

УДК 629.03

А.В. БЕЛЕВИЧ; В.И. ЛУЦКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

О.С. РУКТЕШЕЛЬ, д-р техн. наук; В.А. КУСЯК, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ОТРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ В СТЕНДОВЫХ УСЛОВИЯХ

В статье приводится принципиальная схема испытательного комплекса для отработки алгоритмов мехатронной системы переключения передач механической трансмиссии магистрального автопоезда в стендовых условиях. Дается описание программно-аппаратной платформы мехатронной системы и алгоритмов переключения передач в командном и автоматическом режимах управления силовым агрегатом. Приводятся результаты полунатурного эксперимента по исследованию процесса переключения на смежную высшую и низшую передачу с сопоставлением оценочных показателей качества соответствующих переходных процессов.

Ключевые слова: автопоезд, автоматизированный силовой агрегат, мехатронная система, алгоритм переключения передач, полунатурный эксперимент

Введение. Автоматизированные механические трансмиссии нашли широкое применение в силовых агрегатах автотранспортных средств. Мехатронные системы переключения передач нового поколения Mercedes Telligent (Германия), Scania Opticruise (Швеция), Iveco Euro Tronic automated (Италия), Volvo I-Sync (Швеция), ZF AS-Tronic (Германия), Eaton Fuller Auto/Ultra Shift transmission серийно устанавливаются на грузовые автомобили и магистральные автопоезда полной массой до 44 тонн, улучшая их тягово-скоростные показатели и топливную экономичность. Немаловажным аспектом является и тот факт, что использование подобных систем увеличивает долговечность и упрощает диагностику силового агрегата, а также снижает психофизическую нагрузку водителя и, как следствие, повышает безопасность дорожного движения.

Для отечественного автомобилестроения создание надежной, многофункциональной мехатронной системы переключения передач на базе механической трансмиссии остается нерешенной проблемой, а белорусские предприятия-производители грузовых автомобилей и автобусов (ОАО «МАЗ», РУП «МЗКТ», ОАО «АМАЗ», УП «Неман» и др.) вынуждены закупать автоматизированные механические и гидромеханические силовые агрегаты за рубежом. Создание полноценного опытно-промышленного образца автотранспортного средства с автоматизированным силовым агрегатом возможно только при наличии научной методологии проектирования мехатронных систем данного класса. Последнее требует широчайшего спектра углубленных исследований, начиная от разработки технических требований к проектируемой мехатронной системе, методики выбора программно-аппаратной платформы и стратегии управления исполнительными механизмами и заканчивая разработкой алгоритмического и программного обеспечения функционирования сложного технического объекта.

Учитывая изложенное, проверка функциональной работоспособности спроектированной мехатронной системы переключения передач автопоезда в стендовых условиях является актуальной задачей, решение которой позволит повысить технический уровень и конкурентоспособность продукции автомобилестроительных предприятий.

Основная часть. В рамках государственной научно-технической программы «Белавтотракторостроение» специалисты Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Белорусского национального технического университета спроектировали и оснастили контрольно-измерительной аппаратурой испытательный комплекс для отладки мехатронной системы переключения передач (МСПП), позволяющей осуществлять процесс переключения как в командном, так и автоматическом режимах управления силовым агрегатом. Принципиальная схема стенда, монтаж которого был произведен на базе испытательного центра Минского автомобильного завода, изображена на рисунке 1.

Стенд инерционный, разомкнутого типа, включает серийный силовой агрегат, маховые массы с механизмом торможения, пневматическую питающую часть, систему управления стендом и измерительно-информационную систему.

Силовой агрегат состоит из дизельного двигателя ЯМЗ-7511.10, сухого фрикционного сцепления ЯМЗ-184 и девятиступенчатой коробки передач (КП) МАЗ-543205.

