

УДК 629.3-52

СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФРИКЦИОННЫМИ СЦЕПЛЕНИЯМИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ И АВТОПОЕЗДОВ

MORDEN AUTOMATED CONTROL FRICTION CLUTCHES SYSTEMS FOR TRUCKS AND TRAILERS

А. Г. Баханович,

профессор кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, проректор, д-р техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

О. С. Руктешель,

профессор кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, д-р техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

В. А. Кусяк,

доцент кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, канд. техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

Ле Ван Нгиа,

аспирант кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь

A. Bakhanovich,

Professor of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, "Automobiles" Department, pro-
rector, Minsk, Republic of Belarus

O. Rukteshel,

Professor of the Belarusian National Technical University, "Automobiles" Department, Doctor of Technical Sciences,
Minsk, Republic of Belarus

V. Kussyak,

Associate Professor of the Belarusian National Technical University, "Automobiles" Department, Candidate of Technical
Sciences, Minsk, Republic of Belarus

Le Van Nghia,

PhD student of the Belarusian National Technical University, "Automobiles" Department, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 03.10.2017 г.

В статье представлены принципиальные схемы современных систем автоматизированного управления фрикционным сцеплением грузовых автомобилей и автопоездов ведущих автомобилестроительных концернов и специализированных фирм. Описаны программно-аппаратные платформы мехатронных систем, конструктивные исполнения и принцип работы их исполнительных механизмов. Проанализированы достоинства и недостатки алгоритмов управления сухим фрикционным сцеплением, используемых в комплексных мехатронных системах, а также выявлены основные тенденции в мировом автомобилестроении по данному научно-техническому направлению. Предложен разработанный авторами автоматизированный привод сухого фрикционного сцепления с дублирующим пневмогидравлическим контуром на основе пневматического исполнительного механизма и пропорционального электромагнитного клапана. Приведены результаты имитационного моделирования процесса трогания с места с использованием платформы Amesim при наличии разработанного автоматизированного привода в составе мехатронной системы управления силовым агрегатом грузового автомобиля.

The article presents the basic schemes of the modern automated friction clutch control system for trucks and trailers of leading automobile manufacturers and specialized firms. The soft- hardware platforms of mechatronic systems, the design and the principle of operation of their actuators are described in the article. The advantages and disadvantages of friction clutch control algorithms, used in integrated mechatronic systems, are analyzed and given in activity, as well as the main trends of scientific and technical direction in the automotive industry are shown. Designed author's automated drive for friction clutch with a duplicate pneumohydraulic circuit based on a pneumatic actuator and a proportional solenoid valve is proposed. The simulation results of starting process used "Amesim" platform with designed automated drive in the mechatronic control system of power unit are given in the article.

Ключевые слова: грузовые автомобили и автопоезда, сухое фрикционное сцепление, мехатронная система управления, автоматизированный привод сцепления, программно-аппаратная платформа, исполнительные механизмы, алгоритм управления, моделирование.

Keywords: trucks and trailers, dry friction clutch, mechatronic control system, automated clutch, soft- and hardware platform, actuators, control algorithm, simulation.

При трогании автотранспортных средств (АТС) с места или при переключении передач процесс управления узлами и агрегатами трансмиссии играет определяющую роль, вследствие чего в мировом автомобилестроении наметился устойчивый тренд к оснащению механических ступенчатых трансмиссий высокоэффективными автоматизированными системами управления. В автомобилях с механической трансмиссией управление фрикционным сцеплением при трогании (в том числе на подъеме без откатывания) требует от водителя определенного опыта и особой концентрации внимания. Для уменьшения утомляемости водителя, повышения технического уровня АТС и увеличения ресурса трансмиссионных элементов ведущие автомобилестроительные концерны освоили серийный выпуск грузовых автомобилей и магистральных автопоездов, оснащенных автоматизированными системами управления сухим фрикционным сцеплением, функционирующих в составе

комплексной мехатронной системы управления силовым агрегатом [1].

Аппаратная часть мехатронной системы управления фрикционным сцеплением (рис. 1) состоит из следующих основных элементов: исполнительного механизма (ИМ), обеспечивающего механическое воздействие на муфту выключения сцепления (СЦ); электронного блока управления (ЭБУ), обрабатывающего информацию от сенсоров и вырабатывающего управляющие команды на электромагнитные клапаны исполнительных механизмов или приводной электродвигатель; датчика положения подвижного элемента ИМ, а также одного или нескольких электромагнитных клапанов (в случае использования пневматических или гидравлических ИМ поршневого или диафрагменного типов).

На основе полученной информации от ЭБУ коробки передач (КП) и ДВС (см. рис. 1) ЭБУ сцеплением в соответствии с заданным алгоритмом подает управляющий сигнал на исполнительный

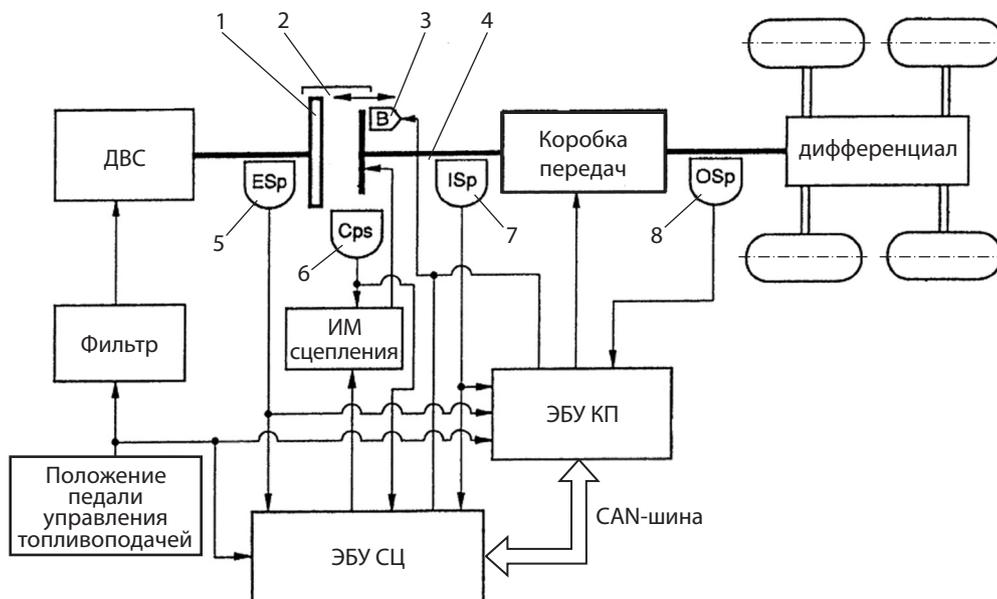


Рис. 1. Принципиальная схема управления автоматизированной механической трансмиссией: 1, 2, 4 — ведущая и ведомая часть сухого фрикционного сцепления; 3 — трансмиссионный тормоз; 5, 7, 8 — датчики частоты вращения соответственно коленвала ДВС, входного и выходного валов КП; 6 — датчик положения рычага выключения сцепления

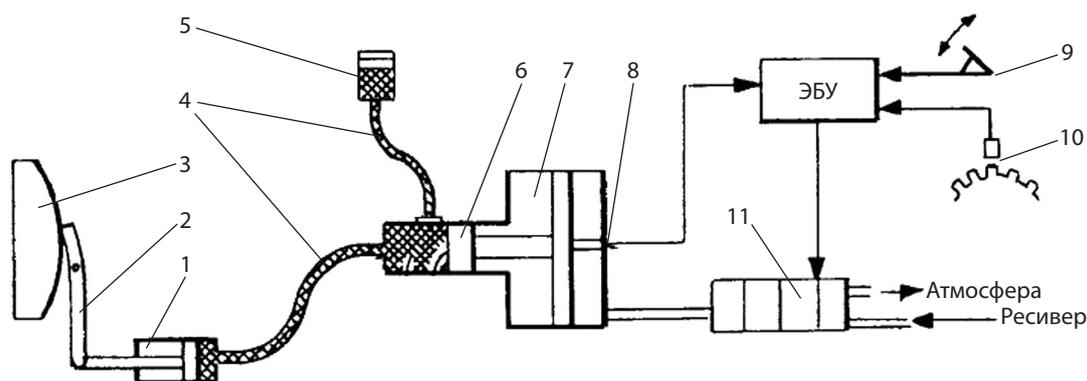


Рис. 2. Принципиальная схема пневмогидравлического привода сцепления: 1 — рабочий цилиндр; 2 — рычаг выключения сцепления; 3 — нажимная пружина; 4 — гидравлические трубопроводы; 5 — жидкостной резервуар (бачок); 6 — поршень гидроцилиндра; 7 — пневматический цилиндр; 8 — датчик положения штока; 9 — датчик положения педали акселератора; 10 — датчики частоты вращения коленвала ДВС и выходного вала КП; 11 — блок электропневматических клапанов

механизм, срабатывание которого обеспечивает включение/выключение фрикционного узла с требуемым темпом. Обмен информацией между электронными системами осуществляется по CAN-шине транспортного средства согласно протоколу высокого уровня SAE J 1939 [2].

