



ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 62-235

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

главный научный сотрудник¹

E-mail: krasnevski_l@tut.by

А.В. БЕЛЕВИЧ

директор научно-инжинирингового центра «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин» — заведующий лабораторией бортовых мехатронных систем мобильных машин¹

E-mail: belevich2005@yandex.by

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

Поступила в редакцию 05.09.2017.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ: ТЕХНОЛОГИЯ «CLUTCH-TO-CLUTCH SHIFTS» — ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Рассматривается современное состояние технологии управления переходными процессами в автоматических трансмиссиях (АТ) и интегрированных силовых установках с АТ путем согласованного управления буксующими фрикционными без разрыва потока мощности. Приведены этапы развития, раскрывающие логику совершенствования технологии в целом, ее основные отличия от предшествовавших. Рассматриваются основные компоненты (фазы переходного процесса переключения ступеней АТ, идентификация момента остановки поршня фрикциона, характеристики комплексов алгоритмов, принципов прецизионного управления и др.). На основе анализа большого объема зарубежных публикаций обобщены результаты, полученные ведущими мировыми производителями АТ по данному направлению. В русскоязычном изложении они в основном публикуются впервые и в совокупности рассматриваются в статье как сложившаяся новая базовая технология управления АТ — «технология СТС» (в оригинале — технология «Clutch-to-Clutch Shifts»).

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

Введение. В последнем десятилетии наблюдается быстрый рост применения силовых установок мобильных машин с автоматическими трансмиссиями (АТ) в составе привода к ведущим колесам автомобиля, который в последние годы распространяется и на тяжелые грузовые. Эти успехи во многом достигнуты благодаря развитию теории и техники управления, которые, наряду с экономией топлива, обеспечивают высокое качество быстропротекающих переходных процессов в силовых установках при переключениях ступеней АТ в условиях массовой эксплуатации.

Анализ научных публикаций, патентов и другой информации показывает, что к настоящему времени сложились основы теории и техники управления АТ, которые создавались на протяжении трех последних десятилетий. Они едины прак-

тически для всех типов АТ, несмотря на кардинальные различия их массогабаритных и других параметров, и могут рассматриваться как сложный мультидисциплинарный комплекс. Его структура, в нашем представлении, состоит из шести взаимосвязанных базовых технологий [1]. Среди них — широко применяемая технология «Clutch-to-Clutch Shifts» (далее сокращенно СТС — по начальным буквам первых трех слов, в дословном переводе — «Переключения от фрикциона к фрикциону»), занимающая среди них центральное место.

Данная работа посвящена технологии СТС. Ныне это общепринятая базовая технология управления трансмиссиями в обычных и перспективных интегрированных силовых установках, которая обеспечивает плавное (без рывков, ударов и шумов) переключение ступеней АТ без разрыва пото-

ка мощности от двигателя (далее ДВС) к ведущим колесам посредством согласованного управления участвующими в переключении многодисковыми фрикционами (входящими практически во все типы АТ). Рассматриваются основные ее компоненты, а также этапы развития, раскрывающие логику совершенствования технологии в целом.

Из истории. Управление многодисковым фрикционом изначально было и остается самой сложной из комплекса задач управления АТ. Одна из первопричин — переходные процессы в гидросистеме АТ. Тяжелые гидромеханические трансмиссии (ГМТ) имеют мощные гидростанции и нажимные гидроцилиндры фрикционов с усилием до нескольких тонн. Если объем гидроцилиндра хотя бы 0,5 литра, то для его заполнения за 0,5 секунды необходимо подавать жидкость со скоростью 60 л/мин. Во время движения свободного поршня давление в гидроцилиндре невелико. При его остановке (упоре в пакет дисков) оно мгновенно выравнивается по всей гидролинии управления, возрастая до величины давления насоса, что может вызывать в ней гидравлический удар. При этом возникают колоссальные динамические нагрузки всей трансмиссии, многократно превышающие максимальный крутящий момент ДВС.

Для их парирования устанавливают гидравлические механизмы плавного включения [2]. Как правило, это золотниковые регуляторы давления с переменной настройкой. Место для их подключения — только на входе гидролинии. Ее гидравлическое сопротивление создает значительный перепад давления между входом и заполняемой полостью гидроцилиндра. Это создает ряд проблем, из которых отметим главную: регулятор реагирует на выравнивание давления в гидролинии уже после остановки поршня, т. е. с некоторым запаздыванием. Единственный способ устранения проблемы — управление регулятором с упреждением таким образом, чтобы предотвратить заброс давления. Но это стало практически возможным только с помощью мехатронных систем управления (МСУ) с цифровой электроникой (см. далее).

Пока же, в 50–60-х годах, переключения ступеней тяжелых ГМТ с ручным управлением были жесткими — сопровождалась сотрясением многотонных груженых машин и слышимыми ударами. Хотя и сами гидравлические механизмы постепенно совершенствовались. Лучший пример из области тяжелых ГМТ — электрогидравлическая система ручного (командного) управления для ГМТ 6+1 модели DP8961 (1972 год) компании Detroit Diesel Allison корпорации General Motors (по патенту США 1971 года [3]) на мощность до 1050 л. с. [4]. Механизмы плавности здесь обеспечивали также задержку падения давления в гидроцилиндре выключаемого фрикциона, т. е. «перекрытие». Вскоре для этой трансмиссии впервые был создан электронный аналоговый блок автоматического

управления SPG (Shift Pattern Generator) — МСУ General Motors первого поколения.

