



# МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.038

Л.Г. КРАСНЕВСКИЙ, член-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор  
главный научный сотрудник<sup>1</sup>

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доцент  
генеральный директор<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

Поступила в редакцию 16.10.2015.

## ПРЕЦИЗИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ТРАНСМИССИЯМИ: ИТОГИ 50 ЛЕТ РАЗВИТИЯ

*Рассматриваются основные этапы и итоги развития теории и техники управления автомобильными автоматическими трансмиссиями в тесной связи с эволюцией самих трансмиссий. Они охватывают 50-летний период — от гидравлической автоматики трех-четырёхступенчатых гидромеханических к современным интегрированным мехатронным системам управления многоступенчатых гидромеханических и гибридных электромеханических трансмиссий ведущих автомобильных компаний.*

**Ключевые слова:** автоматические трансмиссии автомобилей, мехатронные системы управления автоматическими трансмиссиями

**Актуальность темы.** За прошедшие 50 лет в мировом автомобилестроении произошли кардинальные изменения в области теории и конструкций автоматических трансмиссий (АТ). Одним из ключевых их слагаемых является прогресс мехатронных систем управления (МСУ) АТ. Так, совершенно изменился подход к принципам организации управления и, в том числе, к управлению буксованием фрикционных пар в процессе переключения ступеней.

Однако в русскоязычных публикациях этот зарубежный опыт практически не освещался, что и побуждает привлечь к нему внимание.

**Итоги 50 лет развития АТ.** За последнее десятилетие мировое автомобилестроение достигло небывалых успехов в развитии массового производства классических и новых конструкций АТ.

Сегодня к основным типам массовых АТ можно отнести [1] многоступенчатые гидромеханические передачи (ГМП), бесступенчатые с механическими вариаторами (БСТ), автоматизированные механические (АМТ), гибридные электромеханические (ГЭМТ), с двумя сцеплениями на входе (ДСТ).

Общепризнано, что хотя все эти трансмиссии были известны очень давно, обеспечить их высокую работоспособность и довести до массового

производства удалось благодаря успехам последних лет в совершенствовании МСУ, а также фрикционных устройств (сухих и «мокрых» двухдисковых и многодисковых фрикционов), которые в большом количестве имеются в этих АТ.

Из названных АТ самые совершенные и массовые — ГМП. Для них были впервые отработаны *теория и техника прецизионного управления фрикционными устройствами*, позволившие решить одну из самых сложных задач — обеспечение высокого качества переходных процессов при переключениях ступеней без разрыва потока мощности и ударных нагрузок. А некоторые новые АТ (например, ДСТ) благодаря современным МСУ даже довести до производства.

В начале пятидесятилетия, в середине 60-х годов, существовал единственный вид АТ — трех-четырёхступенчатые планетарные ГМП с гидравлической автоматикой для легковых автомобилей. Для повышения топливной экономичности число ступеней перманентно увеличивалось, особенно после топливного кризиса 80-х годов. Ввиду ограниченности возможностей гидравлики для улучшения плавности переключения ступеней в таких кинематических схемах наряду с многодисковыми фрикционными широко применялись механизмы свобод-

ного хода (МСХ), которые при изменении знака подводимого крутящего момента в процессе переключения автоматически заклиниваются или расклиниваются, обеспечивая так называемое *синхронное* переключение. По размерам МСХ сопоставим с фрикционом, так что установка двух-трех МСХ приводила к увеличению общих габаритов ГМП. Только появление *прецизионных* МСУ позволило постепенно отказаться от их широкого применения и перейти от синхронного к несинхронному управлению с обеспечением высокого комфорта переключений. Более того, существует мнение, что именно благодаря отказу от широкого применения МСХ удалось создать современные компактные и надежные ГМП для переднеприводных легковых автомобилей.

На рисунке 1 приведена кинематическая схема ГМП 8+1 компании Тойота (2008 г., [2]) в качестве примера применения МСХ. Как видим, он установлен параллельно фрикциону В2 и используется только на первой ступени. При торможении двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на этой ступени дополнительно включается В2.

Надо отметить, что первой в мире восьмиступенчатую легковую ГМП модели 8НР70 выпустила в 2008 году немецкая компания Цанрадфабрик для автомобилей Мерседес с мощными ДВС, тогда как механические трансмиссии близкой размерности для этих машин имеют не более пяти-шести. По

информации компании, перманентное увеличение числа ступеней с четырех до восьми позволило в итоге повысить ее КПД на 23 %, а при использовании технологии Стоп-старт ДВС — до 27 %.

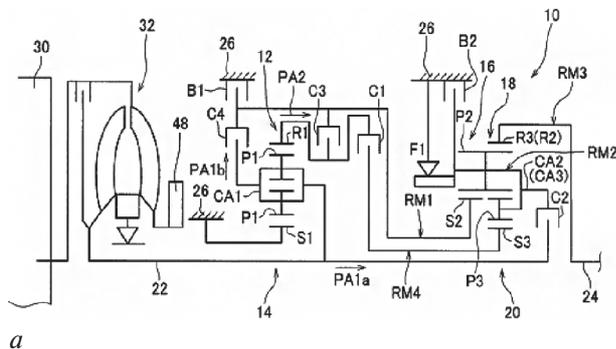
Вскоре о создании восьмиступенчатых ГМП объявили Тойота, Джeneral Моторс, Хюндай. А компания Мерседес Бенц в 2013 г. первой в мире объявила о создании девятиступенчатой ГМП модели 9G-TRONIC.

В области тяжелых ГМП в начале рассматриваемого периода также применялась гидроавтоматика и начиналось внедрение дистанционного электропривода ручного управления. На рисунке 2 показана ГМП 6+2 Аллисон (известной американской компании, входившей в Джeneral Моторс). В ней применен дистанционный электропривод ручного управления по патенту США 1970 года [4]. В 1971 году компания внедрила на этих ГМП первую МСУ под названием SPG (Shift Pattern Generator) [5]. С 2012 года она уже выпускает МСУ пятого поколения — АТЕС (Allison Transmission Electronic Control).

