

УДК 629.114–235

**В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф., Н. Н. Горбатенко, канд. техн. наук, доц.,  
С. В. Кузнецов, Е. Н. Якубов**

## **СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ**

В статье приведена информация о созданной на кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета мехатронной системе автоматического управления гидромеханической передачей гусеничной машины и о результатах проведенных стендовых испытаний. Система включает электронный блок управления и электрогидравлический исполнительный механизм включения фрикционов, содержащий пропорциональные электрогидравлические клапаны. Созданная система позволяет реализовать командный и автоматический режимы управления переключением передач. Предусмотрена возможность формирования различных принципов управления давлением в исполнительном цилиндре фрикциона. Приведены методика и режимы испытаний, полученные результаты и их анализ.

На мобильных машинах, работающих в тяжелых дорожных условиях (карьер, бездорожье, строительство дорог и т. п.), широкое применение находят гидромеханические передачи (ГМП). Они позволяют получить высокие показатели эффективности машины: повышается производительность, обеспечивается устойчивое движение, снижаются потери энергии на буксование движителей, облегчается управление машиной и др.

Эффективность и надежность процессов функционирования ГМП в значительной мере определяется совершенством ее системы управления. Система управления должна обеспечить высокие показатели переходных процессов при переключении передач, плавность хода машины, комфортные условия работы водителя. Выполнение этих требований зависит от совершенства алгоритмов управления переключением передач и блокирования гидротрансформатора. Высокую эффективность процессов управления обеспечивают адаптивные системы автоматического управления ГМП. Алгоритмы функционирования таких систем формируют сигналы управления с учетом изменяющихся внешних условий, состояния и условий работы механизмов машины, управляющих воздействий водителя. Кроме того, для достижения высоких показателей протекания процессов управле-

ния необходимо соответствующим образом организовать процессы включения фрикционов ГМП. Алгоритм управления процессом включения фрикционов должен обеспечивать выполнение ряда требований: плавное замыкание фрикционных дисков; переключение передач без разрыва потока мощности, снижение теплонпряженности фрикционных дисков путем сочетания характеристик включаемого и выключаемого фрикционов и управления подачей топлива в двигатель.

Рассмотрим последовательно возможность выполнения отмеченных требований к алгоритму управления фрикционами. До недавнего времени реализация перечисленных требований осуществлялась посредством гидравлических систем управления с механизмами плавного включения, которые регулируют давление по заданным характеристикам в исполнительных цилиндрах фрикционов. В системе управления ГМП гусеничной машины, выпускаемой на Минском тракторном заводе, используются механизмы плавного включения фрикциона (МПВФ) сливного типа. Функционирование таких механизмов осуществляется за счет ограничения расхода жидкости, поступающей в цилиндр фрикциона, путем слива части жидкости в бак при регулировании давления. Опыт эксплуатации показал, что использова-

ние МПВФ не обеспечивает требуемых характеристик регулирования давления и не позволяет получить высоких показателей качества переходного процесса в трансмиссии. Кроме того, такие механизмы усложняют организацию процесса переключения передач без разрыва потока мощности и не позволяют реализовать алгоритмы адаптивного управления.

На кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета в течение ряда лет ведутся разработки системы автоматического управления (САУ) ГМП нового поколения для гусеничной машины Минского тракторного завода. За это время разработаны динамическая и математическая модели трансмиссии гусеничной машины, проведены исследования переходных процессов в трансмиссии и определены требуемые характеристики управления фрикционами. Для реализации характеристик управления разработана принципиально новая структура системы управления. Созданы принципиальная и конструктивная схемы САУ ГМП. На математических моделях проведены

исследования процессов функционирования гидропривода САУ, определены интервалы изменения параметров ее основных элементов. Разработан и испытан макетный образец исполнительных механизмов включения фрикционов. Результатом этой работы явилась разработка конструкции опытного образца мехатронной САУ ГМП и проведение стендовых испытаний в опытно-экспериментальном цехе МТЗ.

Цели стендовых испытаний: проверить работоспособность разработанной конструкции САУ; исследовать процессы функционирования исполнительных механизмов САУ; оценить эффективность алгоритмов управления процессом включения фрикционов; определить влияние алгоритмов управления на динамические нагрузки в трансмиссии при переключении передач.

Объект испытаний представляет собой комплекс САУ, состоящий из исполнительного механизма включения фрикциона (ИМВФ) ГМП 1 и электронного блока управления (ЭБУ) 2 (рис. 1).