Объектом отладочных испытаний является МСПП состоящая из измерительного, управляющего и исполнительного блоков. Измерительный блок включает датчики перемещения 12, 17, 18 (см. рисунок 1), частоты вращения 19, 20, 21 и концевые выключатели 22, 23, 26. Исполнительный блок состоит из поршневых и диафрагменных исполнительных механизмов ДВС, сцепления и КП. Управляющий блок, условно показанный на схеме как контроллер АМСУСА (таблица), построен на базе распределенной архитектуры и содержит следующие компоненты единой программно-аппаратной платформы: системный концентратор, контроллер обработки избирателя режимов, контроллер обработки информационных и формирования управляющих сигналов системы и системный индикатор.

Измерительно-информационная система испытательного стенда представляет собой комплекс устройств для получения, преобразования и регистрации информации о функционировании объекта испытаний.

На пульте 26 управления (см. рисунок 1), имитирующем рабочее место водителя, расположены органы уп-

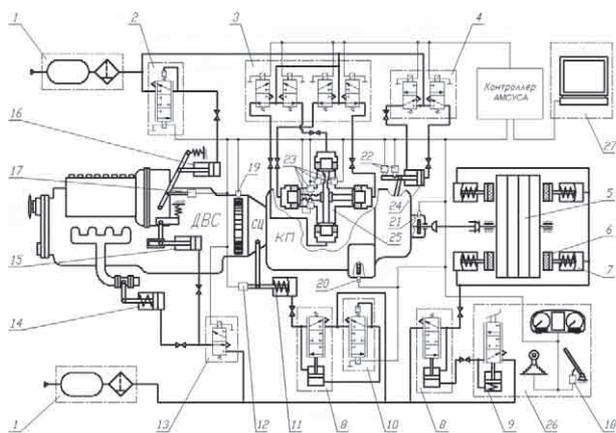


Рисунок 1 — Принципиальная схема стенда МСПП:
 1 — питающая часть пневмопривода; 2, 10 — пропорциональные электромагнитные клапаны управления соответственно топливоподачей и сцеплением; 3, 4 — блок электромагнитных клапанов управления исполнительным механизмом соответственно КП и демультипликатора; 5 — инерционная маховая масса; 6 — тормозная колодка; 7 — тормозная камера; 8 — ускорительный клапан; 9 — тормозной кран; 11 — исполнительный механизм (пневмокамера) привода сцепления; 12, 17, 18 — датчики перемещения; 19, 20, 21 — датчики частоты вращения; 22, 23 — концевые выключатели; 13 — клапан управления моторным тормозом и выключением подачи топлива; 14, 15, 16 — исполнительные механизмы соответственно моторного тормоза, выключения подачи топлива и рычага топливоподачи; 24 — исполнительный механизм демультипликатора; 25 — исполнительный механизм КП; 26 — пульт управления; 27 — ПЭВМ

правления узлами стенда и контрольные приборы, позволяющие следить за работой автоматизированной мехатронной системы. Оператор выбирает селектором режим работы силового агрегата, а затем воздействует на педаль

18 акселератора. Изменение топливоподачи дизельного двигателя, включение-выключение сцепления и переключение ступеней в коробке происходит автоматически в результате срабатывания пневматических исполнительных механизмов 11, 16, 24, 25 при подаче сигнала от контроллера на соответствующий электромагнитный клапан 2, 3, 4, 10 или их комбинацию.

Функциональность разработанной мехатронной системы и работоспособность алгоритмов, управляющих автоматизированным силовым агрегатом, подтверждена серией опытных испытаний. В частности, на испытательном стенде были апробированы различные стратегии управления исполнительными механизмами 11, 16 сцепления и двигателя, получены их рабочие характеристики, определены зоны управления пропорциональных клапанов 2 и 10, а также исследован процесс трогания с места, в том числе с пропорционально-интегральным регулятором в цепи управления [1, 2].

Результаты испытаний показали, что спроектированная мехатронная система позволяет осуществлять переключение в командном или автоматическом режимах работы силового агрегата. Синхронизаторы из конструкции коробки передач не исключены, благодаря чему возможна организация процесса переключения как по принципу индивидуальной синхронизации включаемых элементов КП, так и по алгоритму с центральной синхронизацией [3, с. 106, рисунок 2.21].