В 1980 году компания Allison объявила о создании АТ 6+1 (ГМТ) модели CLBT9680 на мощность до 1350 л. с. для карьерных самосвалов грузоподъемностью 170 т [4]. Там же были приведены сравнительные экспериментальные данные о долговечности обеих — DP8961 и CLBT9680. При работе на максимальной мощности ресурс первой составляет 3000–5000 часов с ручным управлением, 5000–9000 часов с автоматическим управлением; второй (автоматической) — уже 9000–12 000 часов. Отмечалось, что повышение ресурса (и топливной экономичности) при автоматизации первой из них получено за счет повышения точности и исключения ошибок водителя.

В 1986 году компания Allison объявила о замене с января 1986 года на ГМТ внедорожных автомобилей аналоговой системы SPG цифровой системой АТЕС (Allison Transmission Electronic Control), которая была создана в 1983 году. Система SPG за прошедшее время продемонстрировала ряд преимуществ электроники перед гидроавтоматикой. Система АТЕС, по сравнению с SPG, наряду с повышением качества и точности управления, снижает стоимость и повышает долговечность и надежность самой системы и ГМТ в целом. Внедрению предшествовали испытания, в частности, на 75 автобусах с ГМП V731, где была получена экономия топлива 5 % по сравнению с серийной гидроавтоматикой. Основу АТЕС составлял микрокомпьютер, созданный специально для применения на автомобилях и известный под названием GMCM (General Motors Custom Microcomputer) [5].

Следует отметить, что в дальнейшем данная электрогидравлическая система применялась (с модернизацией) на ГМТ серий 8000, 9000 до 2000 года и позднее.

Единственным видом массовых АТ легковых автомобилей в 60-х годах были трех-четырёхступенчатые планетарные ГМП с гидравлической автоматикой. Для улучшения плавности переключений в них наряду с гидравлическими устройствами применялись механизмы свободного хода (МСХ), которые при изменении знака подводимого крутящего момента автоматически заклиниваются или расклиниваются. В момент срабатывания МСХ скорости его ведущих и ведомых элементов уравниваются, что обеспечивало синхронное безударное переключение. Но по размерам МСХ сопоставим с фрикционом, что приводило к увеличению габаритов АТ. Только появление МСУ позволило отказаться от МСХ и перейти к организации процесса переключений с управляемой передачей крутящего момента «от фрикциона к фрикциону». Компания General Motors представила на конгрессе SAE в 2002 году новую технологию управления переключениями без МСХ

(«*The non-freewheeler shift control technology (clutch-to-clutch shift)*») как ключевой инструмент получения компактных, легких и недорогих конструкций АТ, особенно при значительном увеличении у них числа ступеней [6].

Это в конечном счете и породило общепринятый ныне термин «Clutch-to-Clutch Shifts».

Технология СТС применяется в последних поколениях МСУ АТЕС тяжелых GMT Allison (с 2012 года выпускается система пятого поколения).

Таким образом, прогресс МСУ является одним из ключевых слагаемых развития АТ, и в том числе управления буксованием фрикционных пар, воплощенного в технологии СТС.

Краткая характеристика этой технологии в числе других технологий комплекса управления переходными процессами силовых установок дана в упомянутой выше нашей работе [1]. Ее основные глобальные отличия от предшествующих заключаются в следующем.

1. Типовой переходный процесс переключения ступеней состоит из следующих фаз (в терминах, общепринятых в англоязычных публикациях):

- Fill Time (подготовительная фаза — заполнение гидроцилиндра включаемого фрикциона с определением его длительности);
- Torque Phase (фаза крутящего момента);
- Inertia Phase (фаза инерции).

В отношении фаз инерции и крутящего момента имеется в виду, что в различных видах переключений необходимо тормозить либо, наоборот, разгонять ДВС и связанные с ним инерционные массы. Соответственно, эти фазы в реальных процессах могут меняться местами.

2. Основные типы процессов — переключения вверх и вниз под нагрузкой и без нее.

3. Изменение законов и алгоритмов управления в зависимости от типов, режимов и фаз процессов переключения.

4. Прецизионное управление — необходимое условие, распространяющееся на все аппаратно-программные средства МСУ на всех стадиях процессов переключения.

5. Идентификация момента остановки поршня гидроцилиндра включаемого фрикциона («Kiss point») — окончания времени заполнения («Fill time») — обязательный элемент прецизионного управления.

Практическое применение технологии СТС в современных силовых установках с АТ показано в [1]. Ниже подробнее рассматриваются ее отличия, перечисленные выше.

Подготовительная фаза. Идентификация момента остановки поршня. Начать, очевидно, нужно с этой процедуры, поскольку именно она, судя по оценкам, является главным источником неточностей. Сложность в том, что невозможно в процессе каждого переключения точно измерять величину хода поршня каждого фрикциона АТ для иденти-

фикации момента его остановки. Вместо этого, как уже отмечалось выше, анализируют гидравлические переходные процессы в гидролиниях управления во время заполнения гидроцилиндра.

Влияние данной процедуры на качество всего процесса в публикации сотрудников компании General Motors [7] иллюстрируется графиком, показанным на рисунке 1. Жирными линиями здесь обозначена последовательность изменения давления в гидроцилиндре фрикциона, в том числе и времени заполнения, задаваемая алгоритмами управления. По его истечении операция считается законченной, и подается следующая команда на повышение давления по линии «Correct fill». При отклонениях от заданного времени может произойти раннее либо позднее заполнение (кривые «Over fill» и «Under fill»). При раннем заполнении включаемый фрикцион начинает работать раньше, чем предусмотрено при расчетном перекрытии. Это, в частности, вызывает притормаживание механизма АТ и преждевременное падение скорости ДВС. При позднем заполнении, наоборот, возможен кратковременный выход на нейтраль с возрастанием скорости ДВС, которую затем необходимо погасить за счет буксования того же фрикциона.

