСУ в виде таблиц (look-up tables), которые связывают влияние скорости насоса и температуры жидкости. Оно определяется для базового МФ и затем умножается на коэффициенты для каждого из требуемых. Влияние температуры на утечки жидкости также табулируется и вместе со скоростью насоса используется для определения его эффективной производительности при регулировании базового времени заполнения на малых скоростях. Жидкость, не успевшая полностью выйти из гидроцилиндра после предыдущего включения, также принимается во внимание.

Как видим, методы и конструкции устройств для определения времени заполнения и EOF на протяжении десятков лет совершенствуются вместе с самими АТ. Так, в последнем из патентов General Motors упомянутой выше группы предложен следующий принцип калибровки [15]. Во время движения автомобиля кратковременно определенным образом включают один из МФ, нормально выключенных на текущей ступени АТ. Одновременно анализируют сигнал ускорения выходного вала АТ, пропущенный через частотный фильтр. Появление небольшого снижения ускорения на записи отфильтрованного сигнала рассматривают как признак нормального заполнения и начала передачи крутящего момента данного МФ. При отклонениях проводится необходимая калибровка. Такая процедура может быть проведена со всеми МФ данной АТ.

«Болевая точка» 2. Калибровка АТ и МСУ в реальном масштабе времени. Это общепринятая в СТС процедура. Ее причины — неодинаковость размеров компонентов ГМП в пределах полей допусков, износ пакетов дисков в эксплуатации, замена ЭГК, пакетов дисков, различия характеристик ЭГК в состоянии поставки, неодинаковость настроек (усилий пружин) пропорциональных регуляторов давления МСУ, в том числе заменяемых при ремонтах. В связи с этим процесс калибровки включен в число основных функций МСУ и в процессе их развития в значительной степени автоматизирован.

Калибровка МФ, в частности, заключается в точном определении давления жидкости и силы тока, подаваемого на ЭГК МСУ в этом процессе.

Компания Komatsu создала собственную методику периодической калибровки многоступенчатой АТ карьерного самосвала, описанной, например, в [16], которая заключается в следующем.

Для характеристики давления, показанной на рисунке 10 а, на нейтрали АТ с заторможенным выходным валом подают на ЭГК какого-либо из выключенных МФ первый тестовый импульс тока, соответствующий высокому давлению. Затем его понижают до первой величины удержания (см. площадку 58 на рисунке 10 б) и удерживают на этой величине определенное время, после чего понижают ток до нуля (выключают МФ). При этом заполнение может не закончиться, если первая величина удержания недостаточна. Далее этот цикл повторяют, постепенно повышая площадку 58, и следят за скоростью ДВС или турбинного вала. Пока они не реагируют на повышение давления, заполнение не достигнуто. При появлении реакции фиксируют в памяти параметры данного цикла (время, ток и др.). Затем повторяют эту процедуру с другими МФ. Полученные данные заносятся в память МСУ.

Здесь в процессе калибровки используется только восходящая ветвь характеристики ЭГК для

исключения влияния ее гистерезиса на точность, так что решаются две задачи одновременно.

Если говорить о самой калибровке, то она, хоть и выполнялась с участием штатной МСУ, была непростой и достаточно трудоемкой. И, судя по всему, работы по ее совершенствованию продолжались на протяжении многих лет.

Так, в следующем патенте компании [17] указан основной недостаток представленной выше методики — необходимость остановки автомобиля для выполнения тестовых замеров. Предложен метод автоматической калибровки АТ, выполняемой МСУ при автоматических переключениях на высшие ступени в процессе разгона автомобиля и переключениях вниз на выбеге. Приведены ее алгоритмы и режимы. В тексте отмечается, что более трех десятков аналогов, указанных патентной экспертизой в процессе анализа новизны изобретения, эту задачу не решают.

В патентах известной американской компании Case [18, 19] отмечается, что калибровка времени заполнения особенно важна для высоконагруженных трансмиссий сельскохозяйственной техники — колесных тракторов, комбайнов. Они работают на режимах максимальной мощности, на которых имеют место интенсивные износы пакетов дисков МФ, что вызывает значительное, порой драматическое увеличение времени заполнения. Для них важно периодическое его измерение, выдача сигнала водителю и последующая корректировка в памяти МСУ, а в ряде случаев — практически непрерывный мониторинг. Патентуемое устройство такой калибровки содержит датчики давления во всех гидролиниях управления МФ. Однако в результате оно значительно усложняет конструкцию, стоимость МСУ, а также снижает надежность за счет самих датчиков давления. В связи с этим для машин с более легкими режимами, где достаточна периодичность калибровки, например, два-три месяца, предлагался вариант со съемным (переносным) устройством, которое может иметь только один датчик давления, поочередно подключаемый к фрикционам в процессе калибровки.