Исполнительные механизмы мехатронных систем управления фрикционным сцеплением бывают: пневматическими (пневмоцилиндр или пневмокамера), гидравлическими (гидроцилиндр), электрическими (электродвигатель постоянного тока со встроенным планетарным редуктором) или комбинированными.

В середине 1990-х гг. проектировщики отдавали предпочтение комбинированным исполнительным механизмам, использующим два рабочих тела в процессе функционирования, например жидкость и сжатый воздух или электричество и сжатый воздух. Однако в настоящее время, в связи со стремительным развитием электроники и микропроцессорной техники, наблюдается устойчивая тенденция к оснащению мехатронных систем исполнительными механизмами, срабатывающими при наличии одного рабочего тела [3] (электричество или сжатый воздух). При этом, ввиду использования пропорционально-интегральных и интегрально-дифференциальных регуляторов в контуре управления, достигается высокая точность позиционирования фрикционных элементов, за счет чего улучшаются показатели качества переходного процесса по энергетической

и динамической нагруженности элементов трансмиссии.

За два последних десятилетия специалисты американской корпорации Eaton разработали несколько типов автоматизированных приводов сухого фрикционного сцепления: пневмогидравлический, электрогидравлический с пневматическим ИМ выключения и электрический. Согласно патенту [4] автоматизированная система управления фрикционным сцеплением с пневмогидравлическим приводом применяется для полуавтоматических или автоматических трансмиссий грузовых автомобилей и автопоездов. Принципиальная схема работы пневмогидравлического автоматизированного привода сцепления изображена на рис. 2.

Система управления сцеплением состоит из нескольких частей: рабочего гидравлического цилиндра 1, главного пневмогидроцилиндра 6 и 7, блока пневматических электромагнитных клапанов 11, ЭБУ сцеплением и датчиков 8, 9 и 10. Рабочим телом в системе является гидравлическая жидкость, которая поступает из главного цилиндра 6 в рабочий цилиндр 1 по трубопроводу 4. На основании полученной информации от датчика положения педали управления топливоподачей 9, датчиков частот вращения 10 коленвала ДВС и выходного вала КП, датчика положения штока 8 в главном цилиндре 7 ЭБУ сцеплением формирует управляющие сигналы уровня «1» на блок впускных пневматических электромагнитных клапанов 11, в результате

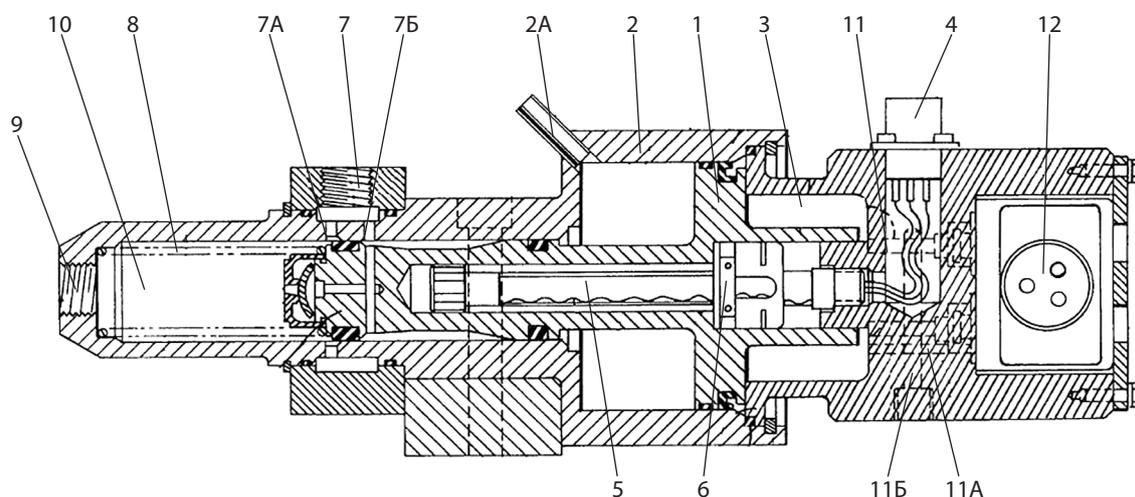


Рис. 3. Главный цилиндр пневмогидравлического привода сцепления: 1 — поршень; 2 — цилиндр; 2А — выход в атмосферу; 3 — рабочая полость пневмоцилиндра; 4, 5, 6 — элементы резистивного потенциометра; 7 — подводящий штуцер; 7А, 7Б — компенсационное и перепускное отверстия; 8 — возвратная пружина; 9 — выход к рабочему цилиндру; 10 — рабочая полость гидроцилиндра; 11А, 11Б — каналы подвода/отвода сжатого воздуха; 12 — электромагнитные клапаны

чего под воздействием сжатого воздуха происходит перемещение шток-поршня пневмоцилиндра 7 и нарастание давления в полости рабочего цилиндра 1. Давление сжатого воздуха в рабочей полости главного пневмоцилиндра 7 регулируется параметрами управляющих сигналов (временем и частотой), подаваемых на определенную комбинацию электромагнитных клапанов 11. В результате срабатывания рабочего цилиндра 1 создается усилие для размыкания ведущих и ведомых дисков сцепления. Конструкция главного цилиндра автоматизированного привода фрикционного сцепления изображена на рис. 3.

Внутри поршня 1 встроен резистор 5, выводы которого соединены с выходным разъемом 4, головка 6 жестко соединена с поршнем 1. При перемещении поршня 1 происходит осевое перемещение головки 6 вдоль резистора 5, два вывода которого используются для питания, а третий является сигнальным. По измеренной величине потенциала напряжения на датчике ЭБУ определяет положение поршня и управляет давлением воздуха в полости 3 через каналы 11А и 11Б, соединенные с блоком пневматических электромагнитных клапанов 12. Под действием давления сжатого воздуха поршень 1 перемещается влево, разобщая полость 10 с расширительным бачком, вследствие чего в полости 10 создается давление жидкости, передаваемое по трубопроводам 4 (см. рис. 2) в рабочий цилиндр 1.

Ключевым моментом в предложенном алгоритме управления фрикционным сцеплением является регулирование давления воздуха в полости 3 (см. рис. 3) силового пневмоцилиндра 2. Аппаратную основу системы управления составляют четыре пневматических электромагнитных клапана 1, 2, 3 и 4 (рис. 4), два из которых постоянно соединены с атмосферой и управляют процессом выпуска сжатого воздуха из полости 3 (см. рис. 3), а два остальных (1 и 2, см. рис. 4) постоянно соединены с ресивером и управляют процессом наполнения рабочей полости пневмоцилиндра сжатым воздухом.