К настоящему времени число ступеней у новых образцов тяжелых ГМП также существенно возросло. Компанией Аллисон в 2013 году было объявлено о начале производства новой вально-планетарной ГМП 10+2 модели ТС10 для автомобилей-тягачей мощностью до 600 л. с. с гарантийным пробегом до 750 000 миль или пяти лет [6].

В конце рассматриваемого периода появился новый перспективный тип АТ — ГЭМТ (подробнее см. [7]). Первенство здесь принадлежит компании Тойота, которая к 2000 году выпустила ставший знаменитым гибридный легковой автомобиль Приус с ГЭМТ. В 2014 году выпускалось уже четвертое поколение таких машин, а к концу этого года общее их число достигло 8 000 000.

Применение ГСУ на грузовых автомобилях с точки зрения экономии топлива и снижения вредных выбросов значительно эффективней, чем на легковых. Компания Аллисон в 2003 году начала производство ГЭМТ для автобусов с ГСУ, а в 2013 году первой в мире объявила о создании ГЭМТ для средних и тяжелых



	C1	C2	C3	C4	B1	B2	F1
P							
Rev1			○				○
Rev2				○			○
N							
1st	○					(○)	○
2nd	○				○		
3rd	○		○				
4th	○			○			
5th	○	○					
6th	○		○				
7th	○		○				
8th	○				○		

○ : ENGAGED  
(○) : ENGAGED AT ENGINE BRAKE

Рисунок 1 — ГМП 8+2 компании Тойота с одним МСХ:  
а — кинематическая схема; б — таблица включения элементов управления [2]

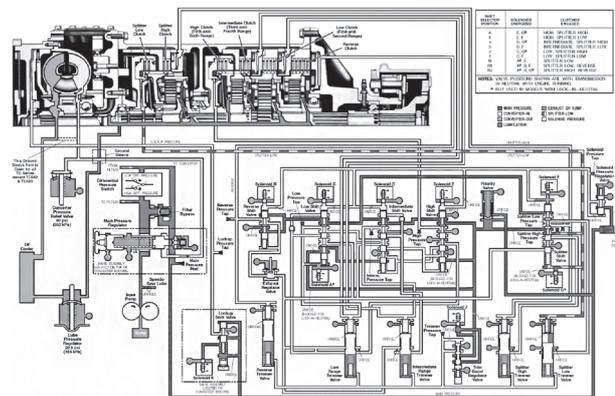


Рисунок 2 — ГМП Аллисон 6+2 с МСУ и электроприводом дистанционного ручного управления (версия 2000 года)

гибридных грузовых автомобилей различного назначения, разработанной на базе ее автоматических ГМП серии 3000. По приведенной информации, эта ГЭМТ дает экономию топлива до 25 % в зависимости от условий эксплуатации и особенностей ездового цикла.

На рисунке 3 представлена кинематическая схема перспективной ГЭМТ с двумя мотор-генераторами компании Джeneral Моторс, а на рисунке 4 — конструкция этой ГЭМТ и ее механизма управления [8]. Как видно, картер, габариты и механизм управления ГЭМТ подобны обычной ГМП.

В это же время ведущая немецкая компания в области трансмиссий Цанрадфабрик также показала новое семейство модульных АТ модели ТгаХоп для средних и тяжелых грузовых автомобилей, которое включает и гибридную модификацию. На рисунке 5 показан состав модулей семейства [9]. Основной модуль — коробка передач (см. рисунок 5, сверху в центре) содержит до 14 ступеней переднего и две заднего хода. В числе других модулей мотор-генератор, сдвоенное и одиночное сцепления, гидротрансформатор. Из них по заказу потребителей могут при сборке формироваться ГЭМТ или ГМП, ДСТ, АМТ. По сути, это новая технология: производство семейств модульных АТ различных типов и размерностей на единой конструктивно-технологической базе вместо отдельных специализированных производств конкретных типов АТ.

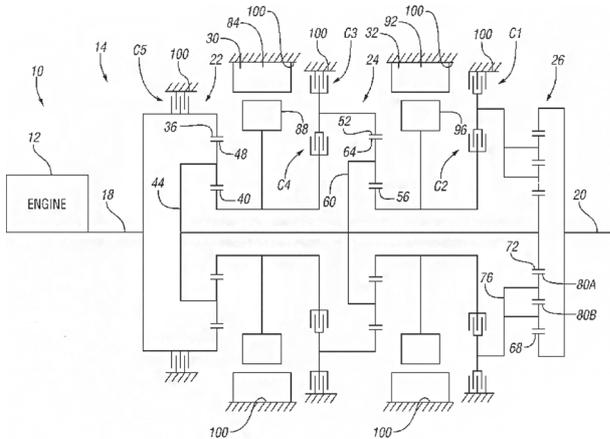


Рисунок 3 — Кинематическая схема ГЭМТ компании Джeneral Моторс [8]

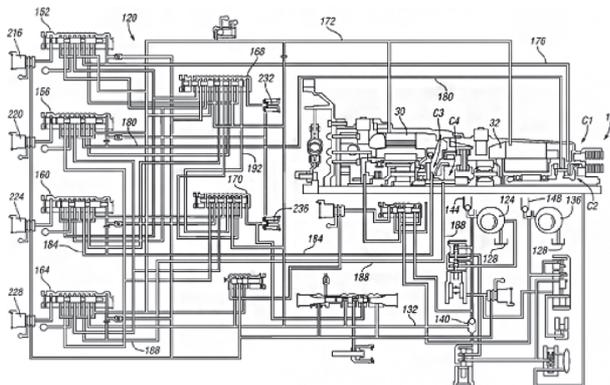


Рисунок 4 — Конструкция ГЭМТ по рисунку 3 и ее системы управления [8]

