

УДК 629.3

**В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф., Н. Н. Горбатенко, канд. техн. наук, доц.,
Р. В. Плякин, А. Н. Егоров**

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФРИКЦИОНАМИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

В статье рассмотрены принципы работы мехатронной системы пропорционального управления фрикционами гидромеханической передачи. Приведена конструкция технического решения исполнительного механизма управления фрикционами гидромеханической передачи, разработанная для карьерных самосвалов БелАЗ. Описаны способы управления давлением в гидроцилиндре фрикциона. Представлены результаты стендовых испытаний опытного образца разработанной мехатронной системы управления фрикционами гидромеханической передачи.

Гидромеханические передачи (ГМП) получили широкое применение в мировой практике автотракторостроения. Применяются они также и на автомобилях отечественного производства (БелАЗ, МАЗ, МЗКТ). По сравнению с наиболее распространенными механическими передачами ГМП позволяют существенно улучшить показатели эффективности автомобиля. Но для этого ГМП должна быть снабжена системой автоматического управления (САУ).

Основная задача САУ заключается в оптимальном согласовании режимов работы двигателя и трансмиссии автомобиля. Кроме того, САУ должна обеспечивать высокие показатели качества процессов функционирования механизмов ГМП, особенно в переходных режимах, обусловленных переключением передач. Важным требованием к управлению ГМП является обеспечение непрерывного подвода энергии к ведущим колесам автомобиля в любых условиях движения. Для этого переключение передач должно осуществляться без разрыва потока мощности. САУ также должна защищать двигатель и трансмиссию от перегрузок, снижая до возможного минимума динамические нагрузки при переключении передач, и исключать нештатные режимы функционирования двигателя и механизмов трансмиссии.

На современном этапе развития автомобилестроения наиболее перспектив-

ным направлением автоматизации управления фрикционами ГМП является применение электронных систем. Электронный блок управления ГМП осуществляет формирование сигналов управления на переключение передач, блокирование гидротрансформатора, управление режимами работы двигателя при переключении передач. Кроме того, он управляет процессом включения и выключения фрикционов, обеспечивая выполнение отмеченных выше требований. Поскольку управление фрикционами ГМП осуществляется посредством гидропривода, то носителем конечного сигнала системы управления является рабочая жидкость. Следовательно, управляющие сигналы, формируемые электронным блоком, нуждаются в усилении и смене физической природы. Решение этой задачи обеспечивается применением электрогидравлических исполнительных механизмов управления фрикционами.

Для управления фрикционами ГМП карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 45...60 т на кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета совместно с КБ ГМП Белорусского автомобильного завода была разработана мехатронная система пропорционального управления фрикционами ГМП (рис. 1). Она включает в себя источник подачи рабочей жидкости под давлением 1 (гидронасос с переливным

клапаном), исполнительный гидроцилиндр фрикциона 2, осуществляющий сжатие пакета фрикционных дисков при его включении, исполнительный меха-

низм управления фрикционом 3, комплект датчиков 4 и электронный блок управления 5 (ЭБУ).