Четыре электромагнитных клапана, изображенные на рис. 4, имеют постоянные проходные сечения и являются двухпозиционными, работающими дискретно в режимах ON/OFF. Время нарастания или убывания давления, а также величина давления в полости 3 (см. рис. 3) зависит от тактовой частоты и времени открытия/закрытия электромагнитных клапанов и определенной комбинации их срабатывания. В общем случае задача управления сухим фрикционным сцеплением сводится к определению зависимости осевого перемещения поршня от давления в рабочей полости 3, а следовательно, от параметров управляющих сигналов на открытие/закрытие клапанов и последовательности их срабатывания. Однако детальный алгоритм управления фрикционным сцеплением на основе

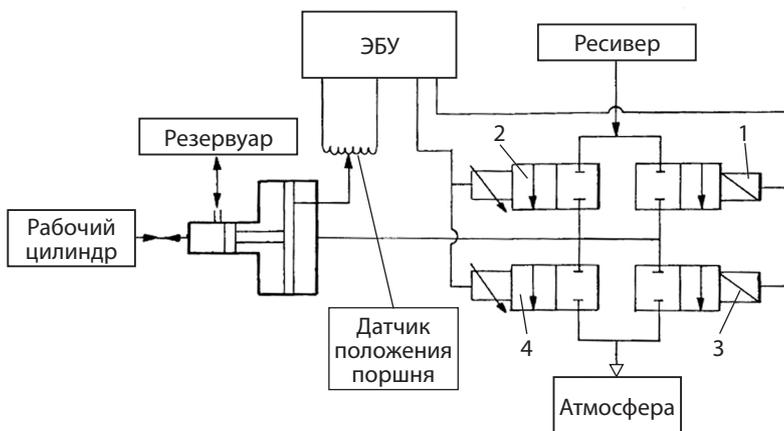


Рис. 4. — Схема управления силовым исполнительным механизмом сцепления: 1, 2, 3, 4 — впускные и выпускные пневматические электромагнитные клапаны

четырёх электромагнитных клапанов в зависимости от величины осевого перемещения штока силового пневмоцилиндра в открытой печати не приводится, являясь «ноу-хау» фирмы-разработчика.

По данным специалистов корпорации Eaton (США), использование вышеописанной комбинации электромагнитных клапанов в программно-аппаратной платформе мехатронной системы автоматизированной трансмиссии обеспечивает приемлемые оценочные показатели процесса управления сухим фрикционным сцеплением на всех режимах движения транспортного средства. При этом генерируемая выходным каскадом контроллера частота сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), подаваемых на обмотки электромагнитных клапанов, составляет 30 Гц, коэффициент заполнения площади

ШИМ-сигналов не превышает 4,7 % [4], а время включения фрикционного сцепления в зависимости от характера переходного процесса варьируется от 0,25 с при переключении передач до 1,8–2,6 с при трогании с места [5].

В целях повышения точности управления фрикционным сцеплением, уменьшения зоны нечувствительности исполнительных механизмов и увеличения скорости их срабатывания специалисты компании Eaton усовершенствовали вышеописанную систему управления фрикционным сцеплением и конструкцию пневматических исполнительных механизмов (рис. 5).

Алгоритм управления фрикционным сцеплением при трогании автомобиля с места и переключении передач, помимо важнейшего процесса замыкания фрикционного узла, включает операции по его полному выключению. Уменьшение

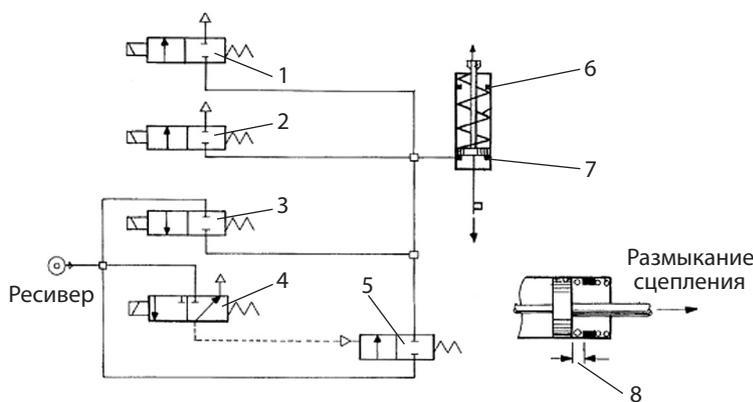


Рис. 5. Схема усовершенствованной системы управления пневматическим ИМ: 1–5 — электромагнитные клапаны; 6, 7 — граничные упоры; 8 — зона нечувствительности

общего времени переходных процессов, а также снижение расхода топлива вследствие снижения инерционных потерь энергии возможны при сокращении времени, затрачиваемого на процесс размыкания фрикционных дисков сцепления. Для ускорения этого процесса вместо двух клапанов с электромагнитным управлением (см. рис. 4) в усовершенствованной конструкции на впуске используется комплект из трех двухпозиционных клапанов (рис. 5).

Электромагнитный клапан 3 обеспечивает подачу сжатого воздуха в рабочую полость пневмоцилиндра, а электромагнитный клапан 4 управляет золотником ускорительного клапана 5, который, в свою очередь, способствует быстрому размыканию фрикционного сцепления. Электромагнитные клапаны 1 и 2, имеющие дроссели с различным проходным сечением, используются при включении фрикционного сцепления [6]. Алгоритм их работы определяется необходимым темпом включения сцепления, то есть они могут быть задействованы как поэлементно, так и комбинированно в зависимости от реализуемого автоматикой режима: трогание с места, маневрирование или переключение передач.

Отличительной особенностью предлагаемой конструкции пневматического цилиндра

являются упоры 6 и 7, ограничивающие ход поршня и используемые для определения граничных значений его перемещения в процессе управления фрикционным узлом. Если пренебречь влиянием таких факторов, как сила сухого трения в уплотнениях, неоднородность рабочего тела и его отличие от идеального газа, то зависимость между давлением P в полости 3 пневмоцилиндра (см. рис. 3) и перемещением S поршня можно представить в виде линейной функции $S = f(P)$ (рис. 6).

Зона k является зоной нечувствительности поршня (Dead Band — DB). При проведении процедуры «калибровки» ИМ сцепления определяются величины DOP и EOP, алгоритм определения которых рассмотрен в работе [1]. После определения этих величин последние записываются в оперативную память ЭБУ и используются в дальнейшем как конечные значения осевого перемещения поршня. Зона нечувствительности пневматического исполнительного механизма при этом существенно уменьшается, и, как следствие, повышается точность управления фрикционным сцеплением.

Из теории движения жидкостей и газов известно, что воздух обладает упругостью и управляется по трем параметрам: давление, объем

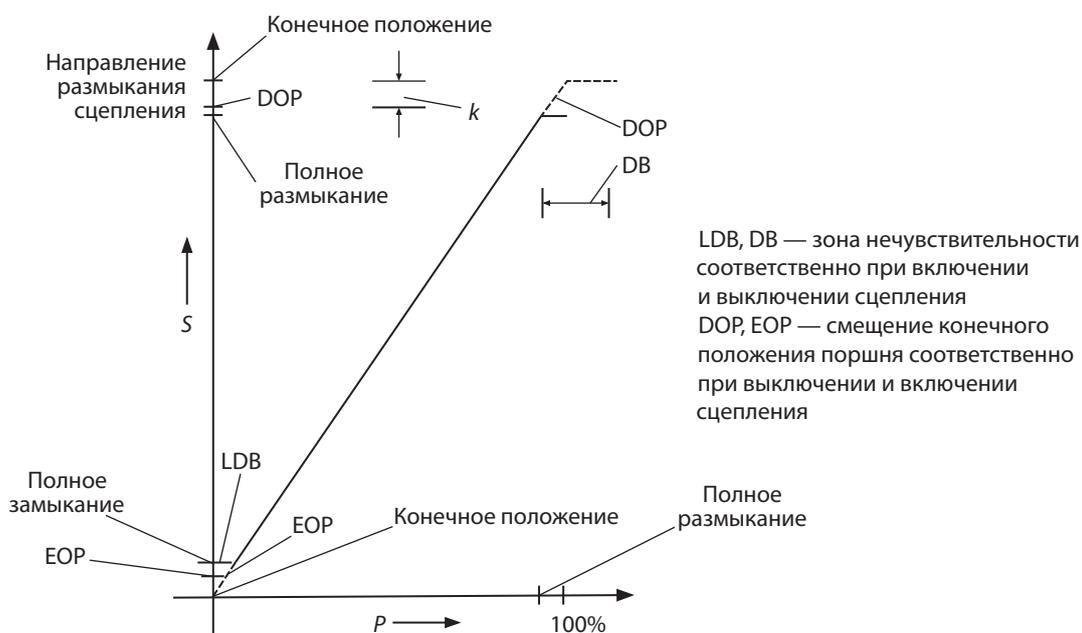


Рис. 6. График зависимости перемещения поршня от давления в пневмоцилиндре: S — перемещение поршня ИМ; P — давление в полости пневмоцилиндра (в процентах от давления при выключении сцепления); k — зона нечувствительности