«Болевая точка» 3. Прецизионные электрогидравлические клапаны (ЭГК). В подавляющем большинстве МСУ АТ в качестве интерфейса между электроникой и механикой АТ применяются ЭГК (и только в АМТ могут быть электропневматические). При этом во всех АТ функции одинаковы, что открыло широчайшие возможности для их унификации. Если учесть, что АТ выпускаются десятками миллионов, а в каждой из них в среднем хотя бы по пять ЭГК, то очевидно, что это объекты специализированного массового производства. Самая распространенная конструкция ЭГК (с параметрами для пилотных каскадов МСУ) — картридж в виде неразборного герметичного корпуса цилиндрической формы, содержащего электромагнит и клапан, а также хвостовик

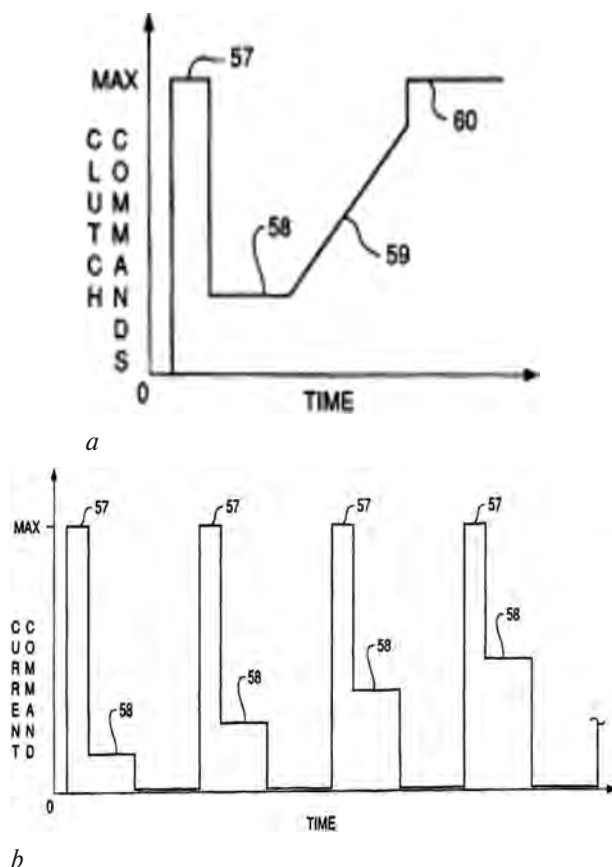


Рисунок 10 — К методологии калибровки фрикционов ГМП:
а — типовая характеристика давления включения фрикциона;
б — последовательность калибровки с помощью тестовых импульсов МСУ [16]

Figure 10 — To methodology of calibration of frictions of hydromechanical transfer: а — typical characteristic of pressure of inclusion of a clutch; б — sequence of calibration by means of test pulses of mechatronic control system [16]

с кольцевыми уплотнениями для унифицированного соединения с гидросистемой АТ.

К конструкции ЭГК предъявляются высочайшие требования, обусловленные спецификой его применения. Главные из них — прецизионная точность и быстродействие [4], необходимые для выполнения алгоритмов. Таким образом, можно говорить, что возможности МСУ ограничены этими качествами ЭГК. С другой стороны, необходима высокая надежность и долговечность ЭГК, так как их внезапные отказы весьма опасны с точки зрения безопасности движения. Все это значительно повышает сложность и ответственность их производства, а значит, и стоимость.

Точность воспроизведения задаваемого МСУ закона изменения выходного давления жидкости от силы тока зависит, в частности, от сопротивления перемещения якоря электромагнита и золотника клапана. Поэтому, как известно, существует гистерезис между восходящей и нисходящей ветвями этой характеристики. Мало того, было обнаружено, что его ширина может еще зависеть от величины давления (точки на восходящей ветви), с которой начинается снижение (рисунок 11) [20].