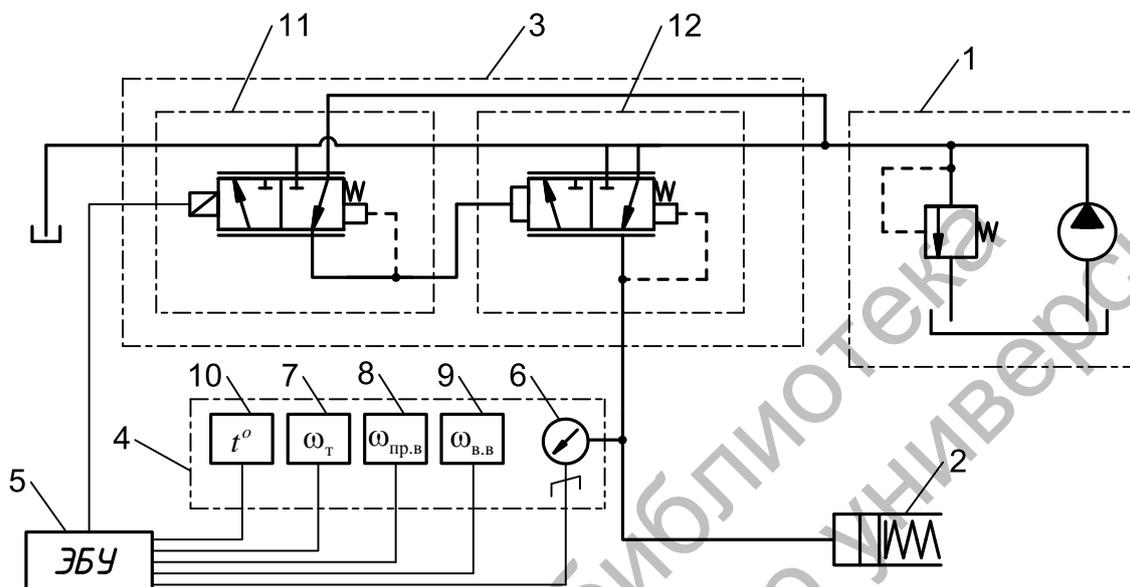


Рис. 1. Принципиальная схема мехатронной системы пропорционального управления фрикционами ГМП

Исполнительный механизм управления фрикционом представляет собой двухкаскадный гидрораспределитель с пропорциональным управлением. Первый каскад 11 распределителя составляет пилотную ступень управления давлением, а второй каскад 12 обеспечивает усиление сигнала управления, формируемого пилотной ступенью. Пилотная ступень 11 регулятора давления 3 представляет собой пропорциональный электромагнитный редуцирующий клапан фирмы «Рексрот». Второй каскад 12 распределителя представляет собой многопозиционный гидроаппарат золотникового типа, обрабатывающий управляющие сигналы пилотной ступени 11.

Комплект датчиков 4 включает в себя датчик давления рабочей жидкости 6 *Suco* 0605-51104-0-003 (диапазон измерения 0...3 МПа), установленный в выходной гидролинии исполнительного механизма управления фрикционом, датчики

угловой скорости DSM фирмы «Рексрот», установленные на входном 7, промежуточном 8 и выходном 9 валах коробки передач, и датчик температуры рабочей жидкости 10.

В качестве ЭБУ использован 16-битный микроконтроллер фирмы «Рексрот». Он обрабатывает сигналы с датчиков 6...10 и на основе заданного алгоритма управления формирует сигнал управления на электромагнитный клапан 11 в режиме широтно-импульсной модуляции. Управление током в обмотке электромагнита клапана микроконтроллер осуществляет с помощью ПИД-регулятора. В качестве сигнала обратной связи используется сила тока на обмотке электромагнита клапана. Это позволяет исключить влияние внешних факторов на характеристику работы электромагнитного клапана.

Исполнительный механизм управления фрикционом ГМП (рис. 2) состо-

ит из пилотного клапана 1 и регулятора-распределителя 2. Пилотный клапан 1 выполнен в виде электрогидравлического пропорционального редуцирующего клапана 3 фирмы «Рексрот», который состоит из пропорционального электромагнита и трехлинейного многопозиционного гидрораспределителя. Регулятор-распределитель 2 представляет собой четырехлинейный многопозиционный гидроаппарат золотникового типа. Вход механизма

управления фрикционом 4 соединен гидролинией с источником подачи рабочей жидкости под давлением (гидронасосом с переливным клапаном), а выходы 5 и 6 соединены гидролиниями с гидроцилиндром фрикциона и с гидробаком соответственно. Принцип работы описанного исполнительного механизма опубликован в [1], а на его конструкцию получен патент на изобретение [2].