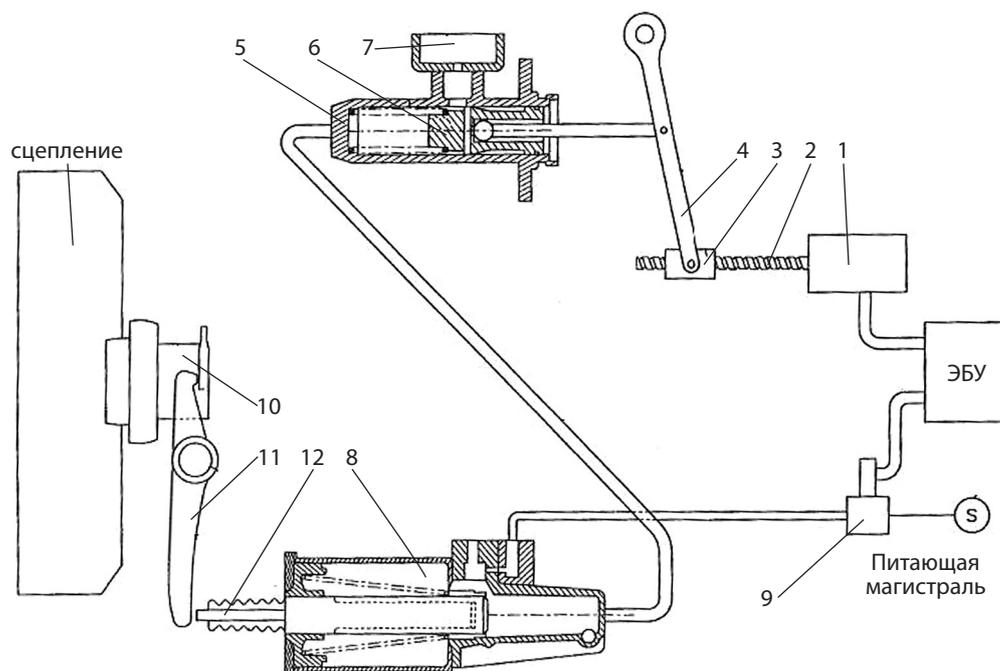


Рис. 7. Принципиальная схема пневмоэлектрогидравлического привода сцепления: 1 — электродвигатель; 2,3 — элементы винтовой передачи; 4 — рычаг; 5 — гидравлический цилиндр; 6 — поршень; 7 — жидкостной резервуар; 8 — силовой цилиндр; 9 — электромагнитные клапаны; 10 — выжимной подшипник; 11 — выжимной рычаг; 12 — шток силового цилиндра

и температура. Поэтому при включении фрикционного сцепления, например при трогании автомобиля с места, неизбежно возникают определенные трудности в онлайн-коррекции работы пневматического исполнительного механизма и определении фактических точек начала буксования ведомой и ведущей частей.

В целях повышения точности управления специалисты компании Eaton разработали комбинированный пневмоэлектрогидравлический привод управления фрикционным сцеплением [9], основными компонентами которого являются электродвигатель 1 (рис. 7), винтовая передача 2–3, главный и рабочий цилиндры 5 и 8, комплект пневматических электромагнитных клапанов 9.

Принцип работы вышеописанной системы управления идентичен функционированию классического гидравлического привода сцепления, только усилие водителя на педали сцепления заменяется силой, развиваемой электрическим мотором под управлением ЭБУ. При вращении якоря электродвигателя 1 усилие передается через винтовую передачу на рычаг 4, и далее на шток поршня главного цилиндра 6, конструкция и принцип работы которого аналогична штатному

главному цилиндру гидропривода фрикционного сцепления [7, с. 64].

Характеристика электродвигателя постоянного тока, как известно, прямолинейна и с увеличением скорости вращения происходит уменьшение крутящего момента на валу якоря [8]. Возможна ситуация, когда усилия, развиваемого электродвигателем 1, недостаточно для быстрого выключения фрикционного сцепления. Для устранения этого недостатка система управления дооснащена пневматическим цилиндром 8, наполнение рабочей полости которого сжатым воздухом регулируется посредством подачи сигнала от ЭБУ на электромагнитные клапаны 9, что создает усилие для перемещения штока поршня 12. Как и в вышеописанном пневмогидравлическом приводе сцепления в качестве обратной связи на электронный блок управления используется положение штока поршня 12, определяемого датчиком перемещения индуктивного типа.

Существенным недостатком всех вышеприведенных приводов является использование рабочих тел различных типов (электричество, сжатый воздух, гидравлическая жидкость) в одном исполнительном механизме, что уменьшает надежность системы автоматического управления.

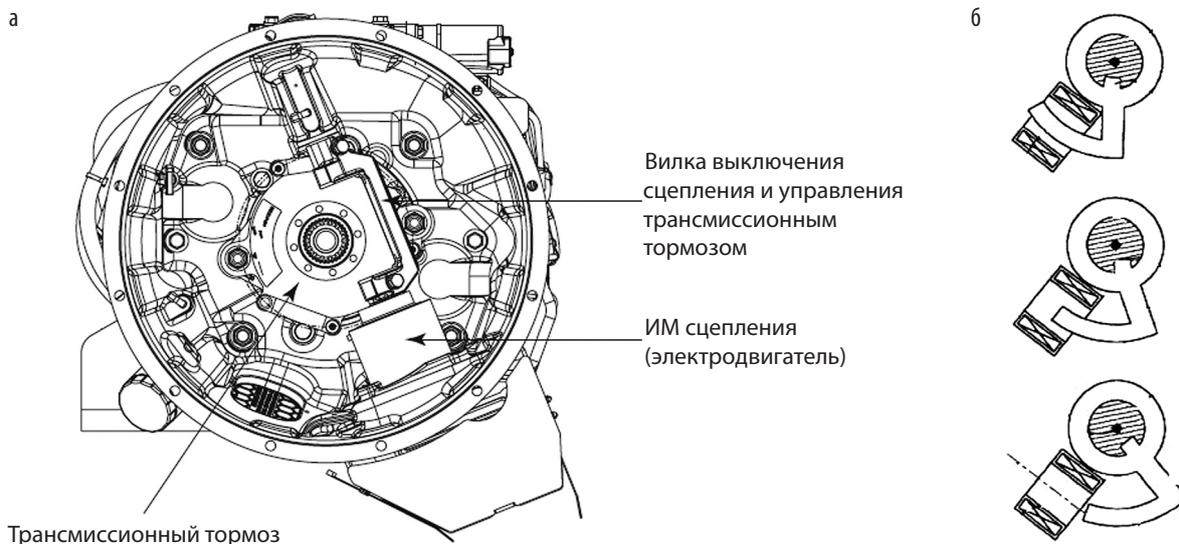


Рис. 8. Электрический ИМ привода фрикционного сцепления

Для увеличения точности управления фрикционным сцеплением при переходных процессах, а также повышения надежности всей системы в мехатронных системах корпорации Eaton (США) последнего поколения применяется электрический привод управления фрикционным сцеплением [2, с. 23]. В качестве исполнительного механизма сцепления используется электродвигатель постоянного тока, работающий под управлением смарт-контроллера трансмиссии. Кроме того, электродвигатель выполняет дополнительную функцию по включению/выключению трансмиссионного тормоза, то есть является универсальным исполнительным механизмом для последовательного управления двумя узлами механической трансмиссии (рис. 8), что сокращает аппаратную часть мехатронной системы при незначительном усложнении конструкции привода фрикционного сцепления.