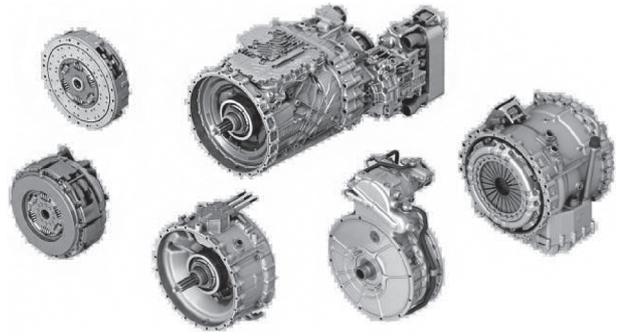


Рисунок 5 — Модульная трансмиссия ТгаХоп компании Цанрадфабрик: базовая коробка передач и пять модулей [9]

Модульное построение при создании ГЭМТ применяет также компания Аллисон. Так, на рисунке 6 представлена предлагаемая компанией конструкция модуля мотор-генератора, закрепляемого на картере ГМП перед гидротрансформатором. Отмечается, что с помощью данного модуля возможна даже модернизация ранее выпущенных ГМП и автомобилей до уровня ГЭМТ и, соответственно, гибридов, так как в их составе уже имеются системы охлаждения и смазки, необходимые для мотор-генераторов. На рисунке 7 показана принципиальная схема установки такой трансмиссии на модернизируемый автомобиль.

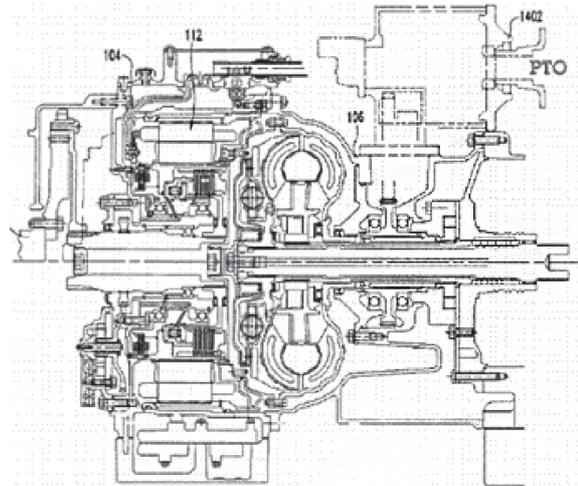


Рисунок 6 — Модуль мотор-генератора, установленный на картере гидротрансформатора ГМП [10]

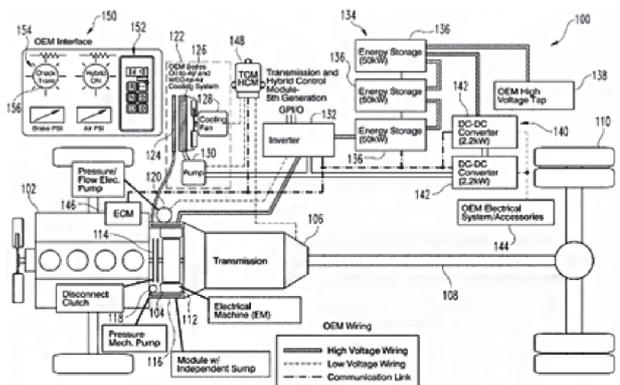


Рисунок 7 — Принципиальная схема установки ГЭМТ с модулем мотор-генератора на автомобиль [10]

Двойными линиями на схеме обозначены электрические коммуникации, которые не входят в комплект ГЭМТ и обеспечиваются самим пользователем [10].

**Итоги 50 лет развития систем управления трансмиссиями.** Анализ инноваций последних десятилетий в данной области показывает, что они были направлены в первую очередь на обеспечение стабильного высокого качества и надежности ГМП в условиях рентабельного массового производства и массовой эксплуатации — в том числе и при создании новых конструкций и типов АТ. Это в равной степени касается как легковых, так и тяжелых ГМП.

Ввиду отсутствия актуализированной русскоязычной информации в рамках одной статьи показать в общих чертах сегодняшнее состояние теории и техники управления АТ легче на конкретных примерах эволюции от ранних конструкций к современным МСУ. И поскольку нас интересуют, прежде всего, тяжелые ГМП, в качестве основного примера выбраны трансмиссии Аллисон.

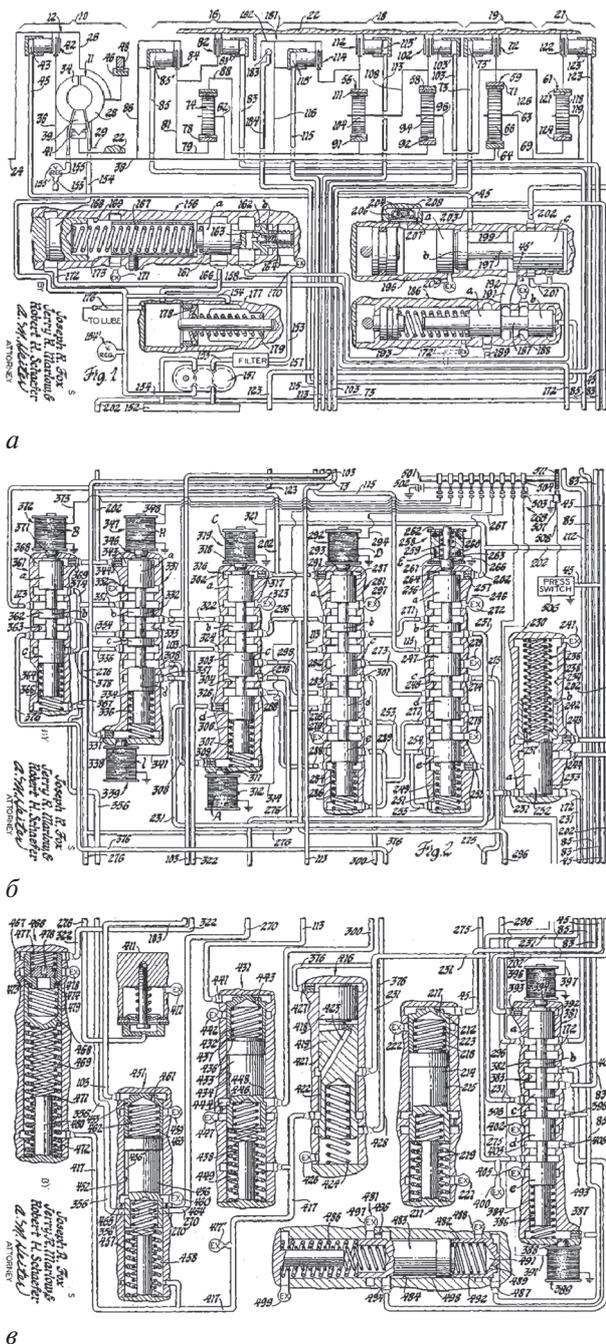
На рисунках 8 и 9 показаны уже упоминавшаяся выше электро-гидравлическая система управления по патенту 1970 года [4] и современная МСУ по патенту 2013 года [11].