Управление коробкой передач в командном режиме переключения осуществлялось с помощью подрулевого селектора. При перемещении рычага селектора вверх, происходило замыкание концевого выключателя и в контроллер поступал цифровой сигнал, инициирующий начало процесса переключения на высшую смежную пе-

Таблица — Основные технические характеристики контроллера АМСУСА

Наименование показателей	Характеристика
Тип системы	Распределенная на базе канала последовательной передачи данных CAN 2.0B
Состав системы	Системный концентратор, обработки информационных и формирования управляющих сигналов системы, системный индикатор, контроллер обработки избирателя режимов.
Количество входов и их конфигурация	Аналоговый — 2 шт.; частотный — 4 шт.; дискретный — 8 шт.
Количество выходов и их конфигурация	8 каналов ШИМ с нагрузкой до 8 А на канал
Напряжение питания U_B , В	24 В
Перегрузка по напряжению, В Напряжение сброса, В Напряжение автосохранения, В	72 В; 18 В; 18–48 В
Рабочий диапазон температур, С	–40–+120 °С
Интерфейсы	CAN 2.0B, I2C, UART, SPI
Используемые микроконтроллеры	8-ми разрядные, Silicon laboratories,
Программная память, Кбайт	Flash 128 Кбайт
Память для обработки данных, Кбайт	RAM 8 Кбайт

редачу. При перемещении рычага в противоположном направлении инициировался процесс переключения на одну передачу «вниз».

После обработки сигнала от селектора и последующего уменьшения топливоподачи, контроллер формировал широтно модулированный сигнал с 90 %-й степенью заполнения на пропорциональный клапан 10 управления сцеплением (см. рисунок 1). Под действием усилия со стороны пневмокамеры 11 происходило перемещение рычага сцепления с последующим размыканием ведущего и ведомого диска. Выключение текущей передачи, выбор штока и включение последующей смежной передачи осуществлял исполнительный механизм 25 при подаче контроллером сигнала на определенную комбинацию двухпозиционных электромагнитных клапанов блока 3. Затем фрикционное сцепление замыкалось с темпом определяемым пропорционально интегральным регулятором, обеспечивая тем самым, качественное протекание переходного процесса во всем диапазоне режимов нагружения.

Таким образом, алгоритм переключения передач в командном режиме управления силовым агрегатом представлял собой следующую последовательность операций: *выбор селектором направления переключения — управление двигателем (уменьшение топливоподачи) и выключение сцепления — выключение текущей передачи — выбор штока последующей передачи — синхронизация скоростей включаемых элементов КП — включение последующей передачи — включение сцепления — управление двигателем (увеличение топливоподачи).*

Согласно программе стендовых испытаний [4] мехатронная система должна обеспечивать:

- последовательное переключение передач с I по V в прямом и обратном порядке при включенном нижнем диапазоне демультипликатора;
- последовательное переключение передач с I по IV в прямом и обратном порядке при включенном верхнем диапазоне демультипликатора;
- последовательное переключение передач с I по IX в прямом и обратном порядке при переключении диапазонов демультипликатора.

В ходе проведения полунатурного эксперимента все вышеперечисленные требования были выполнены. Отдельные результаты исследования процесса переключения передач в командном режиме управления КП на испытательном стенде приведены на рисунках 2 и 3.

Как видно из представленных осциллограмм, включение фрикционного сцепления происходило с использованием пропорционально-интегрального регулирования на основе обратной связи по оборотам промежуточного вала [1, с. 47, формула 1]. При этом в зависимости от направления переключения, общее время переключения передачи составило 0,8...2,6 с. Причем максимальное время в 2,6 с наблюдалось при переключении с 5-й на 6-ю передачу, что обусловлено необходимостью переключения диапазонного редуктора (демультипликатора).