При выключении сцепления вращение ротора электродвигателя передается через планетарный редуктор с большим передаточным числом на вытяжную вилку, которая, в свою очередь, передвигает выжимной подшипник в сторону основной КП, в результате чего происходит размыкание ведомого и ведущего дисков. Если в дальнейшем необходимо управлять трансмиссионным тормозом, например при переключении на высшую передачу по принципу центральной синхронизации для выравнивания угловых скоростей включаемых элементов КП, то ЭБУ продолжит подавать

управляющий сигнал на обмотки электродвигателя, чтобы нажимной подшипник воздействовал на поверхность неподвижного диска трансмиссионного тормоза, создавая усилие сжатия фрикционного пакета. Таким образом, управление трансмиссионным тормозом происходит только после полного выключения сцепления, что соответствует основным операциям алгоритма центральной синхронизации [5]. Ввиду того, что в существующих литературных источниках подробный алгоритм управления фрикционным сцеплением с электрическим приводом не приводится, а конструкция ИМ сцепления (рис. 8, а) в технической документации представлена схематично, судить о работе системы управления весьма затруднительно. По мнению авторов, в качестве обратной связи при управлении трансмиссионным тормозом используются показания датчика частоты вращения промежуточного вала коробки передач [10]. Для определения положения якоря электродвигателя используется магнитно-индуктивный датчик (см. рис. 8, б), апробированный в конструкциях электрических исполнительных механизмов [11] выбора и включения передачи мехатронных систем Auto/Ultra Shift Transmission.

Помимо вышеописанного варианта электрического ИМ сцепления, существует альтернативная конструкция исполнительного механизма аналога, принципиальная схема работы которого в составе автоматизированного привода изображена на рис. 9 [12]. Вместо встроенного в корпус

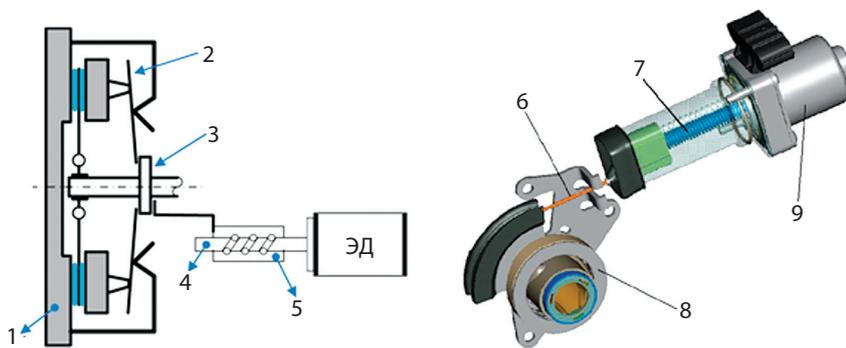


Рис. 9. Электрический ИМ сцепления с винтовой передачей: 1 — маховик; 2 — диафрагменная пружина; 3, 8 — выжимной подшипник; 4, 5, 7 — винтовая передача; 6 — соединяющий кабель; 9 — бесщеточный электродвигатель

электродвигателя планетарного редуктора используется винтовая передача, через которую вращение вала электродвигателя передается на механизм выключения сцепления. В качестве обратной связи в цепи управления фрикционным сцеплением используется угловая скорость вращения ведомой части сцепления, а положение гайки винтовой передачи, следовательно, положение рычага выключения сцепления, определяется с дискретностью в 100 Гц датчиком перемещения потенциометрического типа.

Параллельно с переходом на электрические ИМ в мехатронных системах управления

фрикционным сцеплением наметилась устойчивая тенденция к совершенствованию аппаратной платформы и алгоритмов управления исполнительными механизмами, использующими в качестве рабочего тела сжатый воздух. В целях повышения точности управления и быстродействия исполнительных механизмов, специалисты компании ZahnradFabric Friedrichshafen AG (ZF — Германия) разработали несколько вариантов систем управления пневматическими ИМ сцепления, принципиальная схема работы и конструкция которых изображены на рис. 10 и 11 [13].

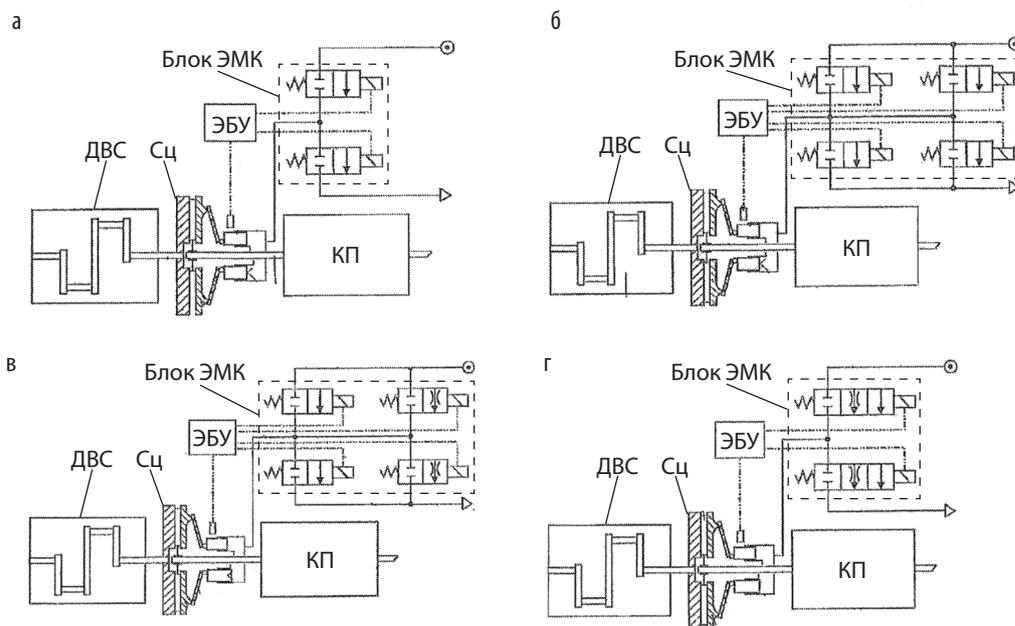


Рис. 10. Принципиальная схема управления пневматическим ИМ сцепления: а, б, в, г — возможные комбинации впускных и выпускных электромагнитных клапанов (ЭМК)

В мехатронной системе ZF FS-Tronic первого поколения [14, с. 187] использовались два пневматических электромагнитных клапана для управления ИМ привода сцепления (см. рис. 10, а). Один из клапанов был задействован в процессе наполнения рабочей полости силового цилиндра сжатым воздухом, а посредством другого осуществлялось сообщение рабочей полости пневмоцилиндра с атмосферой. Оба клапана имели постоянное проходное сечение и работали только по двум устойчивым состояниям ON/OFF в зависимости от характера управляющего сигнала контроллера трансмиссии.

В процессе развития и совершенствования систем управления фрикционным сцеплением появлялись альтернативные варианты управления силовым пневмоцилиндром (см. рис. 10, б). Так, для повышения качества управления и уменьшения времени переходных процессов при включении-выключении сцепления в систему управления были введены еще два дополнительных электромагнитных клапана с узкими проходными сечениями дросселей [13]. При быстром наполнении или опорожнении силового цилиндра срабатывали два соответствующих электромагнитных клапана из четырех, а при среднем темпе включения сцепления в алгоритме управления был задействован только один электромагнитный клапан.