Известны различные меры снижения гистерезиса ЭГК, а также учета реальной характеристики путем ее внесения в память МСУ, вплоть до кривых на рисунке 11. И здесь «наступает» *«болевая точка»* 3. Дело в том, что такие характеристики обычно снимаются на стендах в лабораторных условиях, где жидкость в ЭГК подается от стационарной гидросистемы под постоянным давлением. Но в реальной гидросистеме давление во время переключения падает, и часто весьма значительно, особенно в тяжелых автомобильных и тракторных АТ. Более того, после остановки поршня, включаемого МФ, оно повышается до прежней величины, причем процесс может быть колебательным. И именно в этот момент должен сработать ЭГК. Вообще для таких гидросистем характерна пульсация давления. О какой прецизионной точности может идти речь, если давление питания ЭГК

здесь не соответствует проектному номиналу? Кроме того, в современных АТ также популярна модуляция главного давления в зависимости от режима движения.

По этим причинам обеспечивают стабилизированное давление питания ЭГК от отдельных регуляторов давления. Другое дело, что это усложняет конструкцию механизма управления и препятствует применению упрощенных *секционных* конструкций, состоящих из «голых» двухкаскадных картриджей с ЭГК в пилотном каскаде. Мы не приводим здесь схемы МСУ со стабилизированным питанием (а это, например, все GMT General Motors — Allison) ввиду больших объемов их описаний.

Есть еще одна проблема, которая обострилась сравнительно недавно. Это чувствительность клапанов ЭГК к засорению, что предопределяет высокие требования к чистоте рабочей жидкости, а значит, к ее надежной фильтрации на протяжении всего срока службы АТ.

С этой точки зрения чрезвычайно важен выбор типа клапанов ЭГК. Есть два основных типа: золотниковые и шаровые (или плоские). Первые — это пропорциональные регуляторы давления с регулированием настройки посредством электромагнита, которые могут применяться как в пилотных каскадах двухкаскадных ЭГК, так и в однокаскадных. Их особенности — прецизионные зазоры в золотниковой паре (в пределах 10...20 мк), а также очень малые осевые усилия, действующие на золотник в процессе регулирования давления. Все это в сумме делает их чрезвычайно требовательными к чистоте.

Шаровые малогабаритные пилотные клапаны (с диаметром шара не более 4...5 мм) не имеют прецизионных зазоров и поэтому несравненно надежней. Но зато у них единственный режим — дискретный (включено-выключено). Для получения пропорционального режима здесь применяют режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ), хотя он и влечет за собой зависимость от температуры (вязкости жидкости) и несущей частоты ШИМ.

Но в стремлении к увеличению экономии топлива начали активно расширять зону работы легковых АТ с заблокированным гидротрансформатором вплоть до низших ступеней, что исключило на этих режимах демпфирование им крутильных колебаний ДВС. Для компенсации ввели в ступицу фрикциона блокировки пружинный демпфер, но этого оказалось недостаточно. И тогда дополнительно ввели на части режимов неполную блокировку, т. е. буксование фрикциона с малой скоростью. А в эксплуатации вдруг выяснилось, что если на этих режимах начнется быстрый износ фрикциона, то объем продуктов износа его накладки, превышающий емкость фильтра тонкой очистки, проникнет во все ЭГК и золотниковые пары, что выведет АТ из строя.

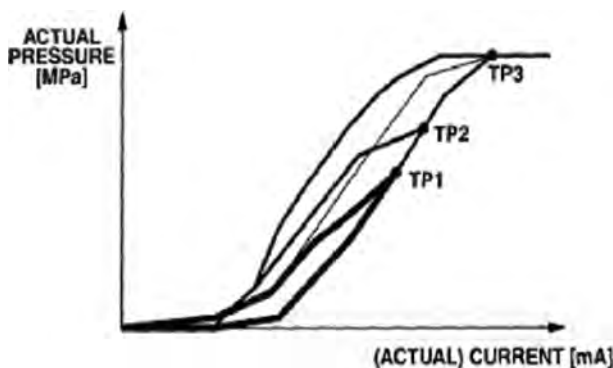


Рисунок 11 — Влияние гистерезиса на характеристику ЭГК управления усилием сжатия дисков МФ АТ [20]

Figure 11 — Effect of hysteresis on the characteristic of electrohydraulic valves for controlling the compression force of the discs of the multi-disc clutch of the automatic transmission [20]

Очевидный вывод: правильный выбор конструкции и обеспечения инфраструктуры функционирования ЭГК на этапе проектирования с учетом всех особенностей назначения, производства и эксплуатации имеет важное значение для получения не только высокого качества процессов переключения, но и надежности и долговечности самой АТ.