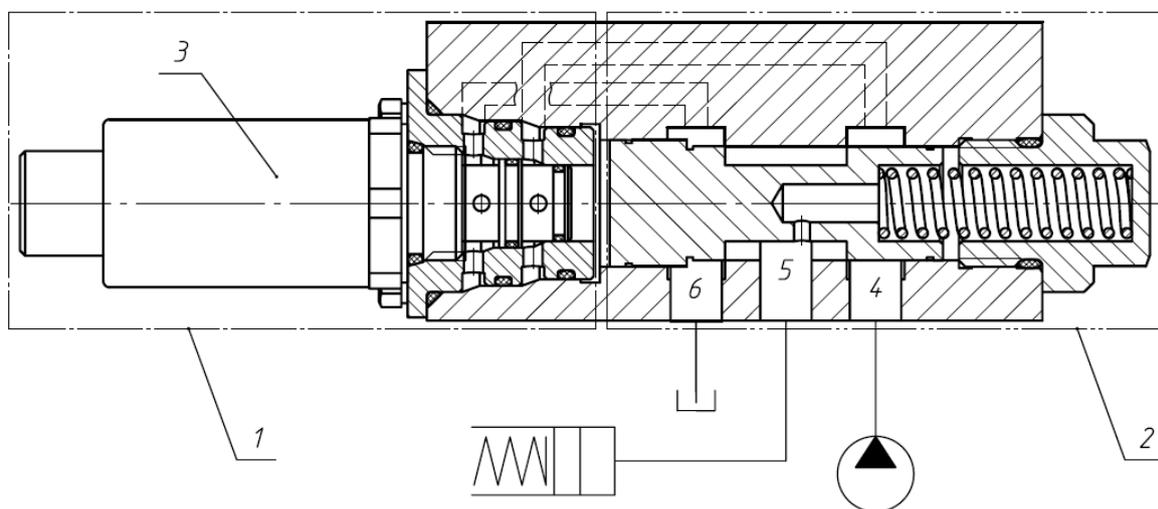


Рис. 2. Конструктивная схема исполнительного механизма управления фрикционом ГМП

Качество переходных процессов в процессе переключения передач ГМП в большой степени определяется способом управления фрикционами. Разработанная мехатронная система автоматического управления позволяет реализовать два режима управления давлением в гидроцилиндре фрикциона ГМП: режим программного управления и режим управления по обратной связи. При программном управлении сигнал управления электромагнитом клапана на этапе регулирования давления имеет заранее заданную форму. Сигнал управления представлен на рис. 3.

В момент времени t_0 ЭБУ формирует команду на начало процесса включения фрикциона. В течение интервала времени $t_{зап}$ происходит заполнение по-

лости гидроцилиндра фрикциона, а затем в течение времени $t_{рег}$ осуществляется этап регулирования давления в гидроцилиндре, обеспечивающий заданную характеристику синхронизации ведущей и ведомой частей включаемого фрикциона, при которой достигается плавное переключение передач.

На обмотку электромагнита пропорционального клапана 3 в момент времени t_0 подается сигнал максимальной скважности, формируемый ЭБУ, и возникающая в обмотке сила тока максимальной величины $I_{эм.мах}$ выдерживается в течение интервала времени $t_{быстр}$. Это обеспечивает поддержание высокого уровня давления рабочей жид-

кости, устанавливаемого исполнительным механизмом в выходной гидрелинии, что способствует быстрому заполнению гидроцилиндра на начальном этапе. Окончательный этап заполнения, так называемый этап медленного заполнения, в течение интервала времени $t_{\text{медл}}$ происходит при меньшем давлении, что способствует снижению величины всплеска давления, возникающего в гидроцилindre фрикциона в момент его полного заполнения. При этом в обмотке электромагнита клапана формируется сила тока $I_{\text{эм.медл}}$. На этапе регулирования давления $t_{\text{рег}}$ управление током в обмотке

электромагнита осуществляется в два этапа. На первом этапе $t_{\text{рег.1}}$ осуществляется плавное нарастание силы тока до величины $I_{\text{эм.рег.1}}$, что обеспечивает медленное нарастание давления в гидроцилindre фрикциона и плавное снижение относительной скорости пакета фрикционных дисков до их полного замыкания. На втором этапе регулирования $t_{\text{рег.2}}$ ЭБУ резко увеличивает силу тока в обмотке электромагнита до максимально возможного значения $I_{\text{эм.мах}}$ для гарантированного замыкания дисков и удержания фрикциона во включенном состоянии.