Упрощение алгоритма управления фрикционным сцеплением с одновременным сокращением аппаратной части системы управления возможно при использовании двух пневматических трехпозиционных электромагнитных клапанов (см. рис. 10, в). Каждый клапан имеет три устойчивых состояния, смена которых возможна только при последовательном управлении. На начальной

фазе как сброс, так и наполнение полости пневмоцилиндра осуществляется дросселированием рабочего тела. При необходимости ускорить тот или иной процесс, например при недопустимом увеличении работы буксования сцепления, на обмотки соответствующего электромагнитного клапана подается ШИМ-сигнал с большим коэффициентом заполнения площади, вследствие чего проходное сечение клапана увеличивается до максимально возможного (в работу вступает третья секция ЭМК, см. рис. 10, з) и происходит позиционное корректирование вала вилки выключения фрикционного сцепления.

В последних модификациях мехатронных систем компании ZhanradFabric наблюдается тренд по управлению процессами наполнения и сообщения с атмосферой рабочей полости силового пневмоцилиндра привода сцепления посредством двух пневматических электромагнитных клапанов на каждый цикл (см. рис. 10, в). Один из них имеет большое проходное сечение, а другой — уменьшенное (см. рис. 11). В качестве управляющего используется модулированный низкочастотный широтно-импульсный или частотно-импульсный сигнал напряжения [15]. Клапаны могут работать как попарно синхронно, так и в режиме последовательного поэлементного управления. Управляемыми параметрами являются время и тактовая частота открытия-закрытия клапанов. Электронная система обеспечивает работу сцепления на всех режимах без энергетических и динамических перегрузок элементов трансмиссии, что, безусловно, возможно только при наличии точной и практически безинерционной обратной связи [16, с. 20]. Однако подробной информации, по какому именно параметру осуществляется обратная

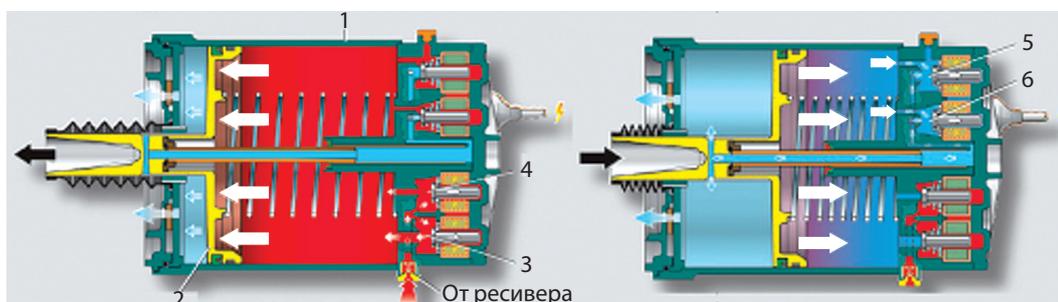


Рис. 11. Пневматический исполнительный механизм сцепления с системой управления: 1 — силовым пневмоцилиндр; 2 — поршень пневмоцилиндра; 3, 4 и 5, 6 — соответственно впускные и выпускные электромагнитные клапаны с разными проходными сечениями

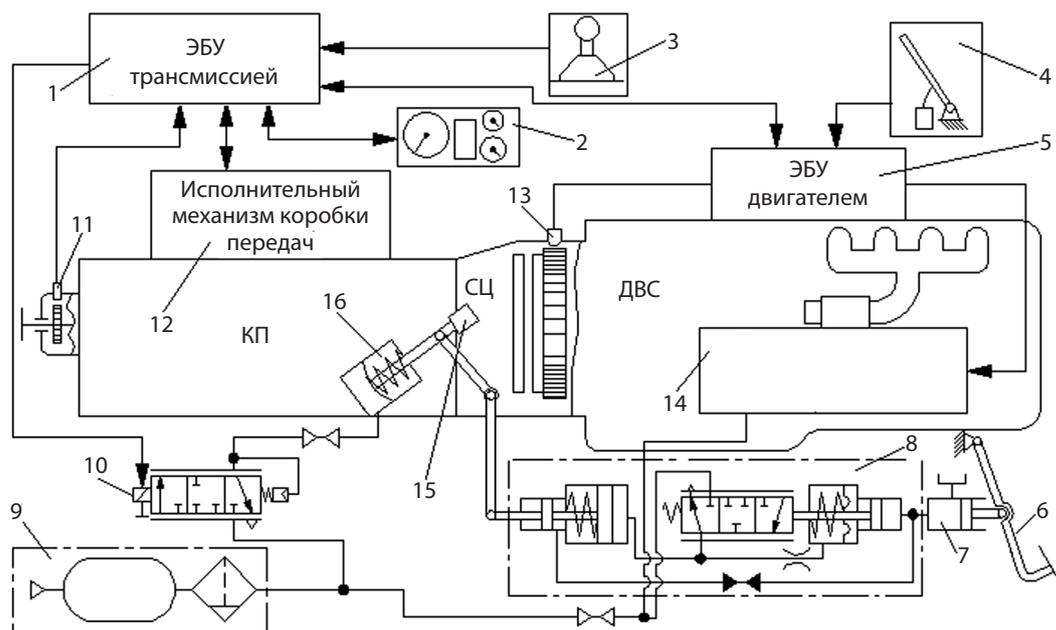


Рис. 12. Принципиальная схема мехатронной системы управления силовым агрегатом с автоматизированным приводом фрикционного сцепления: 1, 5 — ЭБУ трансмиссией и двигателем; 2 — ЖК-монитор; 3 — селектор режимов; 4 — педаль управления топливоподачей; 6, 7, 8 — педаль, гидроцилиндр и пневмогидроусилитель сцепления; 9 — питающая часть пневмопривода; 10 — пропорциональный электромагнитный клапан; 11, 13 — датчики частоты вращения; 12, 14 — исполнительные механизмы КП и моторного тормоза; 15 — датчик перемещения; 16 — пневмокамера

связь, его пороговым значениям, типу используемого в цепи управления регулятора (пропорционально-интегрального, дифференциального или интегрально-дифференциального), тактовой частоте широтно-импульсных сигналов и алгоритму управления электромагнитными клапанами, в доступных литературных источниках не приводится.

Следует отметить, что все четыре электромагнитных клапана интегрированы в корпус исполнительного механизма (см. рис. 11), что, с одной стороны, предохраняет электрические компоненты мехатронной системы от воздействия внешних факторов (влаги, пыли, соли и т. д.), но, с другой стороны, способствует существенному увеличению стоимости узла и исключает при проектировании возможность использования штатных аппаратов пневмосистемы автомобиля (пневмоцилиндров, электропневмоклапанов, пневмокамер и т. д.).

К недостаткам всех вышеописанных исполнительных механизмов сцепления следует отметить:

- недостаточно полное использование возможностей пропорционального управления элект-

ромагнитными клапанами, ввиду двухпозиционного золотникового механизма и использования низкочастотных ШИМ-сигналов с малым коэффициентом заполнения площади;

- отсутствие дублирующих контуров управления фрикционным узлом и, как следствие, невозможность реализации, так называемой, аварийной функции, позволяющей сохранить работоспособность мехатронной системы и подвижность транспортного средства в случае выхода из строя электронных компонентов привода.

Проанализировав достоинства и недостатки современных исполнительных механизмов мехатронных систем управления сухим фрикционным сцеплением, специалисты кафедры «Автомобили» БНТУ спроектировали и создали принципиально новый автоматизированный привод фрикционного сцепления (рис. 12), техническая новизна которого подтверждена патентом на изобретение [17].