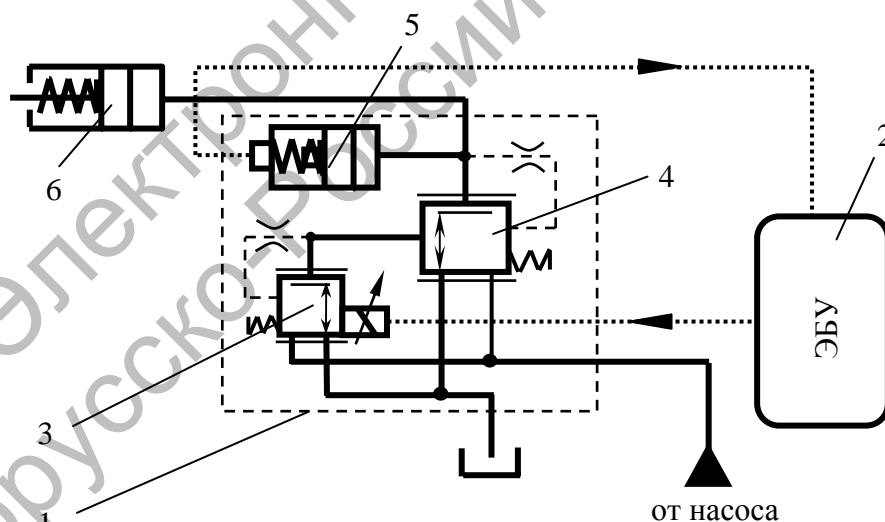


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема исполнительного механизма включения фрикциона: 1 – исполнительный механизм включения фрикционов САУ; 2 – электронный блок управления (ЭБУ); 3 – электрогидравлический пропорциональный клапан; 4 – регулятор-распределитель; 5 – реле давления; 6 – фрикцион

Конструктивно ИМВФ выполнен в виде двухкаскадного дроссельного гидрораспределителя с механизмом обнаружения заполнения фрикциона (МОЗФ). Ос-

новым элементом двухкаскадного гидрораспределителя является электрогидравлический пропорциональный клапан (ЭГПК) 3. Он образует первый каскад

гидравлического механизма и состоит из пропорционального магнита и распределителя с обратной связью по давлению. Основная функция ЭГПК – создание гидравлического сигнала, необходимого для управления дроссельным гидрораспределителем второго каскада. Управление ЭГПК осуществляется посредством ЭБУ.

На электромагнит пропорционального клапана ЭБУ подает широтно-импульсный электрический сигнал, а выходной сигнал ЭГПК представляет собой давление рабочей жидкости. Усилие электромагнита, с одной стороны, пропорционально току в его обмотке, а с другой, – давлению рабочей жидкости. Это позволяет сравнительно просто формировать необходимые характеристики нарастания давления в цилиндре фрикциона. Дроссельный гидрораспределитель второго каскада – это регулятор-распределитель 4, обеспечивающий усиление управляющего сигнала от пропорционального клапана и регулирование давления потока жидкости, поступающей в цилиндр фрикциона 6. МОЗФ представляет собой обычное реле давления (РД) 5. Его функция заключается в определении момента окончания процесса заполнения цилиндра фрикциона. РД установлено параллельно потоку жидкости, поступающей в цилиндр фрикциона 6, и настроено на определенный уровень давления. При превышении заданного уровня давления РД формирует электрический сигнал для ЭБУ и в цилиндре фрикциона начинается фаза регулирования давления. Помимо этого электрические сигналы РД используются в алгоритмах диагностирования САУ и защиты для исключения аварийных режимов в работе ГМП при возникновении нештатных ситуаций.

Количество ИМВФ, входящих в состав САУ ГМП, определяется числом передач. Гидромеханическая передача гусеничной машины имеет одну фрикционную муфту и три фрикционных тормоза, следовательно, ее САУ оснащена четырьмя механизмами ИМВФ. Управление механизмами включения осуществляется от

одного центрального блока управления.

Электронный блок управления – многофункциональное устройство, главным элементом которого является центральный процессорный модуль. Он содержит сегменты памяти постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) для хранения программы блока управления и оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), а также настроенную память для задания параметров алгоритма управления. Сбор информации о текущих значениях параметров, характеризующих процессы функционирования механизмов и систем машины, производится через аналоговые, дискретные и счетные входы.

В блоке ПЗУ хранится информация об алгоритмах автоматизированного управления переключением передач и управления фрикционами ГМП. Запись программы алгоритмов в ПЗУ производится с компьютера через CAN-интерфейс посредством CAN-USB-конвертера. Корректировка параметров алгоритма управления также выполняется с компьютера через CAN-интерфейс.

Предусмотрено два режима управления ГМП: режим полностью автоматического управления и режим автоматизированного командного управления. Командный режим отличается от автоматического тем, что выбор номера передачи производится водителем, в то время как формирование сигналов на блокирование гидротрансформатора и управление давлением в цилиндрах фрикционов осуществляется автоматически.