Какая же команда подается по истечении заданного (расчетного) времени (на рисунке 1 — «Commanded Fill Time»)? Она запускает процесс согласованного управления буксованием обоих фрикционов, показанный на рисунке 2 (патент General Motors (Allison) 1991 года, посвященный методу СТС — переключениям вниз под нагрузкой в тяжелой гидромеханической АТ [8]). Здесь даны графики изменения задаваемых и фактических скоростей буксования (slip) выключаемого фрикциона (верхний) и турбины гидротрансформатора (нижний). Оси абсцисс соответствуют времени процесса, оси ординат — скоростям. По окончании заполнения включаемого фрикциона управляют буксованием выключаемого так, чтобы скорость турбины гидротрансформатора (предварительно разблокированного) изменялась по про-

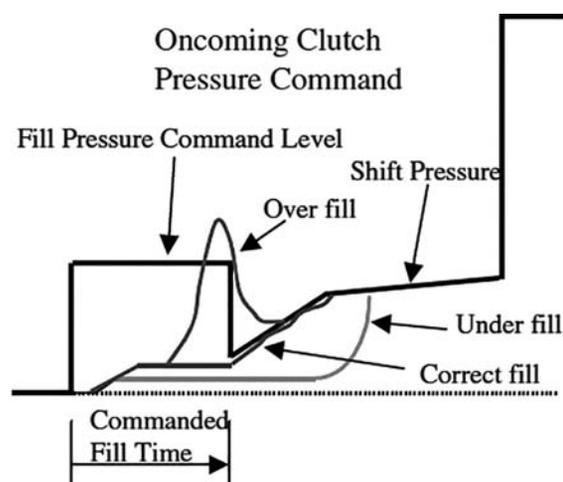


Рисунок 1 — Вариации заполнения включаемого фрикциона [7]

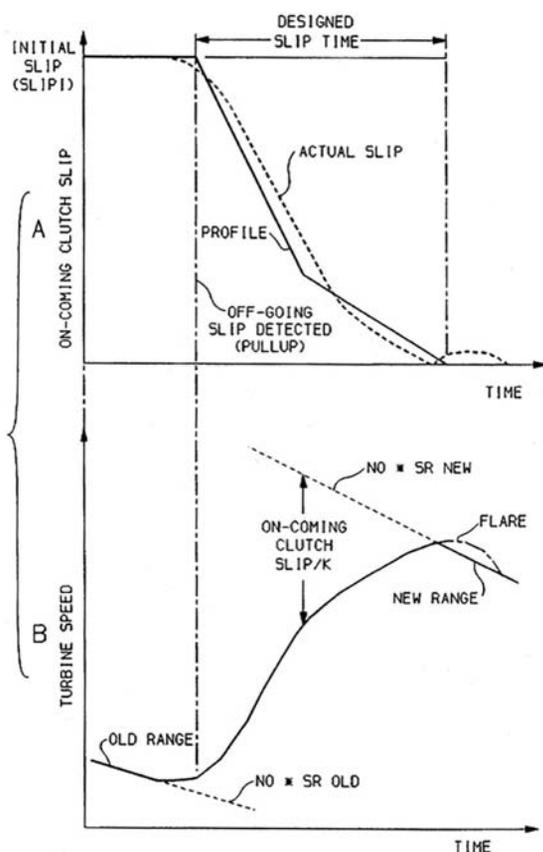


Рисунок 2 — Управление буксованием выключаемого фрикциона [8]

филю, показанному на нижнем графике, с учетом разницы статического и динамического коэффициентов трения его дисков.

Сигналом для запуска процесса является идентификация момента начала изменения скорости турбины (вертикальная штрих-пунктирная линия). На разных участках кривой применяются различные алгоритмы управления. При достижении скорости турбины, соответствующей синхронизации элементов выключаемого фрикциона (буксование которого также вычисляется), переходят к выполнению алгоритмов следующего этапа.

Из изложенного очевидно, что значимые отклонения от расчетного профиля процесса приводят к его дезорганизации. Поэтому все ведущие компании разработали собственные методы и алгоритмы точного определения длительности и окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона рабочей жидкостью, основанные на разных принципах (патенты компаний Toyota [9], Ford [10] и др.).

В основе многих известных решений лежат записанные в постоянной памяти МСУ таблицы эмпирически выбранных длительностей заполнения рабочих объемов гидроцилиндров всех фрикционов АТ. В патенте General Motors [11] отмечают их недостатки, обусловленные влиянием ряда неизмеряемых (так в оригинале) факторов. Предложен метод адаптивного управления временем заполнения на основе его вычисления по факти-

ческому расходу жидкости с помощью математической модели гидросистемы и сравнения с эталонным. Далее вносится коррекция в таблицы при последующих переключениях с учетом aberrации скорости входного вала АТ в момент окончания заполнения.

Показанная на рисунке 1 прямоугольная форма команды (давления) на этапе заполнения дана схематически. В действительности, зная заранее оптимизированную величину времени заполнения, при подходе к его окончанию так управляют давлением, чтобы исключить удар в соответствии с упомянутым выше принципом упреждения.

Судя по публикациям, поиски путей совершенствования методов идентификации «Fill Time» продолжаются [12].

Фазы инерции и крутящего момента. Наличие этих фаз — объективно существующее свойство процесса переключения АТ, которое к настоящему времени детально изучено и широко используется в технологии СТС. В качестве объекта для их рассмотрения выбрана публикация компании Toyota, в которой имеется графическая визуализация процесса [13]. В ней представлена технология интегрированного управления ДВС и АТ, которая была реализована в новой восьмиступенчатой АТ AA80E для автомобиля Lexus модели LS460. В ее основе — адаптированная к интегрированным силовым установкам технология СТС, которая обеспечивает безударные переключения (подробнее см. [1]). Это достигнуто благодаря «драматическому улучшению управляемости актюаторов» (так в оригинале), что служит подтверждением применения прецизионного управления, упомянутого в п. 4 (см. выше).