Система на рисунке 8 до недавнего времени выпускалась в составе ГМП Аллисон серий 8000, 9000 и др. Она одной из первых получила дистанционный электропривод ручного управления, двухкаскадное управление фрикционными с пилотными ЭГК, и на ее основе позднее была создана МСУ Аллисон первого поколения. Здесь большое число полнопоточных золотниковых регуляторов давления и распределителей, что усложняет гидросистему и приводит к значительным габаритам и весу механизмов МСУ.

МСУ на рисунке 9 предназначена для новых моделей ГМП Аллисон и описана в большом числе патентов. Здесь представлена схема из [11]. Она соответствует четвертому или даже последнему — пятому поколению МСУ Аллисон.

Две эти схемы — олицетворение уровней 60–80-х годов и 2013 года — разделяют пять поколений электронных систем управления. Даже простое визуальное их сопоставление не требует комментариев. Видно, что значительно уменьшилось число золотниковых клапанов, так как многие их функции реализуются с помощью электроники или вообще программно. В результате существенно уменьшен вес механизмов управления. Но главное в том, что с переходом к современным МСУ качество управления возросло несопоставимо. Возможности гидравлических систем управления, при всем их совершенстве, были крайне ограничены. С применением МСУ, как уже говорилось выше, управление стало прецизионным.

Необходимость прецизионного управления обусловлена тем, что длительность автоматического переключения пары фрикционов на движущемся автомобиле лежит в пределах от 2...2,5 с в тяже-



**Рисунок 8 — Электрогидравлическая система дистанционного управления ГМП Аллисон по патенту 1970 года (приоритет 1968 года): а — кинематическая схема ГМП и подсистема регулирования давления; б — электрогидравлическая подсистема переключения ступеней; в — гидравлическая подсистема плавности переключений [4]**

лых АТ до 04...0,5 в легковых. При этом в разных фазах процесса необходимы разные законы управления, которые должны автоматически сменяться несколько раз за одно срабатывание.

С развитием техники эти требования стали легко выполнимы для отдельно взятой АТ, но оказались неизмеримо сложнее в условиях массового производства. Разброс размеров в пределах полей допусков в партиях деталей приводит к ощутимым для работы МСУ различиям характеристик фрикционов, которые также изменяются по мере изно-

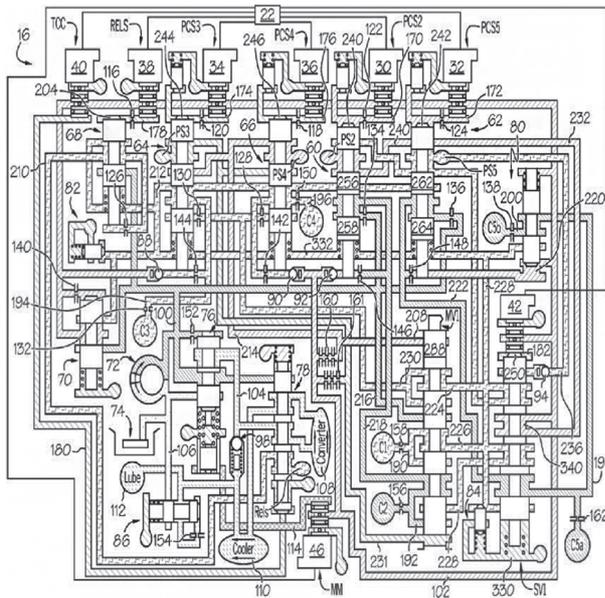


Рисунок 9 — Мехатронная система управления ГМП Аллисон по патенту 2013 года [11]

са в процессе эксплуатации АТ. Это потребовало дальнейшего повышения точности и быстродействия устройств МСУ и перехода к принципам адаптивного управления (см. также [12]).

Таким образом, в условиях массового производства возникла необходимость точного определения параметров конкретного объекта управления, т. е. калибровки МСУ как на заводском конвейере после сборки ГМП, так и в эксплуатации, т. е. автоматической адаптации к внешним и внутренним изменениям. И уже к 1990 году в массовом производстве в разных странах появились адаптивные МСУ ГМП. Компания Крайслер первой в мире в 1989 году объявила о создании полностью адаптивной МСУ, которая выпускалась в составе ГМП модели А604Д на специально построенном заводе во Франции.

Классическая и наиболее сложная проблема, которая на протяжении многих лет оказывала непосредственное влияние на выбор кинематической схемы и конструкцию ГМП — качество переходных процессов при переключении ступеней без прерывания крутящего момента на ведущих колесах автомобиля («с перекрытием») и без ударных нагрузок. Она и сегодня остается самой сложной, несмотря на несопоставимо возросшие технические возможности, но успешно решается с помощью комплекса средств МСУ (алгоритмических, аппаратных, программных), обеспечивающих прецизионное управление процессами буксования фрикционов.

Одной из трудностей при решении этой проблемы оказалось точное определение времени заполнения жидкостью гидроцилиндра включаемого фрикциона, т. е. времени движения его поршня, а еще точнее — идентификация момента остановки поршня после выбора зазоров и сжатия пакета дисков. С данной задачей, получившей краткое на-

звание «fill time» («время заполнения»), столкнулись все производители ГМП и запатентовали ряд ее решений. Времена заполнения могут различаться даже в комплекте фрикционов одной новой ГМП (не говоря уже об их рассеянии в партии ГМП). Точное время заполнения необходимо знать при каждом переключении, т. к. именно в момент остановки поршня начинают выполнение комплексы алгоритмов согласованного управления буксованием пары фрикционов. Раннее или позднее начало повышения давления приводит к ударному включению фрикциона или к холостому разгону ДВС, что в обоих случаях приводит к неудовлетворительному качеству процесса.