Разработанная САУ позволяет реализовать различные алгоритмы формирования характеристик регулирования давления в гидравлическом цилиндре фрикциона. Испытаниям подвергались алгоритмы, реализующие принцип разомкнутого управления (программная система) и принцип управления по отклонению (принцип обратной связи) [1].

На рис. 2 представлены диаграммы изменения во времени характеристик пе-

реходного процесса при переключении с низшей передачи на высшую, поясняю-

щие основы работы алгоритма управления фрикционами ГМП.

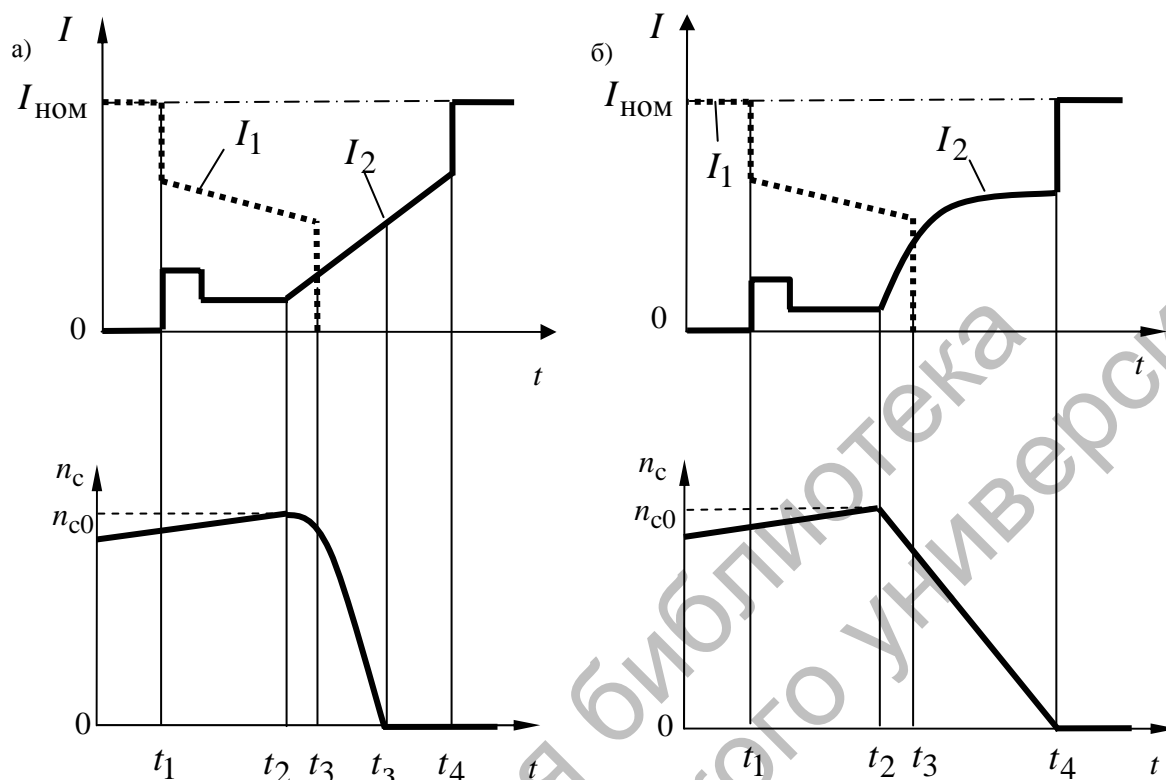


Рис. 2. Диаграммы изменения во времени основных параметров переходного процесса при переключении с низшей передачи на высшую; а – диаграмма с принципом разомкнутого управления (программный способ); б – диаграмма с принципом управления по отклонению (принцип обратной связи);  $I_1$ ,  $I_2$  – характеристики изменения тока в обмотках ЭГПК выключаемого и включаемого фрикционов соответственно;  $n_c$  – характеристика изменения относительной скорости скольжения дисков фрикциона;  $t$  – время

Процессы, показанные на рис. 2, а и б, включают три фазы работы: фазу заполнения (интервал времени  $t_1$ - $t_2$ ), в течение которой гидроцилиндр включаемого фрикциона заполняется рабочей жидкостью; фазу перекрытия (интервал времени  $t_2$ - $t_3$ ), в течение которой вращающий момент двигателя передается на выходной вал коробки передач одновременно через выключаемый и включаемый фрикционы; фазу регулирования давления в цилиндре включаемого фрикциона (интервал времени  $t_3$ - $t_4$ ). Фазы заполнения и перекрытия для двух принципов управления имеют одинаковый характер протекания, а фаза регулирования давления имеет отличия. При программном управлении ток в обмотке ЭГПК, а следовательно, и давле-