Изложенный в данной работе метод визуализации математических зависимостей для определения нагрузок на элементах АТ в фазах инерции и крутящего момента иллюстрируется рисунком 3. Здесь представлены графики таких зависимостей при переключении с I на II ступень в соответствии со следующими формулами (сохранена их нумерация в оригинале, так как она повторяется на рисунке 3):

$$T_o = (3,9206) \cdot T_t + (-1,8823) \cdot T_{B1}; \quad (23a)$$

$$T_{B1} = (0,76553) \cdot T_t; \quad (24)$$

$$T_o = (0,0688) \cdot T_t + 3,1493 \cdot T_{B1}, \quad (27)$$

где T_t , T_o и T_{B1} — крутящие моменты на входном и выходном валах АТ, а также на фрикционе B1 (см. кинематическую схему АТ на рисунке 4 и порядок включения ее фрикционов в таблице).

Данные расчетные формулы — результат решения системы дифференциальных уравнений динамики переключения при подстановке параметров АТ. Уравнение (23a) соответствует фазе инерции, уравнение (27) — фазе крутящего момента.

На графике рисунка 3 шкала оси абсцисс — входной крутящий момент в ньютонметрах,

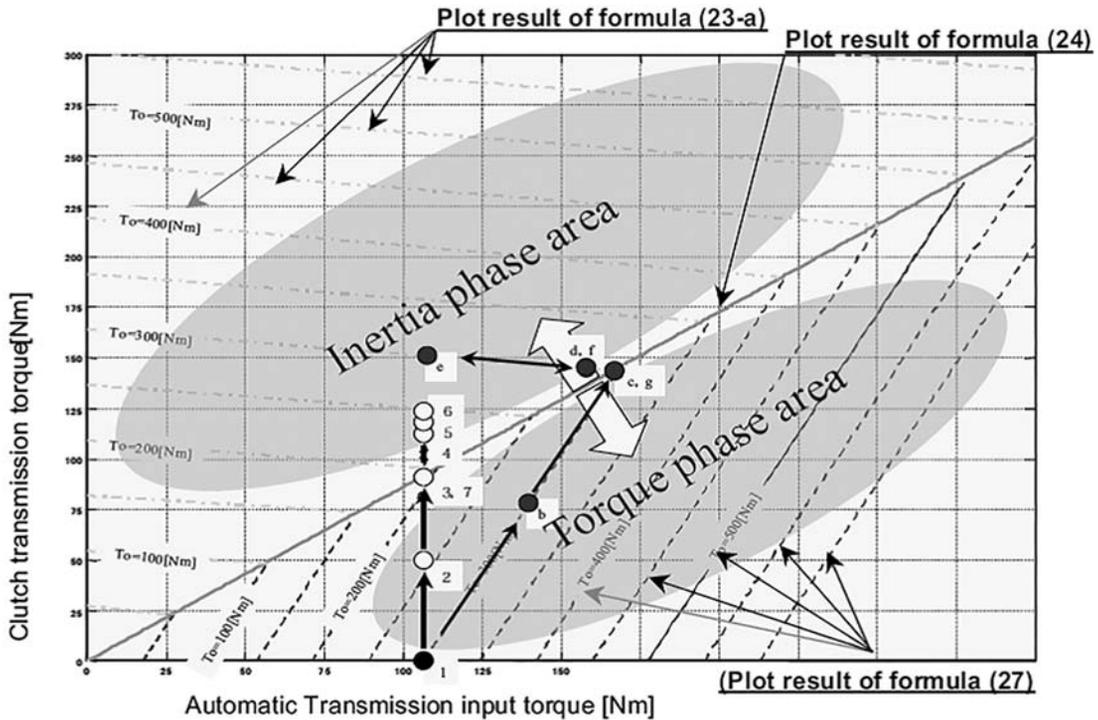


Рисунок 3 — Визуализация фаз процесса СТС для случая переключения с первой на вторую ступень АТ АА80Е [13]

шкала оси ординат — крутящий момент (момент трения) фрикциона. Здесь нанесены две сетки параллельных прямых в соответствии с формулами, номера которых, показанные пучками стрелок, соответствуют приведенным выше в тексте. Прямые проведены с шагом изменения T_o , равным 50 Нм; пунктирные соответствуют зоне крутящего момента, а штрих-пунктирные — зоне инерции.

Формула (24) соответствует расчетному моменту, который должен передавать включаемый

фрикцион В1 при завершении фазы крутящего момента. Он изображается жирной наклонной прямой, разделяющей график на зоны.

Два варианта управления в процессе переключения представлены на данном графике в виде траекторий рабочей точки, изображающей текущие параметры режима силовой установки. Оба варианта начинаются с точки 1 на оси абсцисс при входном моменте чуть выше 100 Нм. Траектория обычного варианта отмечена светлыми пронумерованными кружками 1...8, нового — черными кружками с буквенными обозначениями *a...g*. В [13] показано, что новый вариант обеспечивает постоянство момента на выходном валу АТ в процессе переключения — в данном случае это 300 Нм.

Анализ многочисленных публикаций показывает, что величина и соотношение длительностей фаз инерции и крутящего момента варьируются в широких пределах в зависимости от параметров конкретных процессов. Это хорошо видно на рисунке 5, где представлены результаты моделирования четырех типовых процессов переключений ступеней шестиступенчатой планетарной АТ легкового автомобиля [14].

Об алгоритмах прецизионного управления в технологии СТС. Статус прецизионного управления распространяется на все компоненты МСУ — механические, электронные и информационные (алгоритмические и программные). И следует отметить, что именно последним в основном посвящены многочисленные зарубежные публикации о технологии СТС. Вопросы развития прецизионного управления АТ рассматривались в нашей работе [15].