Сказанное хорошо видно на рисунке 10. Здесь показаны процессы управления переключениями на высшую [13] и на низшую [14] ступень с определением моментов остановки поршней включаемого и выключаемого фрикционов по патентам США 1991 года. Это дата первой публикации данных технических решений, которые знакомы и по инструкциям эксплуатации ГМП Аллисон последующих лет.

Не обсуждая сами алгоритмы управления, остановимся здесь лишь на определении времени заполнения включаемых гидроцилиндров. Оно обозначено на нижней кривой левого графика. По его окончании высокое давление, удерживавшееся во время заполнения, резко понижается до величины, требуемой для начала буксования. Последнее определяется по началу снижения скорости турбины гидротрансформатора. Эта точка, обозначенная на графике как «pull down detected», соответствует изменению знака ускорения турбины. Через эту точку проведена штрих-пунктирная линия, правее которой начинается смена всех законов управления. Таким образом, здесь автоматическими обеспечива-

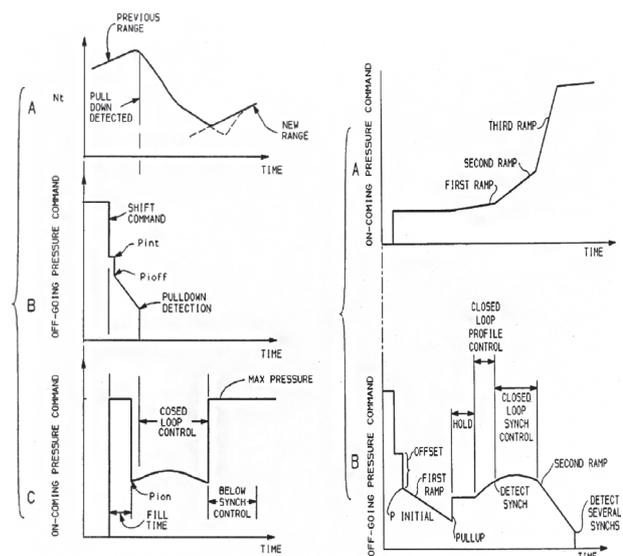


Рисунок 10 — Законы управления переключением ступеней ГМП: а — на высшую [13]; б — на низшую [14] с определением моментов остановки поршней включаемого и выключаемого фрикционов (Дженерал Моторс Аллисон, патенты США 1991 года)

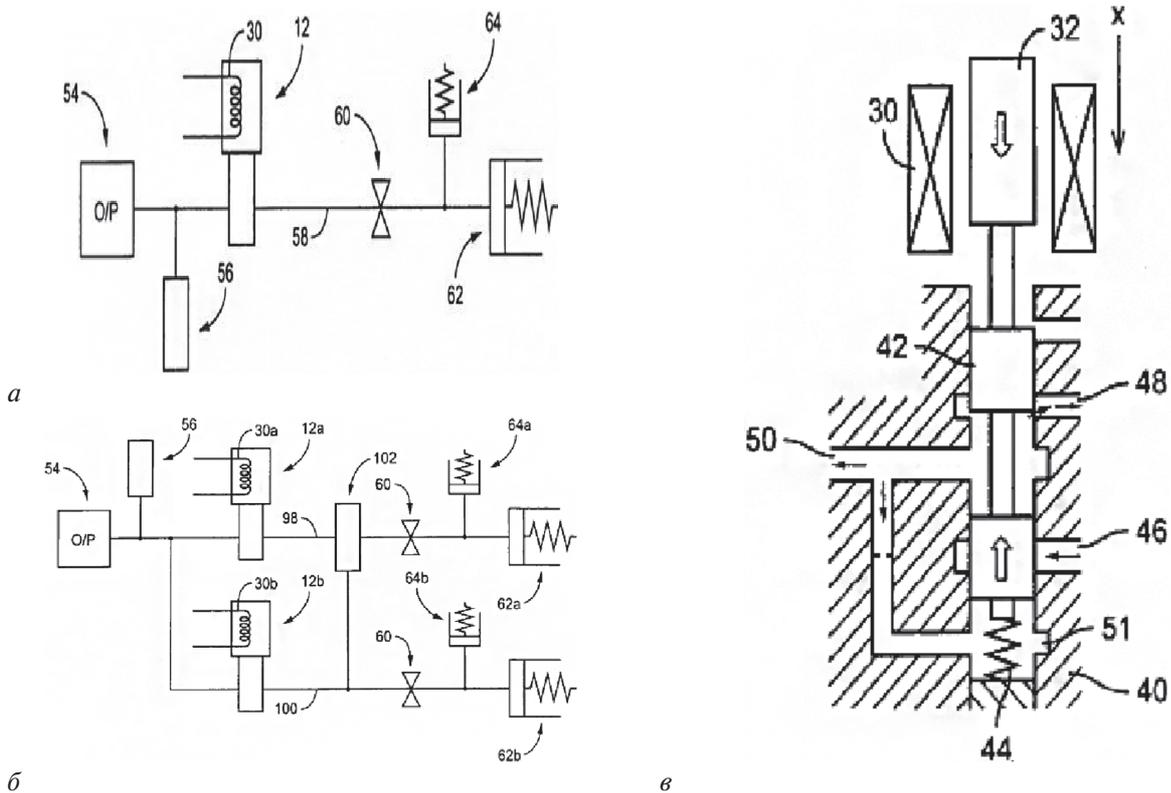


Рисунок 11 — Упрощенная расчетная схема управления давлением в гидроцилиндрах одиночного фрикциона (а) и пары переключаемых фрикционов (б) с помощью золотникового электромагнитного клапана (в) из патента США № 7159506 (Тойота, 2007 год [15])

ется адаптация к рассеянию и изменению параметров АТ с течением времени.