Заключение. Технология СТС обеспечивает высокое качество переходных процессов в силовых установках с АТ. Однако на многочисленных примерах из опыта ведущих мировых компаний показано, что названные болевыми точками стадии алгоритмов бортового управления действительно являются критическими по их влиянию на качество переключений. Ибо отступления от точного определения момента остановки поршня, своевременной полноценной калибровки МСУ и компонентов АТ, создания условий для точной работы ЭГК приводят к ухудшению показателей вплоть до дезорганизации процесса.

Конечно, это необходимые и даже первоочередные условия, но не единственные. Ведь СТС — это одна из шести базовых технологий, входящих в мультидисциплинарный научно-технический комплекс теории и техники управления АТ.

Какова же цена вопроса — что же применять? Во всяком случае, с учетом приведенной информации представляется совершенно очевидным, что применение линейных характеристик не может обеспечить хотя бы удовлетворительную плавность переключений.

Также представляется, что анализ «болевых точек» алгоритмов управления МФ (впервые в русскоязычном изложении) будет полезен специалистам.

Список литературы

1. Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application: 2nd ed. / H. Naunheimer [et al.] // Springer Heidelberg. — 2010. — 742 p. — DOI 10.1007/978-3-642-16214-5.
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 машино-

- строения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2017. — Вып. 6. — С. 66–75.
3. 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.
4. Красневский, Л.Г. Прецизионное управление автоматическими трансмиссиями: итоги 50 лет развития / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 4(33). — С. 5–13.
5. Zongxuan, S. Challenges and Opportunities in Automotive Transmission Control / S. Zongxuan, H. Kumar // American Control Conference, Portland, OR, USA, June 8–10, 2005 // General Motors Corp. Research and Development Center. — 2005. — Pp. 3284–3289.
6. Control method of clutch-to-clutch powered downshift in an automatic transmission: pat. US 5029494, USA / General Motors Corp. — Publ. date: 09.07.1991.
7. 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.
8. Transmission and control with shift timing devices: pat. US 3754483, USA / General Motors Corp. — Publ. date: 28.08.1973.
9. Control device and control method for transmission with clutch: pat. US 6088645, Japan / Komatsu Ltd. — Publ. date: 11.07.2000.
10. Adaptive direct pressure shift control for a motor vehicle transmission: pat. US 4707789, USA / General Motors Corp. — Publ. date: 17.11.1987.
11. Adaptive control method for automatic transmission: pat. US 5551930, USA / Caterpillar Inc. — Publ. date: 03.09.1996.
12. Clutch end-of-fill detection strategy: pat. US7909733, USA / Caterpillar Inc. — Publ. date: 22.05.2011.
13. Apparatus for and method of controlling hydraulic clutch operation in an automatic transmission: pat. US 4942787, USA / Honda Giken Kogyo K.K. — Publ. date: 24.07.1990.
14. Compensated control method for filling a fluid-operated automatic transmission clutch: pat. US 5216606, USA / General Motors Corp. — Publ. date: Jun 01.06.1993.
15. Clutch capacity detection systems and methods: pat. US 9746073B2, USA / GM Global Technology Operations LLC. — Publ. date: 29.08.2017.
16. Method of calibrating clutches in a transmission: pat. US 5737979, USA / Caterpillar Inc. — Publ. date: 14.04.1998.
17. Calibration system for hydraulic transmission device: pat. US 7731630, USA / Caterpillar Inc. — Publ. date: 08.06.2010.
18. Clutch fill rate calibration apparatus and method: pat. US 6626036, USA / Case Corp. — Publ. date: 30.09.2003.
19. Method and apparatus for calibrating clutch fill rate: pat. US 5853076, USA / Case Corp. — Publ. date: 29.12.1998.
20. Fluid pressure control apparatus/process: pat. US 8150555, USA / Jatco LTD. — Publ. date: 03.08.2012

KRASNEVSKIY Leonid G., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng.
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 01 August 2019.