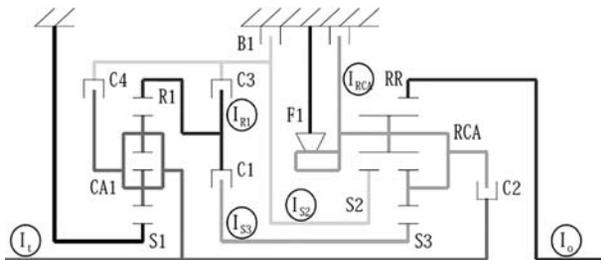
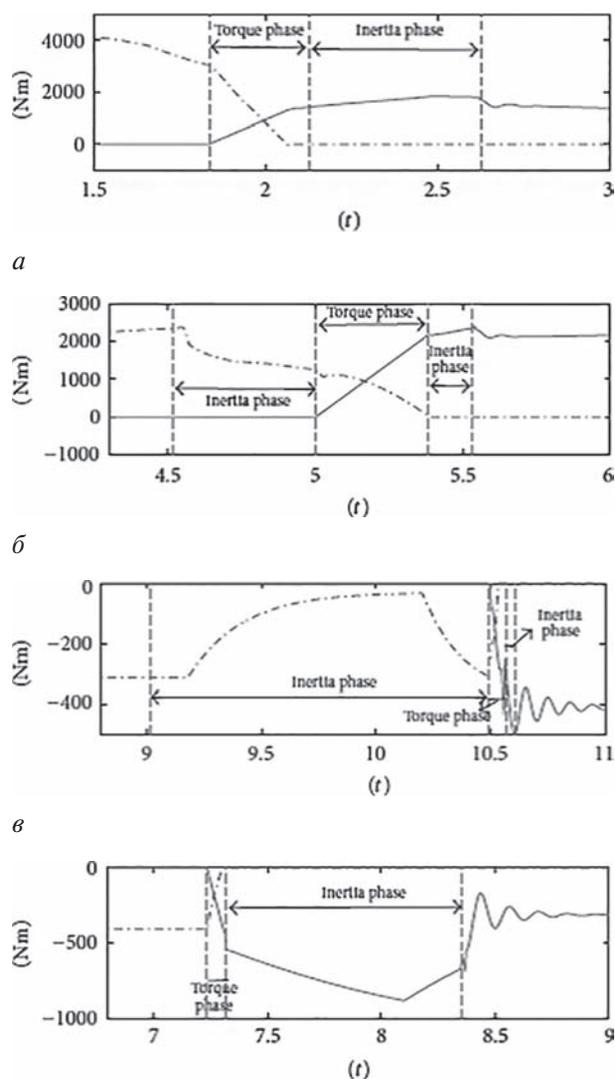


Рисунок 4 — Кинематическая схема АТ АА80Е [13]

Таблица — Порядок включения фрикционов АТ АА80Е [13]

	C1	C2	C3	C4	B1	B2	F1
P							
R				○		○	
N							
1St	○					○	○
2nd	○				○		
3rd	○			○			
4th	○		○				
5th	○	○					
6th			○				
7th				○			
8th					○		



2

Рисунок 5 — Графики изменения крутящих моментов при типовых СТС-переключениях: сплошные линии — крутящий момент включаемого, штрих-пунктирные — выключаемого; а, б — переключения вверх и вниз под нагрузкой; в, г — переключения вверх и вниз без нагрузки [14]

Хотя алгоритмическое обеспечение технологии СТС изначально базируется на канонических принципах управления АТ, непрерывно на протяжении многих лет публикуются новые работы, посвященные его совершенствованию.

Первая из возможных причин в том, что вся технология строится на управлении моментами трения фрикционов АТ, но сам крутящий момент в реальном масштабе времени не измеряется. Методы измерения, приемлемые для широкого применения в бортовых системах, отсутствуют и пока не предвидятся. Вместо них в алгоритмах управления используются косвенные параметры и методы оценки. Их виды, количество и сочетания, а значит, и сами алгоритмы обработки с учетом особенностей конструкции конкретной АТ существенно различаются.

Вторая причина — непрерывное совершенствование аппаратных средств — как электрон-

ных, так и мехатронных. Для реализации возможностей, предоставляемых современной бортовой электроникой и теорией управления, потребовались *прецизионные мехатронные исполнительные устройства как интерфейс между электроникой и механизмами АТ*. На этом фоне проблема точности оценки крутящего момента в переходных процессах еще более обострилась.

В результате сложность и стоимость программно-алгоритмического обеспечения существенно возросли. Этому также способствовало быстрое увеличение числа ступеней АТ как легковых, так и грузовых автомобилей в последние годы. И, как видно из приведенных примеров, всем им необходимы адаптированные к каждому новому объекту комплексы алгоритмов. В итоге все ведущие производители АТ пришли к необходимости непрерывного совершенствования программно-алгоритмического обеспечения и МСУ в целом. Так, выше упоминалась МСУ АТЕС уже пятого поколения, выпускаемая компанией Allison в настоящее время. При этом описания блок-схем алгоритмов входят в описания многочисленных национальных и международных патентов на новые МСУ АТ как обязательное условие защиты интеллектуальной собственности, а также патентной чистоты при выводе их на рынки в условиях высокой конкуренции.

Ввиду изложенного более подробное рассмотрение программно-алгоритмического обеспечения технологии СТС в пределах одной статьи нереально. Поэтому далее ограничимся рассмотрением некоторых проблем, связанных с механикой переходных процессов.

Прецизионное управление требует как можно точнее учитывать в алгоритмах управления текущие значения переменного коэффициента трения на всех этапах процесса буксования фрикциона. Так, в [16] его зависимость от скорости скольжения, представленная в виде графика на рисунке 6, реализована с помощью контроллера с двумя степенями свободы, встраиваемого в динамическую модель силовой установки.