Другой метод определения времени заполнения гидроцилиндра предложен компанией Тойота для МСУ с полнопоточными ЭГК. На рисунке 11 а, б показаны упрощенные расчетные схемы управления давлением в гидроцилиндрах одиночного фрикциона и пары переключаемых фрикционов с помощью золотникового электромагнитного клапана 12, конструкция которого подробнее показана на рисунке 11 в. Гидравлическое сопротивление соединительной гидролинии 58 и упругая деформация системы под давлением условно изображены в виде дросселя 60 и поршневого гидроаккумулятора 64.

Работа этих систем поясняется графиками на рисунке 12. Для заполнения гидроцилиндра 62 на обмотку ЭГК 12 по команде подается пусковое повышенное, а затем уменьшенное (удерживающее) напряжение. Якорь 32 электромагнита ЭГК перемещает вниз золотник 42 регулятора давления, который открывает проход жидкости в гидроцилиндр. При движении поршня давление в гидроцилиндре невысокое (см. верхний график), а расход жидкости через регулятор велик. При завершении заполнения и остановке поршня (штрих-пунктирная вертикальная линия) расход резко уменьшается, и золотник под действием пружины регулятора перемещается вверх, прикрывая подачу жидкости. При этом движении золотник перемещает и связанный с ним якорь

ЭГК. Движение якоря генерирует в катушке ЭДС самоиндукции. Поскольку величина командного напряжения не изменялась, на кривой напряжения в этот момент появляется пик, показанный на втором снизу графике. Подобный пик напряжения, но противоположной полярности возникает и при движении золотника вниз при включении ЭГК. Эти пики отфильтровываются электронной системой от помех, выделяются в отдельный график

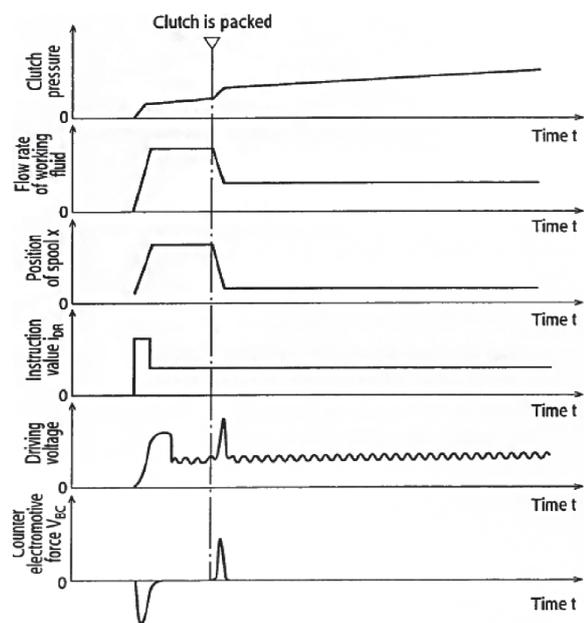


Рисунок 12 — Упрощенные графики идентификации момента остановки поршня фрикциона в системе управления по рисунку 11

(нижняя линия на рисунке 12) и заносятся в память МСУ. Сравнивая интервалы времени между пиками в предыдущих переключениях, определяют величину изменения хода поршня, а значит, и износ пакета дисков фрикционов. Таким образом, помимо сигнала об остановке поршня, одновременно получают информацию об исправности ЭГК и регулятора, об износах пакетов дисков фрикционов, т. е. осуществляют экспресс-диагностику.

Возможность прецизионного управления давлением в гидроцилиндрах при переключениях под нагрузкой во многом определяется характеристиками ЭГК, выполняющих функции интерфейса между электроникой и механизмами МСУ. Возникла потребность в создании и массовом производстве специальных *прецизионных ЭГК*. Они оказались значительно сложнее и дороже обычных.

В пилотных каскадах МСУ получили применение дискретные ЭГК, работающие в режиме низкочастотной широтно-импульсной модуляции выходного давления (ШИМ) или (реже) линейные. Применение ШИМ обусловлено несравненно более жесткими условиями работы на борту автомобиля по сравнению с общемашиностроительной гидравликой для стационарных объектов. Выбор типа ЭГК требует отдельного обсуждения для каждого конкретного применения.

Одной из сложных и, видимо, до конца не решенных проблем, возникших в последние годы в связи с созданием прецизионных ЭГК, оказался гистерезис их характеристик. Несмотря на различные меры, принимаемые для снижения трения между подвижными и неподвижными элементами ЭГК, судя по публикациям, кардинально снизить гистерезис не удается. Для пояснения данной проблемы ограничимся здесь показанной на рисунке 13 характеристикой ЭГК из патента на МСУ ГМП [16] японской компании Жатко (одной из крупнейших в мире производителей легковых ГМП и других АТ). Как видно из графика, ширина петли гистерезиса зависит от того, с какой величины начато снижение силы тока при снятии характеристики ЭГК. Чем она выше (точки TP1, TP2, TP3), тем шире петля. Это вынуждает применять специаль-

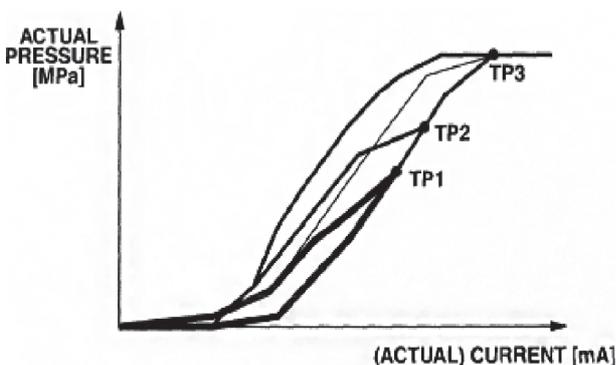


Рисунок 13 — Влияние гистерезиса на характеристику электромагнитного клапана управления усилием сжатия дисков фрикциона ГМП (компания Жатко, 2012 год [16])

ные приемы при табличном задании характеристик в памяти МСУ с учетом гистерезиса.