ние в цилиндре включаемого фрикциона, нарастает линейно в зависимости от времени. Подобную характеристику нарастания давления реализует механизм плавного включения сливного типа, установленный в штатной СУ. Такой принцип регулирования давления отличается простотой реализации, но не позволяет контролировать время буксования фрикциона. При управлении фрикционом по принципу обратной связи (см. рис. 2, б) на интервале времени  $t_3$ - $t_4$  давление в его цилиндре формируется по отклонению относительной скорости скольжения дисков  $n_c$ . ЭБУ отслеживает частоты вращения турбинного колеса гидротрансформатора и выходного вала ГМП и регулирует давление в цилиндре

так, чтобы относительная скорость скольжения дисков  $n_c$  снижалась до нуля по линейному закону.

Испытания созданной САУ проводились на специальном стендовом оборудовании. Общий вид стенда показан на рис. 3, а его структурная схема – на рис. 4.

Стенд выполнен по прямой схеме нагружения и включает в себя: гидромеханическую передачу гусеничной машины, две электрические балансирующие машины мощностью 364 кВт каждая, индукторные тормозные динамометры с максимальным тормозным моментом 9 кН·м. Управление балансирующими машинами реостатное, что позволяет реализовывать частоты вращения от 0 до 4000 об/мин. Индукторные тормозные динамометры предназначены для задания необходимого нагрузочного режима. Для контроля скоростного, нагрузочного и температурного режимов работы САУ ГМП оснащена датчиками давления, частоты вращения, момента и температуры.

Управление работой моторно-динамического стенда осуществляется дистанционной системой из пультной кабины. Организация процессов включения фрикционов происходит под контролем электронного блока управления. ЭБУ обеспечивает сбор информации с датчиков стенда о текущих значениях параметров, характеризующих процессы функционирования его механизмов и систем, обрабатывает полу-

ченную информацию и формирует характеристики сигнала управления.

Переключение передач производится компьютерной программой с ноутбука, в которой имитирована консоль управления машины и информационное табло. В программе предусмотрены переключения передач в автоматическом и командном режимах. Информационное табло отображает номер передачи при переключениях, изменение давления в главной магистрали системы управления, напряжение питания в бортовой сети, частоты вращения валов ГМП и температуру масла.

Запись процессов функционирования исполнительных механизмов САУ ГМП осуществляется с помощью информационно-измерительной системы: платы сбора данных NI-6221M, BNC-конектора и персонального компьютера. Плата сбора данных обеспечивает сбор информации со всех датчиков стенда. Обработка полученной информации осуществляется посредством специализированного программного обеспечения Labview. Программа обработки данных в Labview представляет собой модель в виде блок-диаграмм, позволяющую считывать данные с датчиков, подключенных к плате NI-6221M, и транслировать их на монитор персонального компьютера для визуализации и анализа процессов, происходящих в ГМП.

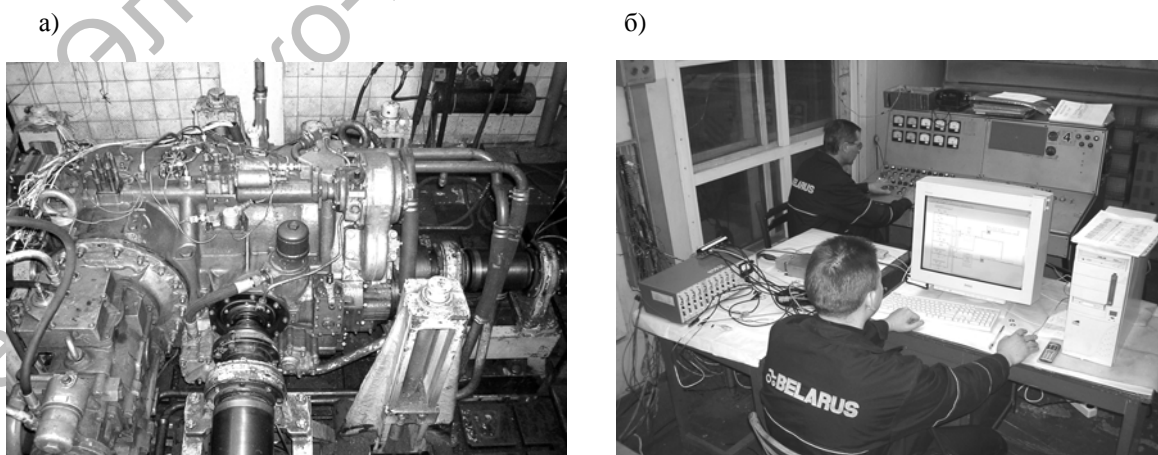


Рис. 3. Общий вид стенда для испытания САУ ГМП: а – гидромеханическая передача гусеничной машины; б – пультная кабина с дистанционной системой управления и системой сбора данных