Однако коэффициент трения зависит, кроме скорости скольжения, также от удельного давления и от температуры. Эти зависимости сложны как для экспериментального определения, так и для последующего использования в алгоритмах МСУ. В работе, посвященной исследованию нового фрикционного материала для фрикциона блокировки гидротрансформатора АТ General Motors [17], показано, что задача существенно упрощается при использовании безразмерного параметра — Числа Стрибека (Stribeck Number). Этот параметр не зависит от температуры и равен произведению динамической вязкости смазочной жидкости на скорость вращения, деленному на величину удельного давления. Эти параметры влияют на коэффициент трения, а значит, и он может быть связан с Числом Стрибека. Такая зависи-

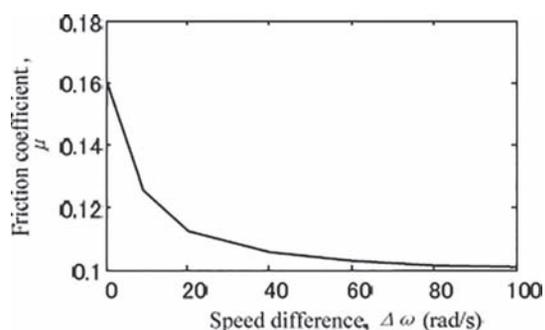


Рисунок 6 — Зависимость коэффициента трения фрикционных пар от скорости буксования [16]

мость, построенная для некоторой постоянной скорости, показана на рисунке 7 (приведенном в [17] со ссылкой на [18]).

Здесь видно, что Число Стрибека однозначно связано с тремя режимами смазки пары трения. Левая зона графика соответствует граничной, средняя (эксплуатационная) — смешанной пленочной, а правая — гидродинамическому режиму смазки. При переходе в третью зону частная производная коэффициента трения по Числу Стрибека меняет знак, а до этого момента оба параметра связаны однозначно. Поскольку скорость всегда известна, для вычисления величины коэффициента трения по этому графику достаточно дополнительно определить только Число Стрибека. Таким образом, зная наблюдаемые параметры — скорость и давление — можно в этой зоне легко определять коэффициент трения в процессе буксования.

Оценка параметров фрикционов, в том числе определение коэффициента трения с использованием Числа Стрибека в математической модели управления, необходима также при стендовых исследованиях и различных испытаниях АТ (включая ДСТ). Она рассматривается в [19], где модель содержит «более реалистичный уровень динамики выдавливания масляной пленки». Алгоритм оценки имеет два варианта — для «бесшумных» и «зашумленных» условий (белый Гауссовский шум с отношением сигнал/шум 10 % — для сигнала скорости и 5 % — для сигнала давления). Точность оценки параметров в обоих вариантах

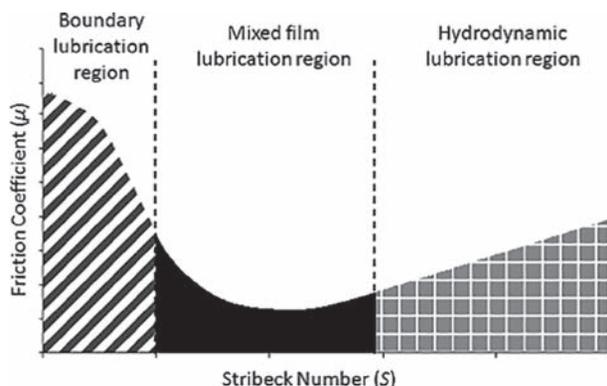


Рисунок 7 — Зависимость коэффициента трения от Числа Стрибека [17, 18]

сравнивается по результатам обработки сигналов ускорения и производной давления с применением фильтра Калмана.

Увеличение числа ступеней АТ также вызывает рост сложности контроллера, числа его входов и выходов, сенсоров, алгоритмов, программного обеспечения, что приводит к ускоренному росту объемов памяти МСУ. Так, по данным компании ZF Friedrichshafen AG (рисунок 8 [20]), ее восьмиступенчатая АТ имела объем постоянной памяти 2 мегабайта, а девятиступенчатая — уже 3,5 мегабайта.

Очевидно, что обеспечение прецизионной точности также приводит к дальнейшему усложнению бортовой электроники, в частности, в связи со значительным увеличением числа калибровочных параметров и необходимостью перманентного их контроля (с интервалами порядка 10 мс) в процессе функционирования АТ.

Для точного воспроизведения заданных законов управления МСУ АТ необходимы быстродействующие электромагнитные актюаторы. Так, в [7] они имеют время срабатывания 5 мс.

Одно из важнейших требований к качеству процесса переключения — точное согласование законов одновременного буксования включаемого и выключаемого фрикционов для исключения кратковременного разрыва потока мощности. Как видно из оцифрованных графиков, приведенных выше, а также в [1], их «перекрытие» осуществляется только в фазе крутящего момента, длительность которой значительно меньше общего времени переключения, а диапазоны значений моментов трения могут изменяться в широких пределах в зависимости от типов и режимов переключений. Все это требует прецизионного выполнения команд управления давлениями рабочей жидкости в гидроцилиндрах фрикционов как по величине, так и по согласованным длительностям.