Помимо дублирующего независимого пневмогидравлического контура, состоящего из педали 6 с гидроцилиндром 7 и пневмогидроусилителя 8 (см. рис. 12), отличительной особенностью предлагаемого технического решения

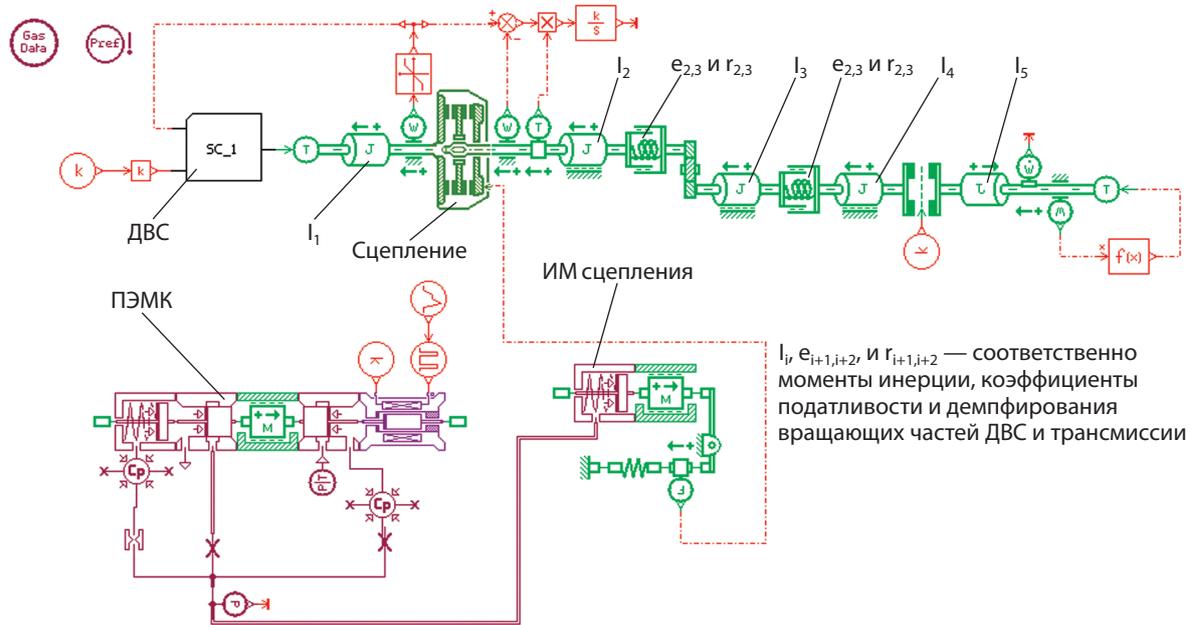


Рис. 13. Имитационная модель автоматизированного силового агрегата в Amesim

Таблица 1

Уруго-диссипативные и инерционные параметры модели

$I_1, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$I_2, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$I_3, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$I_4, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$I_5, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
2,5	0,26	3,18	0,08	373,7
$e_{2,3}, \text{рад/Нм}$	$e_{3,4}, \text{рад/Нм}$	$r_{2,3}, \text{Нм}\cdot\text{с/рад}$	$r_{3,4}, \text{Нм}\cdot\text{с/рад}$	
$6,74 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	13,83	73,92	

I_1, I_2, I_3 — моменты инерции соответственно вращающихся частей ДВС, сцепления и коробки передач;
 I_4, I_5 — моменты инерции соответственно колес и автомобиля, приведены к выходному валу КП;
 $e_{2,3}, e_{3,4}$ и $r_{2,3}, r_{3,4}$ — коэффициенты податливости и демпфирования элементов сцепления и валов КП

Таблица 2

Оценочные показатели процесса трогания с места

Показатели	Передача		Допускаемые значения
	I передача	II передача	
Удельная максимальная мощность ($\text{Вт}/\text{см}^2$)	19,05	26,86	45
Удельная работа буксования ($\text{Дж}/\text{см}^2$)	10,07	11,43	20
Коэффициент динамических нагрузок	1,66	1,33	2,5
Максимальное значение производной продольного ускорения автомобиля ($\text{м}/\text{с}^3$)	49,6	24,93	50–60

является наличие пропорционального электромагнитного клапана 10 (ПЭМК) и пневматической камеры 16. Первое обстоятельство позволяет реализовывать так называемую стратегию непосредственного управления пропорциональным клапаном на основе высокочастотного широтно-импульсного сигнала с последовательным изменением коэффициента заполнения площади, что дает возможность прецизионно управлять темпом включения сцепления и оперативно реагировать на превышение критерийных ограничений по нагруженности сцепления без существенного увеличения общего времени переходного процесса. Использование пневмокамеры, имеющей меньшую зону нечувствительности по сравнению с пневмоцилиндром, увеличивает на 20–25 мс быстродействие привода, что также положительно сказывается на общем времени процессов трогания с места и переключения передач в автоматическом режиме работы силового агрегата.

Для оценки работоспособности спроектированного автоматизированного привода фрикционного сцепления и отработки предлагаемой стратегии управления была разработана имитационная модель (рис. 13) мехатронной системы управления силовым агрегатом грузового автомобиля с детальной проработкой механических, пневматических и электрических компонентов мехатронной системы на базе мультидисциплинарной платформы Amesim. Параметры имитационной модели приведены в табл. 1.

Результаты моделирования процесса трогания с места 20-тонного грузового автомобиля в автоматическом режиме работы силового агрегата на базе платформы Amesim представлены на рис. 14. Управление пропорциональным электромагнитным клапаном автоматизированного привода сцепления (см. рис. 13) производилось на основе модулированного широтно-импульсного сигнала с частотой 200 Гц с изменяемым коэффициентом заполнения площади в процессе буксования ведомой и ведущей частей фрикционного сцепления.

Анализ результатов моделирования процесса трогания с места показал, что при поддержании оборотов коленчатого вала ДВС в пределах 1200 ± 20 об./мин на момент начала замыкания фрикционного сцепления и обеспечении темпа включения фрикционного узла в $3,57\text{--}3,75 \text{ с}^{-1}$ значения оценочных показателей (см. табл. 2)

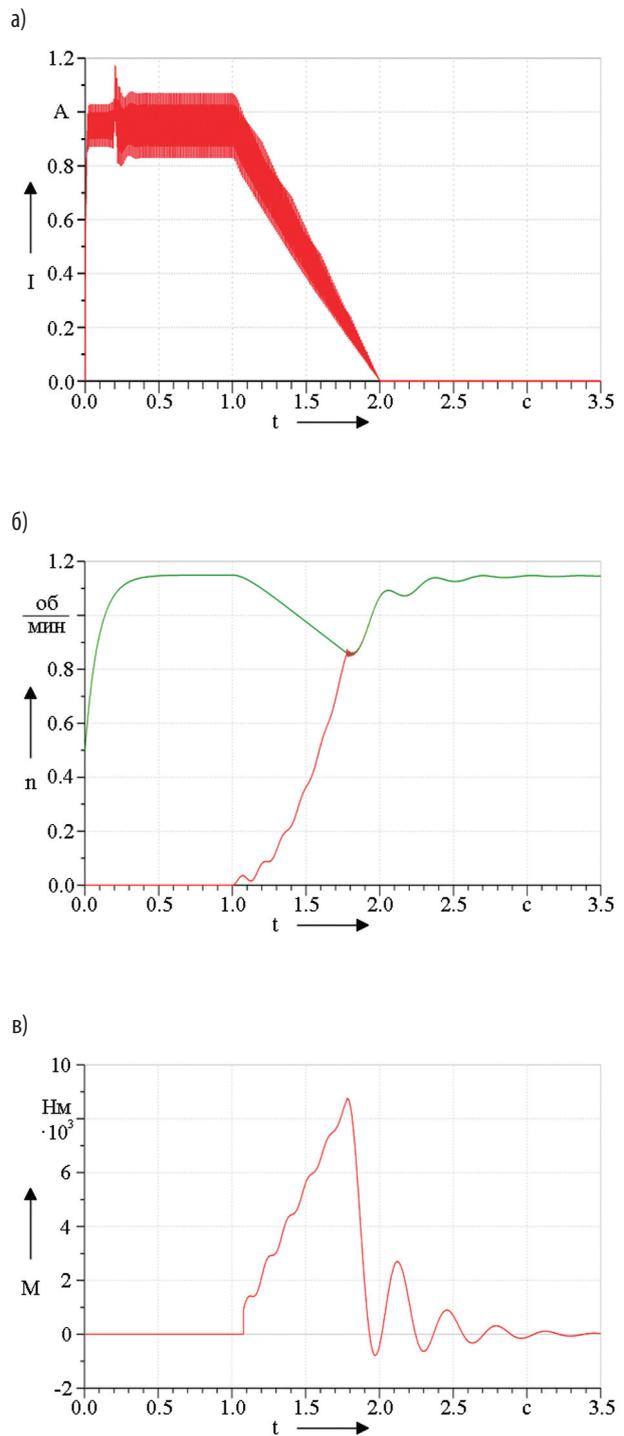


Рис. 14. Осциллограммы процесса включения сцепления при моделировании трогания с места на базе платформы Amesim:

- а) осциллограмма изменения силы тока в обмотках пропорционального электромагнитного клапана;
- б) осциллограмма частот вращения ведущей и ведомой частей фрикционного сцепления, об/мин;
- в) осциллограмма крутящего момента на выходном валу коробки передач

исследуемого переходного процесса не превышают критериальных ограничений, указанных в нормативно-технической документации и литературных источниках [16, с. 240].