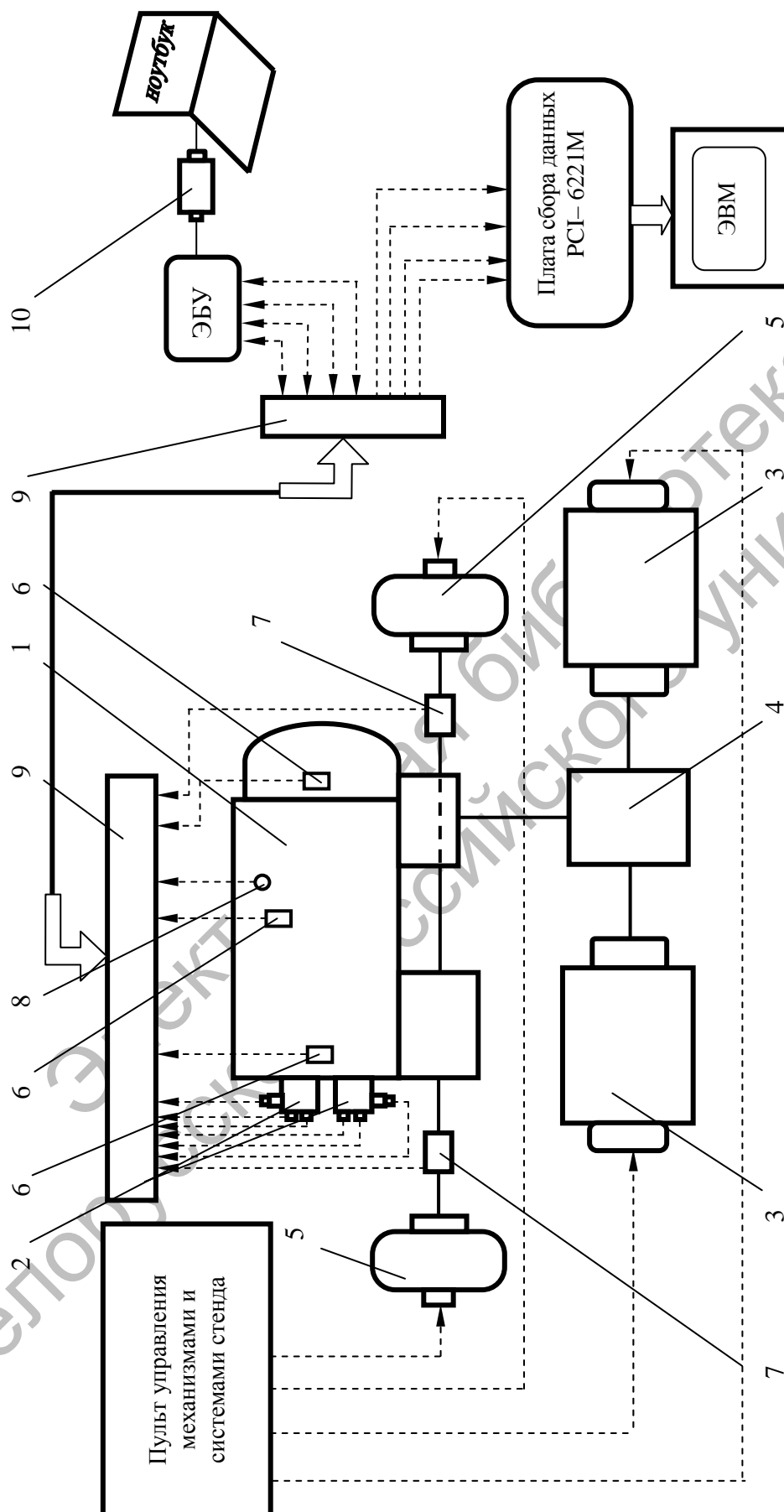


Рис. 4. Структурная схема стенда для исследования работы алгоритма управления фрикционными ГМП: 1 – гидромеханическая передача гусеничной машины; 2 – исполнительные механизмы САУ; 3 – электрические балансирующие машины; 4 – согласующий редуктор; 5 – индукционный редуктор; 6 – датчики частот вращения; 7 – датчик температуры; 8 – шины соединений; 9 – CAN-конвертор; 10 – датчики моментов

Методикой проведения стендовых испытаний предусматривалось создание различных скоростных и нагрузочных режимов ГМП. Частота вращения двигателя при трогании с нейтрали варьировалась в диапазоне от 600 до 900 об/мин, переключения передач производились при 1200...1600 об/мин, суммарный тормозной момент на двух индукторных тормозах – в диапазоне 1600...3200 Н·м. Запись процессов осуществлялась при температуре масла 90 °С.