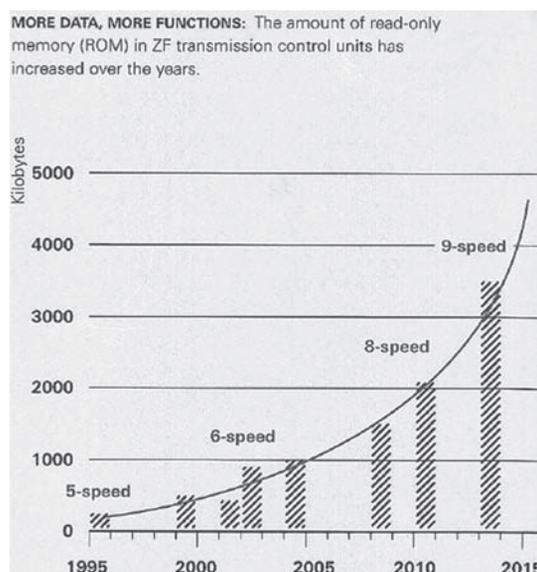


Рисунок 8 — Рост объемов памяти МСУ с увеличением числа ступеней АТ [20]

Приведем в качестве практического примера одну из очень ранних работ нашего института — диссертацию кандидата технических наук В.Н. Ксендзова, посвященную исследованию переключений передач энергонасыщенного колесного трактора [21]. В одном из выводов по диссертации сказано: «Разработанная методика выбора рациональных перекрытий позволяет найти такие их значения, при которых переключения близки к наиболее выгодным с точки зрения нагруженности трансмиссии, потерь производительности и плавности. Для энергонасыщенного колесного трактора класса 20 кН при существующих его конструктивных особенностях время перекрытия удельных давлений на дисках фрикционов рекомендуется регулировать в пределах 0,0 ... 0,3 с исходя из загрузки двигателя по крутящему моменту. При этом увеличение загрузки требует увеличения перекрытия».

Эти значения, полученные в результате моделирования и расчета на ЭВМ, которые рекомендовалось обеспечивать с точностью до 0,05 с и регулировать в зависимости от нагрузки ДВС, в то время воспринимались как совершенно нереальные с точки зрения технической осуществимости. Но оказались осуществимы и даже близки к показанным выше параметрам современных МСУ АТ. А на отечественных тракторах такие системы отсутствуют и ныне.

Заключение. Современная теория и техника управления силовыми установками с автоматизированными приводами, включающими АТ, сложившаяся за период от 80-х годов прошлого века, содержит единый комплекс методов и средств управления, который применяется ведущими мировыми производителями АТ. Его структура включает шесть базовых технологий. Ключевой среди них является технология «Clutch-to-Clutch Shifts» (хотя и она не может работать без взаимодействия с другими технологиями).

Анализ большого объема зарубежных публикаций, входящих в научную базу данной технологии, показывает, что к настоящему времени произошла ее структуризация в соответствии с направлениями теории, практическое применение которых получило в ней значительное развитие. Так, кроме изданий автомобильного профиля, имеются публикации в известных научных журналах и трудах конференций по прикладной математике, кибернетике, теории автоматического управления, вычислительной технике, что свидетельствует о значительном усложнении алгоритмического и программного обеспечения МСУ АТ и привлечении к его созданию профессиональных специалистов по таким направлениям. Очевидно, что это обусловлено возросшей ответственностью современных прецизионных МСУ, которые сегодня де-факто выполняют функции жизнеобеспечения АТ — мониторинг, оптимальное управление, защиту. Только в этих жестких

рамках возможно достижение высоких показателей экономичности, безопасности, ресурса комфорта, а в конечном итоге — конкурентоспособности выпускаемой техники.

Список литературы

1. Поддубко, С.Н. Управление динамикой переходных процессов автомобильных силовых установок с автоматизированными приводами: современная теория и техника / С.Н. Поддубко, Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2017. — Вып. 6. — С. 66–75.
2. Нарбут, А.Н. Механизмы плавного переключения передач в трансмиссиях автомобилей / А.Н. Нарбут, В.Ф. Шапко, А.И. Архипов. — М.: НИИНАвтопром, 1982. — 37 с.
3. Transmission and controls: pat. US 3505907, USA / General Motors Corp. — Publ. date: 14.04.1970.
4. The CLBT 9680 an automatic transmission for off-highway vehicles: SAE Technical Paper 800669. — 1980.
5. Digital electronic controls for Detroit Diesel Allison off-highway transmissions: SAE 850732.
6. Development of A New Clutch-to-Clutch Shift Control Technology: SAE Technical Paper 2002-01-1252 / GM Powertrain, General Motors Corp.
7. Sun Zongxuan Challenges and Opportunities in Automotive Transmission Control / Zongxuan Sun, Kumar Hebbale // American Control Conference, Portland, OR, USA, June 8–10, 2005 // General Motors Corporation. Research and Development Center. — 2005.
8. Control method of clutch-to-clutch powered downshift in an automatic transmission: pat.US 5029494, USA / General Motors Corp. — Publ. date: 09.07.1991.
9. State detecting device for load element receiving load of working fluid and state detecting device for fluid pressure control circuit: pat. US 7159506, USA / Toyota. — Publ. date: 09.06.2007.
10. Adaptive pressure control method for achieving synchronous upshifts in a multiple-ratio transmission: pat. US 6994647, USA / Ford Global Technologies LLC. — Publ. date: 07.02.2006.
11. Adaptive on-coming clutch fill control for automatic transmission: pat. US 6292732, USA / General Motors Corp. — Publ. date: 18.09.2001.
12. Clutch fill control of an automatic transmission for heavy-duty vehicle applications / Mechanical Systems and Signal Processing, Dec. 23, 2015. — Vol. 64–65. — Pp. 16–28.
13. Development of smooth up-shift control technology for automatic transmissions with integrated control of engine and automatic transmissions: SAE 2007-01-1310 / Toyota Motor Corp.
14. Virtual Clutch Controller for Clutch-to-Clutch Shifts in Planetary-Type Automatic Transmission. Research Article / Mathematical Problems in Engineering. — Vol. 2015. Mode of access: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/213162>.
15. Красневский, Л.Г. Прецизионное управление автоматическими трансмиссиями: итоги 50 лет развития / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 4. — С. 5–13.
16. Two-Degree-of-Freedom Controller Design for Clutch Slip Control of Automatic Transmission: SAE 2008-01-0537.
17. New Torque Converter Clutch Friction Material Bench Test Screening Procedure: SAE 2009-01-1257 / General Motors Powertrain.
18. Bryant, M.D. Hydrodynamic Lubrication / M.D. Bryant / Lecture Series, ME 383S. — Mode of access: <http://www.me.utexas.edu/~bryant/courses/me383s/DownloadFiles/LectureNotes/HydrodynamicLubr.pdf>.
19. Estimation of Wet Clutch Friction Parameters in Automotive Transmissions: SAE 2015-01-1146.
20. Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles. — The National Academies Press. — Mode of access: <http://www.nap.edu/21744>.
21. Ксендзов, В.Н. Исследование и выбор режимов переключения передач колесного трактора под нагрузкой: автореф. дис. ... канд. / В.Н. Ксендзов / Белорусский политехн. ин-т. — Минск, 1979.