Обороты двигателя после включения последующей передачи на момент начала включения сцепления варьировались от 1200 до 1650 об/мин. Процесс замыкания ведомой и ведущей частей сцепления занимал 0,31...0,43 с, что соответствовало среднему темпу включения фрикционного узла в $8,1 \text{ с}^{-1}$. Согласно результатам моделирования, при данных параметрах алгоритма

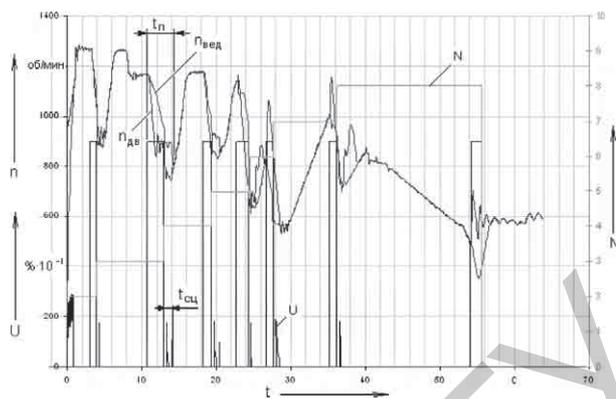


Рисунок 2 — Осциллограмма процесса командного переключения передач «вверх»: U — управляющий сигнал ШИМ; t — время; $n_{дв}$, $n_{вед}$ — частота вращения соответственно коленвала ДВС и ведущей части сцепления; N — номер передачи в КП; $t_{п}$ — общее время переключения передач; $t_{сц}$ — время включения сцепления

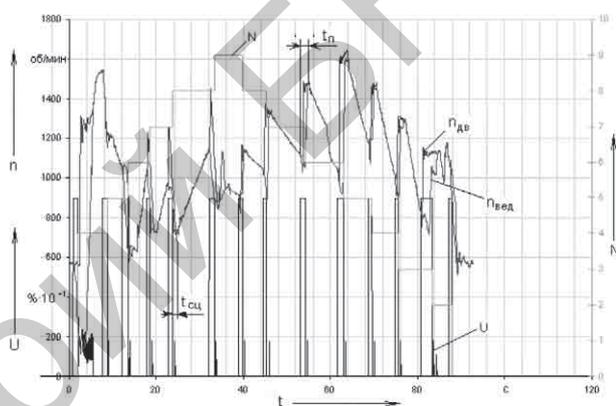


Рисунок 3 — Осциллограмма процесса командного переключения передач «вверх» с IV по IX передачу; «вниз» с IX по II передачу: U — управляющий сигнал ШИМ; t — время; $n_{дв}$, $n_{вед}$ — частота вращения соответственно коленвала ДВС и ведущей части сцепления; N — номер передачи в КП; $t_{п}$ — общее время переключения передач; $t_{сц}$ — время включения сцепления

переключения передач удельные работа и мощность буксования фрикционного сцепления не превышают $0,24 \text{ Дж/см}^2$ и $1,6 \text{ Вт/см}^2$ соответственно.

В отличие от командного режима управления КП, где водитель (оператор) сам выбирал момент переключения передач, в автоматическом режиме работы силового агрегата инициализация процесса переключения передач осуществлялась электронным блоком. В качестве информационных параметров использовались угловая скорость коленчатого вала двигателя и положение педали управления топливоподачей ДВС, т. е. в электронный блок управления были «прошиты» полиномы вида:

$$\omega_{в} = (1000 + 0,7\alpha + 0,083\alpha^2) / 9,55 \quad (1)$$

$$\omega_{н} = (695 + 2,68\alpha + 0,024\alpha^2) / 9,55$$

где $\omega_{в}$, $\omega_{н}$ — угловая скорость коленчатого вала двигателя на момент переключения передач «вверх» и «вниз» соответственно, рад/с; α — положение органа управления топливоподачей, %.

Данные зависимости позволяли организовывать начало процесса переключения «вверх» или «вниз» в облас-

ти максимальной мощности или максимального момента соответственно. При переключении «вверх» после размыкания сцепления контроллер снижал обороты двигателя, подавая сигнал на электромагнитный клапан 13 включения моторного тормоза (см. рисунок 1). При переключении «вниз» после включения требуемой передачи происходило увеличение топливопода-