Известным средством повышения качества переходных процессов и долговечности фрикционного является использование возможностей электронного регулирования двигателя (ДВС) во время переключения ступеней ГМП путем организации взаимодействия МСУ ГМП и МСУ ДВС (по стандартным сетевым протоколам для регулирования скорости и крутящего момента) путем изменения опережения зажигания или подачи топлива (в системах непосредственного впрыска). При этом обе МСУ выполнены отдельными. Такая компоновка позволяет легко обеспечить комплектацию автомобиля разными сочетаниями ДВС и АТ.

Компания Тойота применила в восьмиступенчатой ГМП новую технологию безударного переключения на высшие ступени при разгоне, которая использует интегрированное управление ДВС и ГМП. На рисунке 14 показаны обычная раздельная (верхняя схема) и интегрированная (нижняя схема) структура совместного управления. Здесь МСУ как единый менеджер согласованно управляет выбором ступени, давлением в гидроцилиндрах фрикционов ГМП, подачей топлива, зажиганием, другими актюаторами ДВС. Технология основана на «драматическом улучшении управляемости» исполнительных устройств (так в оригинале). Она предусматривает управление фрикционами от начала фазы крутящего момента до окончания инерционной фазы [3]. На рисунке 15 показано изменение продольного ускорения при переключении ступеней во время разгона автомобиля Лексус LS460 с новой системой (жирная линия) и предыдущей модели LS430 (тонкая сплошная линия) с обычной раздельной системой. Видно, что у обычной есть значительный провал ускорения во время переключения (заштрихованная зона графика), ухудшающий

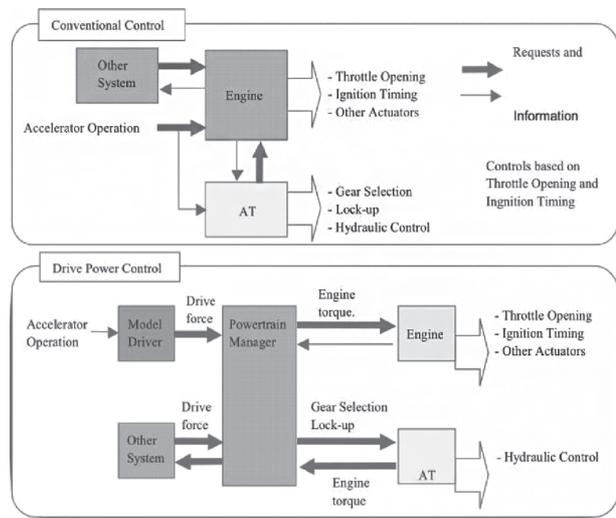


Рисунок 14 — Мехатронные системы управления двигателем и автоматической трансмиссией: вверху — обычная (раздельные МСУ); внизу — интегрированная (Тойота, 2007 год [3])

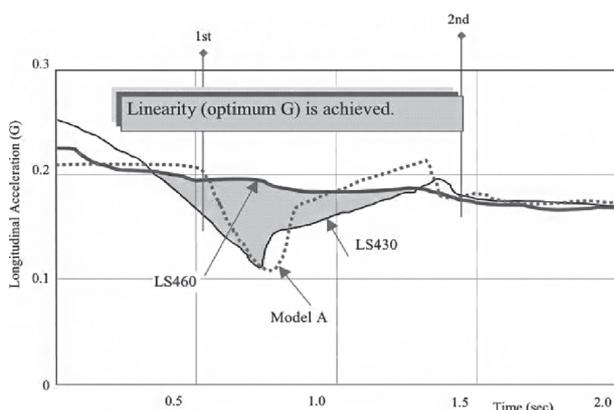


Рисунок 15 — Изменение продольного ускорения при переключении ступеней ГМП в процессе разгона легковых автомобилей Лексус мод. LS430, LS460 при обычном и интегрированном управлении (Тойота, 2007 год [3])

динамику и комфортабельность разгона. Как отмечено на графике, здесь достигнуто практически линейное изменение (т. е. оптимум) ускорения.

Наконец, в рамках тематики данной работы необходимо остановиться на глобальной проблеме обеспечения надежности МСУ и безопасности управления ГМП и другими АТ. Следует отметить, что в начале рассматриваемого периода она обеспечивалась с помощью средств гидравлической логики и механической связи между органом управления в кабине автомобиля и многопозиционным золотниковым селектором в механизме управления ГМП. С появлением МСУ пришлось практически отказаться от привычных методов гидравлической логики и ограничиться обходными мерами ради возможности согласованного одновременного управления включаемым и выключаемым фрикционами. Однако мировая практика вскоре показала, что этих мер недостаточно, особенно при применении принципа «fly-by-wire» (управление по проводам). Более того, опыт эксплуатации показал, что кроме обычных отказов типа обрыва или короткого замыкания проводов, заклинивания золотников гидравлики, необходима защита для случаев обесточивания или выхода из строя самой МСУ. Сформировались (хотя пока не стандартизованы) определенные требования к безопасности управления. Назовем одно из них — режим «limp home» (примерный перевод — «добраться домой»). Данный режим предусматривает, что в случае отказа МСУ должна сохраняться возможность продолжать движение своим ходом (с ограниченной скоростью и маневренностью) до ремонтных служб.

**Заключение.** Как видно из изложенного, объемы мирового производства автоматических трансмиссий к концу рассматриваемого периода неизмеримо возросли. Их конструкции кардинально изменились. К настоящему времени все ведущие мировые компании-производители создали и освоили массовое производство прецизионных мехатронных систем управления, которые обеспечивают

высокое качество переходных процессов и, в конечном итоге, стали одним из ключевых компонентов современных высокоэкономичных и надежных автоматических трансмиссий.

Стремительное распространение автоматических трансмиссий практически на все виды массовой мобильной техники (независимо от некоторого повышения начальной цены) обусловлено существенным облегчением управления, повышением безопасности движения, ресурса агрегатов силовых установок и др. Показательно, что даже гибридные автомобили не обходятся без автоматических трансмиссий для обеспечения оптимальных режимов работы электрических машин.

К сожалению, на постсоветском пространстве новые конструкции автоматических трансмиссий в производстве пока не появились. Однако представляется, что актуальность освоения данной области отечественным машиностроением очевидна. Поэтому полагаем, что представленные здесь материалы будут полезны специалистам.