KRASNEVSKIY Leonid G., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.
Chief Research Scientist¹
E-mail: krasnevski_l@tut.by

BELEVICH Alexander V.

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

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 05 September 2017.

AUTOMATIC TRANSMISSIONS: TECHNOLOGY “CLUTCH-TO-CLUTCH SHIFTS” — HISTORY AND CURRENT STATUS

The current state of technology of control of transient processes in automatic transmissions (AT) and integrated power units with AT by means of coordinated control of slipping clutches without a power flow gap is considered. The stages of development, revealing the logic of improving technology in general, its main differences from the previous ones are presented. The main components (phases of the transient process of the switching of the AT stages, identification of the moment of the stoppage of the friction piston, the characteristics of the algorithms complexes, the principles of precision control, etc.) are considered. Based on the analysis of a large volume of foreign publications, the results obtained by the world leading manufacturers of ATs in this direction are summarized. In the Russian language they are mainly published for the first time and are considered in the paper as the established new basic control technology for AT – “CTC technology” (originally – “Clutch-to-Clutch Shifts” technology).

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

References

1. Poddubko S.N., Krasnevskiy L.G. Upravlenie dinamikoy perehodnykh processov avtomobilnykh silovykh ustanovok s avtomatizirovannymi privodami: sovremennaya teoriya i tehnika [Control of the dynamics of transient processes in automotive power plants with automated drives: modern theory and technology]. *Trudy OIM NAN Belarusi “Aktualnye voprosy mashinovedeniya”* [Proc. of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus “Topical Issues of Mechanical Engineering”], 2017, no. 6, pp. 66–75.
2. Narbut A.N., Shapko V.F., Arkhipov A.I. *Mehanizmy plynogo pereklyucheniya peredach v transmissiyah avtomobilej* [Mechanisms of a smooth gear change in transmissions of cars]. Moscow, NIINAvtoprom, 1982. 37 p.
3. *Transmission and controls*. Patent US, no. 3505907, 1970.
4. The CLBT 9680 an automatic transmission for off-highway vehicles. *SAE Technical Paper*, 1980.
5. Digital electronic controls for Detroit Diesel Allison off-highway transmissions, *SAE Technical Paper*.
6. Development of A New Clutch-to-Clutch Shift Control Technology. *SAE Technical Paper*, 2002.
7. Zongxuan Sun, Kumar Hebbale Challenges and Opportunities in Automotive Transmission Control. *Proc. American Control Conference*. Portland, 2005.
8. *Control method of clutch-to-clutch powered downshift in an automatic transmission*. Patent US, no. 5029494, 1991.
9. *State detecting device for load element receiving load of working fluid and state detecting device for fluid pressure control circuit*. Patent US, no. 7159506, 2007.
10. *Adaptive pressure control method for achieving synchronous upshifts in a multiple-ratio transmission*. Patent US, no. 6994647, 2006.
11. *Adaptive on-coming clutch fill control for automatic transmission*. Patent US, no. 6292732, 2001.
12. Clutch fill control of an automatic transmission for heavy-duty vehicle applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 64–65, pp. 16–28.
13. Development of smooth up-shift control technology for automatic transmissions with integrated control of engine and automatic transmissions. *SAE Technical Paper*, 2007.
14. Virtual Clutch Controller for Clutch-to-Clutch Shifts in Planetary-Type Automatic Transmission. Research Article. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/213162/>.
15. Krasnevskiy L.G., Poddubko S.N. Precizionnoe upravlenie avtomaticheskimi transmissijami: itogi 50 let razvitiya [Precision control of automatic transmissions: the results of 50 years of development]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2015, no. 4, pp. 5–13.
16. Two-Degree-of-Freedom Controller Design for Clutch Slip Control of Automatic Transmission. *SAE Technical Paper*, 2008.
17. New Torque Converter Clutch Friction Material Bench Test Screening Procedure. *SAE Technical Paper*, 2009.
18. Bryant M.D. Hydrodynamic Lubrication. *Lecture Series, ME 383S*. Available at: <http://www.me.utexas.edu/~bryant/courses/me383s/DownloadFiles/LectureNotes/HydrodynamicLubr.pdf/>.
19. Estimation of Wet Clutch Friction Parameters in Automotive Transmissions. *SAE Technical Paper*, 2015.
20. Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles. *The National Academies Press*. Available at: <http://www.nap.edu/21744/>.
21. Ksendzov V.N. *Issledovanie i vybor rezhimov pereklyucheniya peredach kolesnogo traktora pod nagruzkoy*. Diss. kand. tehn. nauk [Research and selection of modes of gearshift of the wheeled tractor under load. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Minsk, 1979.