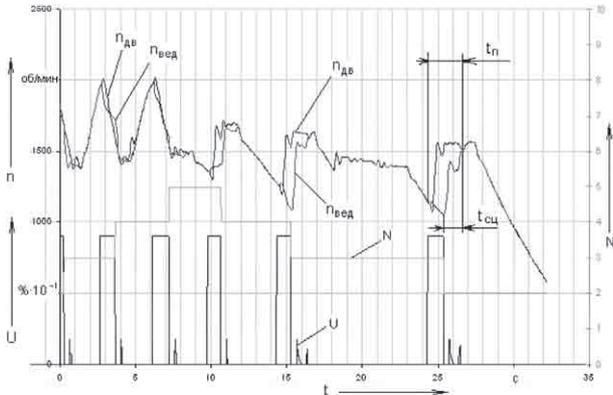


Рисунок 4 — Осциллограмма автоматического переключения в основной КП: U — управляющий сигнал ШИМ; t — время; $n_{дв}$, $n_{вед}$ — частота вращения соответственно коленвала ДВС и ведущей части сцепления; N — номер передачи в КП; $t_{п}$ — общее время переключения передач; $t_{сц}$ — время включения сцепления

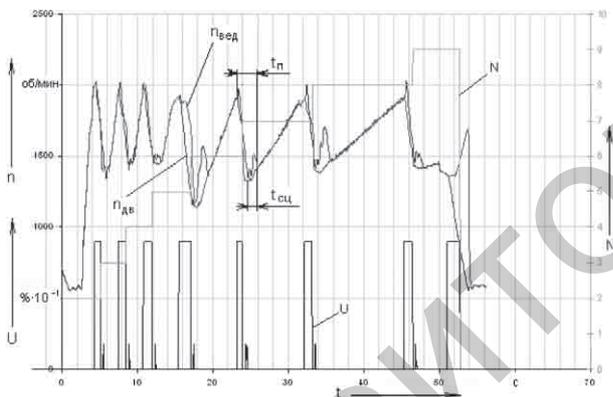


Рисунок 5 — Осциллограмма автоматического переключения со 2-й по 9-ю передачу с максимальной подачей топлива: U — управляющий сигнал ШИМ; t — время; $n_{дв}$, $n_{вед}$ — частота вращения соответственно коленвала ДВС и ведущей части сцепления; N — номер передачи в КП; $t_{п}$ — общее время переключения передач; $t_{сц}$ — время включения сцепления

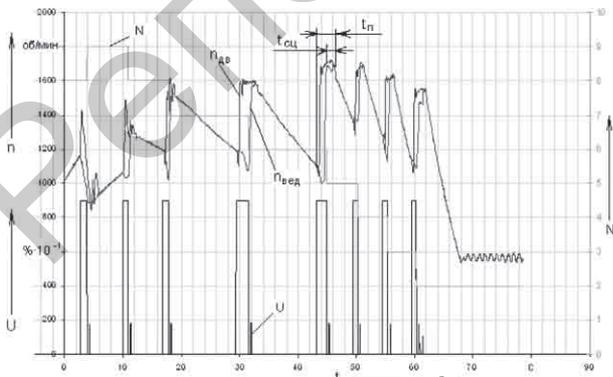


Рисунок 6 — Осциллограмма автоматического переключения с 9-й по 2-ю передачу: U — управляющий сигнал ШИМ; t — время; $n_{дв}$, $n_{вед}$ — частота вращения соответственно коленвала ДВС и ведущей части сцепления; N — номер передачи в КП; $t_{п}$ — общее время переключения передач; $t_{сц}$ — время включения сцепления

чи, в результате чего, до момента включения сцепления, коленчатый вал увеличивал частоту вращения, снижая тем самым работу трения ведомого и ведущего дисков сцепления.

Запись процесса переключения «вверх-вниз» в автоматическом режиме работы силового агрегата, в том числе и при максимальной топливоподаче представлена на рисунках 4–6.

Как и при командном управлении КП включение фрикционного сцепления в первой серии опытов происходило с использованием пропорционально-интегрального регулирования. При этом, в зависимости от направления переключения, общее время переключения передач составило 0,9...2,4 с, что в среднем на 7,7 % меньше времени командного переключения.