#### Список литературы

1. Красневский, Л.Г. Состояние и перспективы развития автоматических трансмиссий мобильных машин / Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2012. — Вып. 1. — С. 115–121.
2. Control apparatus for vehicular automatic transmission: US Pat. / Toyota Jidosha K.K. — № 7419452. — Sep. 2, 2008.
3. Development of smooth up-shift control technology for automatic transmissions with integrated control of engine and automatic transmissions / Takaaki Tookura [et al.] // SAE 2007-01-1310.
4. Transmission and controls: US Pat. / General Motors Corp. — № 3505907. — Apr. 14, 1970.
5. Digital Electronic Controls for Detroit Diesel Allison Heavy Hauling Transmissions / Robert C. Boyer // SAE 1986-09-01.
6. Красневский, Л.Г. Развитие конструкций гидромеханических передач большой мощности / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко, Ю.И. Николаев // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2014. — Вып. 3. — С. 83–87.
7. Allison Transmission Offers Better Fuel Economy with TC10 for Tractor Trucks / Allison Transmission — Investor Relations — News Release. — 2013.
8. Hydraulic clutch control system: US Pat. / GM Global Technology Operations LLC. — № 8348797. — Jan. 8, 2013.
9. TraXon from ZF a modular automatic heavy transport transmission // Diesel. News.com.au. — May 22, 2013.
10. Hybrid system: US Pat. / Allison Transmission. — № 8545367. — Oct. 1, 2013.
11. Manual valve control for multi-speed planetary transmission: US Pat. / Allison Transmission, Ins. — № 8403791. — Mar. 26, 2013.
12. Красневский, Л.Г. Современная теория и техника управления гидромеханическими передачами мобильных машин / Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2013. — Вып. 2. — С. 53–62.
13. Adaptive control of an automatic transmission: US Pat. / General Motors Corp. — № 5072390. — Dec. 10, 1991.
14. Control method of clutch-to-clutch powered downshift in an automatic transmission: US Pat. / General Motors Corp. — № 5029494. — Jul. 9, 1991.
15. State detecting device for load element receiving load of working fluid and state detecting device for fluid pressure control circuit: US Pat. / Toyota. — № 7159506. — Jan. 9, 2007.
16. Fluid pressure control apparatus/process: US Pat. / Jatco Ltd. — № 8150555. — Aug. 3, 2012.

KRASNEVSKY Leonid G., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Techn. Sc., Professor  
Chief Researcher<sup>1</sup>

PODDUBKO Sergei N., Cand. Techn. Sc., Associate Professor  
General Director<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences, Minsk, Republic of Belarus

Received 16 October 2015.

## PRECISION CONTROL OF AUTOMATIC TRANSMISSIONS: THE SUMMARY OF 50 YEARS DEVELOPMENT

*The basic stages of development and results of the theory and techniques of automotive automatic transmissions control in close connection with the evolution of transmissions are considered. These stages cover a period of 50 years — from three- or four-stage hydraulic automatic hydromechanical transmissions to modern integrated mechatronic control systems of multistage hydromechanical and hybrid electro-mechanical transmissions by leading automotive companies.*

**Keywords:** automatic transmissions of vehicles, mechatronic control systems of automatic transmissions

### References

1. Krasnevsky L.G. Sostojanie i perspektivy razvitiya avtomaticheskikh transmissij mobil'nyh mashin [State and prospects of development of automatic transmissions of mobile machines]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija: sb. nauch. tr.* [Topical issues of Mechanical Engineering: Coll. of scientific papers]. Minsk, OIM NAN Belarusi, 2012, vol. 1, pp. 115–121.
2. Toyota Jidosha K.K. Control apparatus for vehicular automatic transmission. Patent US, no. 7419452, 2008.
3. Takaaki Tookura [et al.]. Development of smooth up-shift control technology for automatic transmissions with integrated control of engine and automatic transmissions. *SAE 2007-01-1310*.
4. Transmission and control. Patent US, no. 3505907, 1970.
5. Robert C. Boyer. Digital Electronic Controls for Detroit Diesel Allison Heavy Hauling Transmissions. *SAE 1986-09-01*.
6. Krasnevsky L.G., Poddubko S.N., Nikolaev Ju.I. Razvitie konstrukcij gidromehaničeskikh peredach bol'shoj moshhnosti [The development of design of high power hydro-mechanical transmissions]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija: sb. nauch. tr.* [Topical issues of Mechanical Engineering: Coll. of scientific papers]. Minsk, OIM NAN Belarusi, 2014, vol. 3, pp. 83–87.
7. Allison Transmission Offers Better Fuel Economy with TC10 for Tractor Trucks. *Allison Transmission – Investor Relations, News Release*, 2013.
8. Hydraulic clutch control system. GM Global Technology Operations LLC. Patent US, no. 8348797, 2013.
9. TraXon from ZF a modular automatic heavy transport transmission. *Diesel. News.com.au*, 2013.
10. Hybrid system. Allison Transmission. Patent US, no. 8545367, 2013.
11. Manual valve control for multi-speed planetary transmission. Allison Transmission, Ins. Patent US, no. 8403791, 2013.
12. Krasnevsky L.G. Sovremennaja teorija i tehnika upravlenija gidromehaničeskimi peredachami mobil'nyh mashin [The modern theory and control technology of hydromechanical transmissions of mobile machines]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija: sb. nauch. tr.* [Topical issues of Mechanical Engineering: Coll. of scientific papers]. Minsk, OIM NAN Belarusi, 2013, vol. 2, pp. 53–62.
13. Adaptive control of an automatic transmission. General Motors Corp. Patent US, no. 5072390, 1991.
14. Control method of clutch-to-clutch powered downshift in an automatic transmission. General Motors Corp. Patent US, no. 5029494, 1991.
15. State detecting device for load element receiving load of working fluid and state detecting device for fluid pressure control circuit. Toyota. Patent US, no. 7159506, 2007.
16. Fluid pressure control apparatus/process. Jatco Ltd. Patent US, no. 8150555, 2012.