Таким образом, проведенные исследования позволили установить основные тенденции в современных автоматизированных системах управления фрикционными сцеплениями грузовых автомобилей и автопоездов, способствовали развитию инновационного подхода к проектированию автоматизированного привода с дублирующим пневмогидравлическим контуром, а также подтвердили его функциональную работоспособность при пропорциональном управлении электромагнитным клапаном на основе модулированного высокочастотного широтно-импульсного сигнала с однопараметрической обратной связью по относительной скорости вращения ведомой и ведущей частей фрикционного сцепления.

Заключение.

На основании проведенного аналитического обзора необходимо отметить, что в мировом автомобилестроении наметился устойчивый тренд к оснащению механических ступенчатых трансмиссий высокоэффективными автоматизированными системами управления сухим фрикционным сцеплением. Автоматизация работы сцепления является важной и весьма актуальной задачей развития автомобилестроительной отрасли Республики Беларусь, поскольку мехатронные системы позволяют осуществлять процессы трогания с места, маневрирования и переключения передач в автоматическом режиме работы, что увеличивает долговечность силового агрегата за счет снижения нагруженности элементов трансмиссии, повышает технический уровень и конкурентоспособность продукции отечественного машиностроения.

По типу рабочего тела, используемого для выполнения работы по перемещению рычага выключения сцепления, исполнительные механизмы современных автоматизированных систем управления сухим фрикционным сцеплением классифицируются на электрические, пневматические, гидравлические, комбинированные, однако наибольшее распространение на современном этапе развития автомобилестроения получили ИМ пневматического типа ввиду наличия источника энергии на борту

автомобиля, возможности компенсации утечек и возможности использования штатных пневмоаппаратов систем управления в автоматизированном приводе.

Результаты исследований показали, что при использовании стратегии непосредственного управления пропорциональным клапаном на основе последовательного изменения коэффициента заполнения площади модулированного широтно-импульсного сигнала с частотой 200 Гц обеспечиваются удельная максимальная мощность и работа буксования сцепления в пределах 19,05 Вт/см² и 10,07 Дж/см² соответственно, коэффициент динамических нагрузок не превышает 1,66, а максимальное значение производной продольного ускорения грузового автомобиля составляет 49,6 (м/с³), что подтверждает функциональную работоспособность разработанного авторами автоматизированного привода фрикционного сцепления с дублирующим пневмогидравлическим контуром, а также целесообразность его использования в отечественной автомобильной промышленности.

Литература:

1. Touch point identification for automatic clutch controller: pat. US5337868, int. Cl.5 B60K 41/02 / Chia H. Liu, James M. Slicker; assignee Eaton Corp. — No. 126107; filed: 23.09.1993; date of patent: 16.08.1994. — 12 p.
2. Eaton® Fuller® transmission: Eaton Gen III Automated Transmissions TRSM0930 EN-US / Eaton tech. information: TRSM0930EN-US_2015_2. — Eaton Corp. USA, 2015. — 156 p.
3. Eaton® Fuller® transmission: UltraShift® PLUS Automated Transmissions TRTS0940 EN-US / Eaton tech. information: TRTS0940EN-US_2015_11. — Eaton Corp. USA, 2015. — 588 p.
4. Actuator control system for devices such as clutches: par. EP 0512690 A1 int. Cl. F15B 11/06, F16D 25/14, F16H 63/30 / Cottam, Michael John, Glen Park Drive, Hesketh Bank, Preston, Lancashire(GB); Applicant: EATON CORPORATION — Eaton Center — Cleveland, Ohio 4411 4(US); filed: 09.04.92; date of patent: 11.11.1992. — 12 p.
5. Белевич, А. В. Исследование процесса переключения передач с центральной синхронизацией включаемых элементов / А. В. Белевич, О. С. Руктешель, В. А. Кусяк // Сборник научных трудов «Актуальные вопросы машиноведения». — 2016. — Вып. 5. — С. 82–86.
6. Control method/system for pneumatically actuated clutch: pat. 5676229 USA, int. Cl.6 F16D

48/06 / Ian Richard, Joseph Bates; assignee Eaton Corp. — No. 600570; filed: 13.02.1996; date of patent: 14.10.1997. — 9 p.

7. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Трансмиссия. Учебное пособие для вузов / под ред. А. И. Гришкевича. — Минск: Высш. шк., 1985.

8. Кириллов, А. В. Электрический привод / А. В. Кириллов, Д. П. Степанюк, Н. Д. Яснев. — Екатеринбург, 2016. — 109 с.

9. Actuator system for vehicle automated clutches with electric motor actuator and pressurized fluid override: par. US 5934432 Int. Cl.6 F16D 19/00; F16D 13/44; F15B 7/00; F01B 31/14/ Ian Richard Joseph Bates, UK; Assignee: Eaton Corporation, Cleveland, Ohio; Filed: Aug — 25 1997; date of patent: 11.08.1999. — 8 p.

10. Transmission shifting mechanism and position sensor: pat. 5743143 USA, int. Cl.6 F16H 59/04 / J. F. Carpenter, M. L. Lanting, M. J. Huggins, D. L. Wadas; assignee Eaton Corp. — No. 695052; filed: 9.08.96; date of patent: 28.04.98. — 11 p.

11. Баханович, А. Г. Тенденции развития исполнительных механизмов управления автоматизированными механическими коробками передач / А. Г. Баханович, О. С. Руктешель, В. А. Кусяк, Д. С. Белабенко // Новости науки и технологий. — 2016. — № 1(36). — С. 8–19.

12. Electronic Clutch Actuator/ Production Information KNORR-BREMSE / Webmaster: 2008. — 6 p.

13. Method for controlling an automated friction clutch: pat. US8874340B2, int. Cl. G06F 7/00 / Rene Salewski; assignee ZF Corp. — No. 14/061826; filed: 24.10.2013; date of patent: 28.10.2014. — 13 p.

14. Heisler, H. Advanced Vehicle Technology / Heinz Heisler, second edition / Elsevier Science — Oxford UK, 2002. — 663 p.

15. Красневский, Л. Г. Состояние и перспективы развития автоматических трансмиссий мобильных машин / Л. Г. Красневский // Сборник научных трудов «Актуальные вопросы машиноведения»; редкол.: А. А. Дюжев (гл. ред.) [и др.]. — 2012. — Вып. 1. — С. 115–121.

16. Кусяк, В. А. Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов / В. А. Кусяк, О. С. Руктешель. — Минск: БНТУ, 2015. — 295 с.

17. Автоматизированный привод сухого фрикционного сцепления транспортного средства / А. Г. Баханович, В. А. Кусяк, А. А. Филимонов, А. В. Белевич // Патент на изобретение № 20801 Республика Беларусь МКИ F16H 21/48. Заявл. 01.03.2013. опубл. 09.11.2016. — 12 с.