При проведении стендовых испытаний регистрировались следующие процессы:  $p_{гл}$  – давление в главной магистрали системы управления ГМП, МПа;  $p_i$  – давления в магистралях подвода жидкости к цилиндру фрикциона,  $i = 1...4$ , МПа;  $S_i$  – сигналы реле давления,  $i = 1...4$ ;  $n_{в.в}$  – частота вращения выходного вала ГМП, об/мин;  $n_t$  – частота вращения турбинного вала ГМП, об/мин;  $M_{в.в}$  – момент на выходном валу ГМП, Н·м.

На рис. 5 представлены осциллограммы протекания переходных процессов в гидроприводе опытной системы управления, разработанной авторами. На рис. 5, а, б показаны осциллограммы при разомкнутом принципе управления давлением во фрикционе, а на рис. 5, в, г – при использовании принципа управления по отклонению. В двух случаях процессы записывались в момент переключения передач  $1 \rightarrow 2$ , при частоте вращения двигателя 1200 об/мин и суммарном тормозном моменте 3200 Н·м (на рис. 5 отображен штриховой линией).

Проанализируем полученные результаты с разомкнутым управлением. Для этого рассмотрим графики, приведенные на рис. 5, а и б. На рис. 5, а показаны графики процессов изменения следующих параметров: главного давления  $p_{гл}$ , давлений во включаемом  $p_{ф2}$  и выключаемом  $p_{ф1}$  фрикционах, момента  $M_{в.в}$  на выходном валу коробки передач, электрических сигналов реле давлений выключаемой  $S_1$  и включаемой  $S_2$  передач. Рис. 5, б иллюстрирует процессы изменения частот вращения турбинного колеса гидротрансформатора (ГДТ)  $n_t$  и выходного вала коробки передач (КП)  $n_{в.в}$ .

Как видно из рис. 5, а, в момент времени  $t_0$  начинается процесс заполнения фрикциона. Давление  $p_{ф2}$  возрастает до уровня давления возвратных пружин поршня фрикциона и удерживается на протяжении всего этапа заполнения его цилиндра, а давление в выключаемом фрикционе  $p_{ф1}$  снижается. При этом фрикцион выключаемой передачи на этапе заполнения несет основную нагрузку, обеспечивая безразрывность переключения передач. В момент времени  $t_{зап}$  завершается фаза заполнения цилиндра фрикциона и поршень останавливается. При остановке поршня в цилиндре фрикциона возникает всплеск давления. По всплеску реле давления включаемой передачи формирует единичный сигнал  $S_2$  для ЭБУ. По сигналу  $S_2$  ЭБУ обесточивает пропорциональный электромагнит выключаемого фрикциона, и давление  $p_{ф1}$  в его цилиндре снижается до нуля, а в цилиндре включаемого фрикциона начинается фаза регулирования давления. Процесс регулирования давления  $p_{ф2}$  осуществляется по линейному закону во времени. При регулировании давления  $p_{ф2}$  на характеристике момента  $M_{в.в}$  четко прослеживается этап буксования фрикциона. Из-за высокого темпа нарастания давления замыкание дисков фрикциона происходит при уровне давления 0,6 МПа. При этом характеристика изменения момента на выходном валу  $M_{в.в}$  имеет значительную амплитуду колебаний. Снизить максимальную амплитуду момента и уменьшить его последующие колебания можно за счет подбора рациональных параметров характеристики программного управления включаемого фрикциона. Однако подобрать подходящие параметры можно только для конкретных условий движения. При изменении сопротивлений движению они будут уже не оптимальны. Подобные характеристики регулирования давления имеет и штатная система управления, оснащенная механизмами плавного включения сливного типа. Качество протекания переходных процессов в штатной системе из-за разрыва потока мощности и неудовлетворительной работы клапана плавного включения фрикциона значительно хуже.