При практически идентичном темпе включения работа буксования сцепления в автоматическом режиме уменьшаются по сравнению с командным на 13 % и составляет, согласно результатам моделирования, 0,2 Дж/см², при незначительном увеличении максимальной мощности буксования фрикционного узла до величины 1,8 Вт/см². Меньшее значение удельной работы буксования [5, с. 21, формула 7] объясняется различными угловыми скоростями коленвала двигателя на момент начала замыкания сцепления. Уменьшение данного показателя нагруженности положительно скажется на долговечности фрикционного узла и силового агрегата в целом, так как «износ накладок сцепления линейно зависит от работы буксования сцепления» [6, с. 78].

По сравнению с ручным управлением коробкой передач, где процесс переключения занимает от 0.9 до 2.8 с [7, с. 36, 8, с. 404], командный или автоматический режим управления силовым агрегатом обеспечивает уменьшение общего времени переключения передач по алгоритму с индивидуальной синхронизацией на 0,6 ... 0,7 с, что составляет 21 ... 25 %.

Заключение. В результате проведения полунатурного эксперимента подтверждены функциональность спроектированной мехатронной системы переключения передач, а также работоспособность программно-аппаратной платформы, алгоритмов и программного обеспечения управления автоматизированным силовым агрегатом автопоезда.

Как показали исследования, автоматизация процесса переключения передач обеспечивает уменьшение общего времени переключения по сравнению с ручным управлением КП на 21...25 %, что составляет 0,6...0,7 с и положительно сказывается на тяговой динамике АТС.

Нагруженность фрикционного сцепления, оцениваемая удельной работой буксования ведомой и ведущей частей, уменьшается в автоматическом режиме управления силовым агрегатом на 13 % по сравнению с командным, что увеличивает долговечность сцепления и повышает надежность мехатронной системы.

Список литературы

1. Управление фрикционным сцеплением на основе шим-сигнала с однопараметрической обратной связью / Л.Г. Красневский [и др.] // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные приводные системы, трансмиссии и робототехнические комплексы», Могилев, 20–21 окт. 2011 г. / Белорусско-российский ун-т. — Могилев, 2011. — С. 44–47.
2. Использование стратегии DSAC при трогании автопоезда с места в автоматическом режиме работы силового агрегата / О.С. Руктешель [и др.] // Вестник ГГТУ им. Сухова. — 2014. — № 3(58). — С. 28–35.

3. Кусяк, В.А. Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов // В.А. Кусяк, О.С. Руктешель // Минск: БНТУ, 2015. — 296 с.
4. Программа проведения стендовых исследовательских испытаний системы автоматизированного переключения передач: отчет о НИР (заключ.): ГНТП «Белавтотракторостроение» задание АТ-01.10, этап 01.10.02.04.02 / Минский автом. завод; рук. А.М. Захарик. — Минск, 2003. — 12 с. — ГНТП № ГР 05808729.91-03.
5. Моделирование и анализ процесса трогания автопоезда с места / О.С. Руктешель [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 4(17). — С. 19–24.
6. Карпиевич, Ю.Д. Микропроцессорная система бортового диагностирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления / Ю.Д. Карпиевич // Вестн. БНТУ. — 2007 — № 6. — С. 76–78.
7. Коралевски, Г. Синтез законов управления и параметров гидромеханических трансмиссий колесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Г. Коралевски. — Минск, 2001. — 40 с.
8. Руктешель, О.С. Анализ и синтез систем автоматического управления переключением передач автотранспортных средств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / О.С. Руктешель. — Минск, 1987. — 504 с.

Belevich A.V., Luckiy V.I., Rukteshel O.S., Kussyak V.A.

Debugging mechatronic shifting system on the test-bench

The article presents a schematic diagram of the test complex for working out algorithms of gearshift mechatronic systems of the mechanical transmission of road train in the conditions of test bench. The description of soft-hardware platform of mechatronic system as well as the gearshift algorithms in command and automatic modes of powerunit control are given in activity. Semi-natural experiment results on research of the shifting process to an adjacent high and low gear are presented with a comparison of quality performance indicators of relevant transients.

Поступил в редакцию 15.10.2015.