AUTOMATIC TRANSMISSIONS: “PRESSURE POINTS” OF CONTROL ALGORITHMS OF “CLUTCH-TO-CLUTCH SHIFTS” TECHNOLOGY

The previous publications of the author show that the foundations of modern theory and technology of automatic transmission control can be summarized in the form of a single multidisciplinary complex consisting of six

interrelated basic technologies. The widely used “Clutch-to-Clutch Shifts” (CTC) technology is among them, which provides high quality transient processes of vehicles with modern automatic transmissions. It is provided by the use of a complex of special algorithms for controlling the transmission clutches when switching its stages. In the process of their implementation, the key points are the points at which decision-making has a significant impact on the subsequent process up to the possibility of its disorganization, called therefore “pressure points”. This is, first of all, the identification of the moment of stopping the clutch piston in the process of switching and calibration of the transmission and mechatronic control system, as well as the choice of precision electrohydraulic actuators. Based on the analysis of a large volume of patents and scientific publications, the analysis of methods is given for solving these problems used by the world’s leading manufacturers of automatic transmissions.

Keywords: mobile machines, automatic transmissions, mechatronic control systems, “Clutch-to-Clutch Shifts” technology of switching stages

References

1. Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. *Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application*. Heidelberg, Springer, 2010. 742 p.
2. 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* [Topical issues of mechanical engineering], 2017, iss. 6, pp. 66–75.
3. 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]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2018, no. 1(42), pp. 5–13.
4. Krasnevskiy L.G., Poddubko S.N. Pretsizionnoe upravlenie avtomaticheskimi transmissiyami: itogi 50 let razvitiya [Precision control of automatic transmissions: the summary of 50 years’ development]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 4(33), pp. 5–13.
5. Zongxuan S., Kumar H. Challenges and Opportunities in Automotive Transmission Control. *Proc. American Control Conference*. Portland, 2005, pp. 3284–3289.
6. Lentz C.A., Hunter J.H. *Control method of clutch-to-clutch powered downshift in an automatic transmission*. Patent USA, no. 5029494, 1991.
7. Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii. Tekhnologiya “Clutch-to-Clutch Shifts”: praktika primeneniya [Automatic transmissions. “Clutch-to-Clutch Shifts” technology: practical application]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2018, iss. 7, pp. 48–59.
8. Edmunds J. *Transmission and control with shift engagement timing devices*. Patent USA, no. 3754483, 1973.
9. Kawasaki N., Kuse T., Shibata A. *Control device and control method for transmission with clutch*. Patent USA, no. 6088645, 2000.
10. Downs R.C., Nitz L.T., Wanamaker J.L. *Adaptive direct pressure shift control for a motor vehicle transmission*. Patent USA, no. 4707789, 1987.
11. Creger T.D., League R.B., Mitchell R.M., Spurlock D.M., Talbott J.R., Williamson G.L. *Adaptive control method for automatic transmission*. Patent USA, no. 5551930, 1996.
12. Imediegwu Ch. *Clutch end-of-fill detection strategy*. Patent USA, no. 7909733, 2011.
13. Aoki T., Terayama S., Iwaki Yo., Sekine N., Shimada H., Takemasa N., Miyake J. *Apparatus for and method of controlling hydraulic clutch operation in an automatic transmission*. Patent USA, no. 4942787, 1990.
14. Lentz C.A., Long Ch.F. *Compensated control method for filling a fluid-operated automatic transmission clutch*. Patent USA, no. 5216606, 1993.
15. Whitton M.D., Stockdale T.R., Igel A.P., Wilke N.E. *Clutch capacity detection systems and methods*. Patent USA, no. 9746073B2, 2017.
16. McKenzie Ph.C., Kajjam A.K. *Method of calibrating clutches in a transmission*. Patent USA, no. 5737979, 1998.
17. League R.B., Grove J.A., Kabrich T.R. *Calibration system for hydraulic transmission device*. Patent USA, no. 7731630, 2010.
18. Milender J., Johnson B. *Clutch fill rate calibration apparatus and method*. Patent USA, no. 6626036, 2003.
19. McKee K.D., Eike C.R., Stoeve G.T. *Method and apparatus for calibrating clutch fill rate*. Patent USA, no. 5853076, 1998.
20. Hinami T., Morita Yo. *Fluid pressure control apparatus/process*. Patent USA, no. 8150555, 2012.