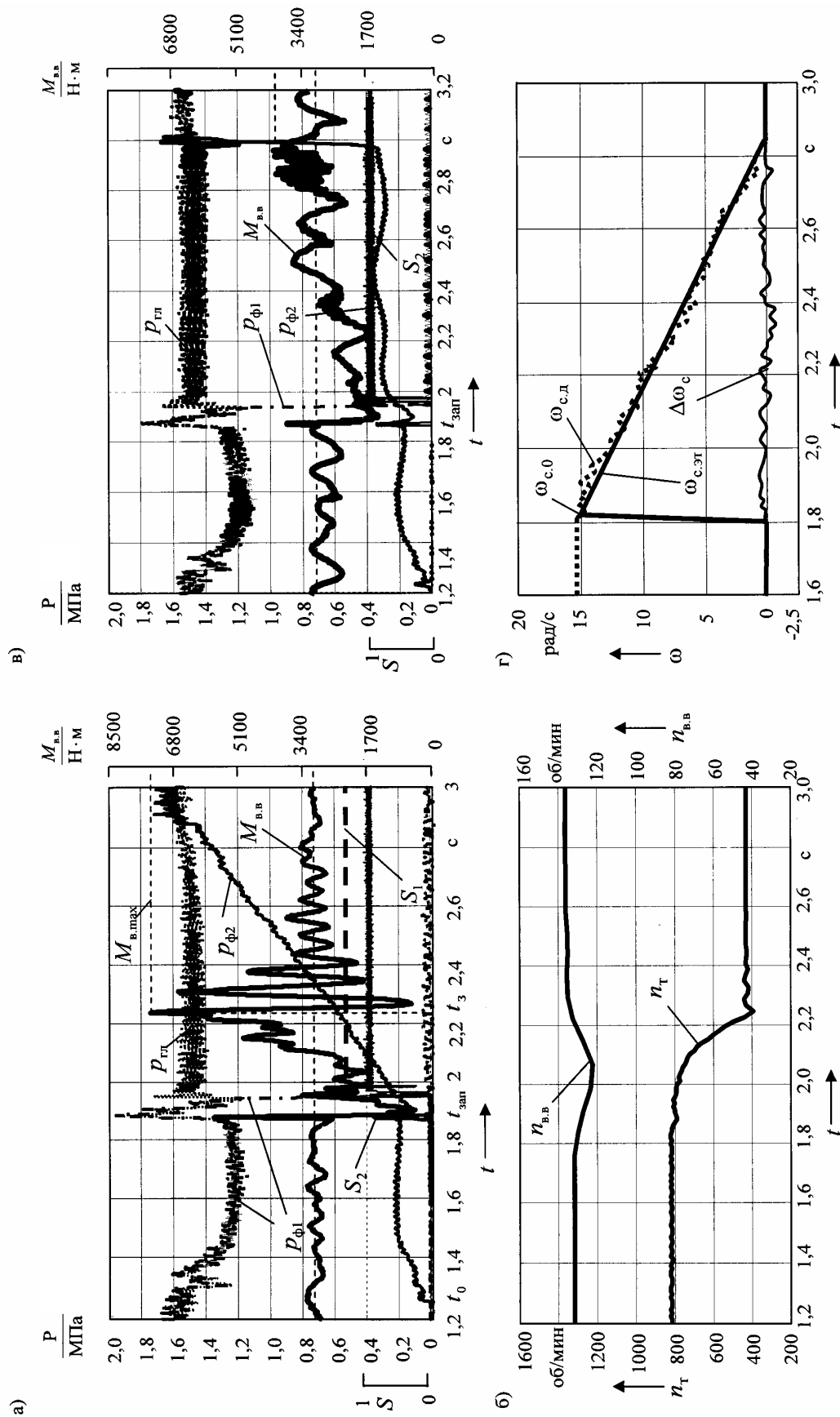


Рис. 5. Осциллограммы результатов испытаний САУ ГМП многодисковой гусеничной машины: а, б – управление давлением в цилиндре фрикциона на основе разомкнутого принципа управления; в, г – управление давлением в цилиндре фрикциона по отклонению скорости скольжения дисков



Рассмотрим переходные процессы в ГМП при использовании управления давлением в цилиндре фрикциона по отклонению управляемой величины. Графики переходных процессов для этого способа регулирования представлены на рис. 5 в, г. Этап заполнения цилиндра фрикциона имеет такой же характер, как и при программном управлении, а вот процесс регулирования давления в цилиндре фрикциона происходит иначе. Характеристика регулирования давления в цилиндре фрикциона формируется по отклонению управляемой величины – относительной скорости скольжения дисков  $\omega_{c,0}$ . В момент обнаружения окончания заполнения цилиндра по сигналам датчиков частот вращения турбинного колеса ГДТ и выходного вала КП ЭБУ определяется значение скорости скольжения дисков  $\omega_{c,0}$  (см. рис. 5, г). По значению этой скорости и заданному времени регулирования в соответствии с алгоритмом управления формируется характеристика эталонной скорости скольжения дисков  $\omega_{c,эт}$ , изменяющаяся по линейному закону от  $\omega_{c,0}$  до нуля.

После обнаружения окончания заполнения, считывая данные с датчиков скорости, ЭБУ непрерывно определяет действительную скорость скольжения дисков и вычисляет рассогласование  $\Delta\omega_c$  между действительной и эталонной скоростью. По величине рассогласования  $\Delta\omega_c$  осуществляется корректировка значения давлений так, чтобы действительная скорость скольжения дисков приближалась к эталонной. Процесс буксования фрикциона при этом контролируется в течение все-

го времени регулирования давления, а вращающий момент на выходном валу  $M_{в.в}$  в процессе буксования изменяется плавно.

Эффективность САУ выполняется по показателям качества: максимальному моменту на выходном валу ГМП  $M_{в.мах}$  и коэффициенту динамичности  $k_d$ .

Показатель  $M_{в.мах}$  определяет уровень максимальных нагрузок в ГМП на выходном валу. Численные значения  $M_{в.мах}$  определяются по осциллограммам на рис. 5. Коэффициент динамичности как относительная величина удобен для выполнения сравнительного анализа нагруженности трансмиссий. Его значение определялось как отношение максимального момента на выходном валу  $M_{в.мах}$  к номинальному моменту нагрузки тормоза  $M_{в.н}$ :

$$k_d = \frac{M_{в.мах}}{M_{в.н}}.$$

Значение коэффициента динамичности должно быть как можно меньшим. Для большинства реальных конструкций значение  $k_d$  составляет 1,3...1,5 [1].

В табл. 1 представлены результаты оценки эффективности САУ с различными принципами управления фрикционами. Оценка эффективности производилась при переключении передач 1 → 2. Программой проведения испытаний было предусмотрено создание одинаковых условий для сравниваемых принципов управления. Определение показателей выполнялось по результатам записи 10 осциллограмм.

Табл. 1. Показатели качества переходного процесса в ГМП

Наименование показателей качества переходного процесса	Значение показателя		Значение коэффициента улучшения показателей $k_y$
	Принцип разомкнутого управления давлением	Принцип управления по отклонению	
Максимальный момент на выходном валу ГМП $M_{в.мах}$ , Н·м	7150...8080	4230...4390	1,69...1,84
Коэффициент динамичности $k_d$	2,17...2,55	1,29...1,38	1,68...1,85

Момент нагрузки тормоза  $M_{в.н}$  при переключении передач составлял  $(3200 \pm 10)$  Н·м, а частота вращения вала двигателя –  $(1200 \pm 50)$  об/мин. В табл. 1 приведены значения коэффициента  $k_y$ , характеризующего улучшение показателей качества переходных процессов, обеспечиваемых при использовании принципа управления по отклонению. Коэффициент  $k_y$  представляет собой отношение показателей сравниваемых показателей качества переходных процессов.

На основе полученных результатов испытаний опытной САУ ГМП сделаны следующие выводы.

1. Разработанная на кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета САУ позволяет обеспечить высокое качество процессов переключения передач. Исполнительные механизмы включения фрикционов позволяют реализовать характеристики изменения давления в цилиндрах фрикционов по заданным алгоритмам и могут обеспечить разомкнутый принцип управления или принцип управления по отклонению.

2. Опытная САУ осуществляет переключение передач без разрыва потока

мощности. Это позволяет непрерывно подводить мощность к ведущим колесам, снизить уровень динамических нагрузок на валах трансмиссии, улучшить динамику разгона машины и плавность переключения передач.

3. Применение обратной связи по относительной скорости скольжения дисков фрикциона в системе с замкнутым контуром управления гарантирует завершение буксования фрикциона в заданное время. Такой способ управления обеспечивает автоматическую коррекцию характеристики регулирования давления с учетом изменения внешних условий и внутренних параметров САУ (коэффициент трения дисков, сопротивления гидравлических магистралей гидропривода). При этом достигается снижение динамических нагрузок в трансмиссии при переключении передач в 1,68...1,84 раза по сравнению с разомкнутым управлением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ксенович, И. П. Теория и проектирование автоматических систем : учебник / И. П. Ксенович, В. П. Тарасик. – М. : Машиностроение, 1996. – 480 с. : ил.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 15.01.2007

V. P. Tarasik, N. N. Gorbatenko,  
S. V. Kusnetsov, E. N. Jakubov  
**Development testing of automatic  
control system of hydromechanical  
transmission for track-type vehicle**  
Belarusian-Russian University

In article the information about created on the chair «Avtomobili» of the Belarussian-Russian university mechanotronic system of automatic control of hydromechanical transmission of the track-type vehicle and about results of the carried bench checkout. The system includes the electronic control block and the electrohydraulic actuator of engaging clutches, containing proportional electrohydraulic valves. The created system allows to realize command and automatic control modes by switching of gear. The opportunity of formation of various principles of control pressure in the executive cylinder of a clutch is stipulated. The technique and modes of the tests, the received results and their analysis are given.