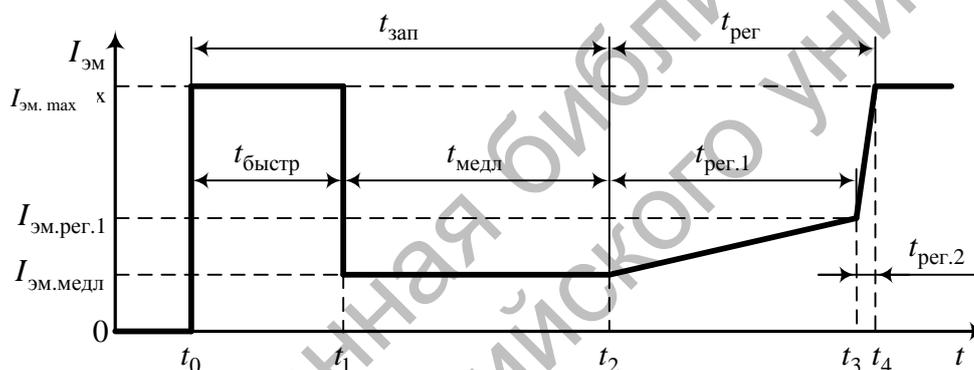


Рис. 3. Сигнал управления пилотным электромагнитным клапаном при программном режиме управления

При режиме управления фрикционом по обратной связи сигнал на электромагнит клапана на этапе регулирования давления формируется в зависимости от относительной скорости скольжения фрикционных дисков. При этом этап заполнения гидроцилиндра протекает аналогично программному режиму управления.

Для формирования сигнала управления электромагнитным клапаном в ЭБУ используется алгоритм ПИД-регулирования. В качестве сигнала обратной связи служат сигналы датчиков частоты вращения входного, промежуточного и выходного валов. В процессе замыкания пакета фрикционных дисков ПИД-регулятор ЭБУ управляет током на электро-

магните клапана таким образом, чтобы изменение относительной скорости скольжения дисков как можно точнее повторяло заданную эталонную характеристику.

Для обнаружения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона в разработанной мехатронной системе пропорционального управления фрикционом ГМП использованы несколько методов, основанных на обработке сигналов с датчика давления в выходной магистрали исполнительного механизма и датчиков частоты вращения входного, выходного и промежуточного валов коробки передач. В данной системе реализованы следующие

методы обнаружения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона:

– обнаружение «по давлению» – фиксируется момент времени, в который давление на этапе медленного заполнения превышает средний уровень давления на этом этапе на заданную величину. В момент перехода процесса заполнения с этапа быстрого заполнения на этап медленного заполнения в выходной гидромагистрали исполнительного механизма наблюдается колебание давления вследствие снижения силы тока на обмотке электромагнита. Для исключения возможности преждевременного начала этапа регулирования давления во время этих колебаний обнаружение момента окончания заполнения начинается с некоторой задержкой после этапа быстрого заполнения. В разработанной системе эта задержка составляет 0,15...0,2 с;

– обнаружение «по производной» – на этапе медленного заполнения вычисляется производная давления в выходной гидромагистрали исполнительного механизма по времени. В момент окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона фиксируется резкое увеличение производной вследствие всплеска давления;

– обнаружение «по относительной скорости скольжения дисков» – этап регулирования давления начинается при уменьшении относительной скорости

скольжения дисков фрикциона на заданную величину. В данной системе фиксируется уменьшение относительной скорости скольжения на 10...20 %;

– обнаружение «по времени» – этап регулирования давления начинается по истечении заданного времени с момента начала этапа медленного заполнения. Предположительная продолжительность этапа медленного заполнения определяется по результатам экспериментов.

Описанные выше методы определения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона дублируют друг друга, что позволяет исключить возможность преждевременного или позднего начала этапа регулирования давления. Последний метод обнаружения является резервным и позволяет сохранить работоспособность системы даже при выходе из строя датчиков давления и угловой скорости.

С целью проверки работоспособности разработанной мехатронной системы пропорционального управления фрикционами ГМП и определения основных параметров управления опытный образец системы был испытан в испытательной лаборатории РУПП БелАЗ на стенде, имитирующем работу фрикционной муфты в коробке передач (рис. 4).

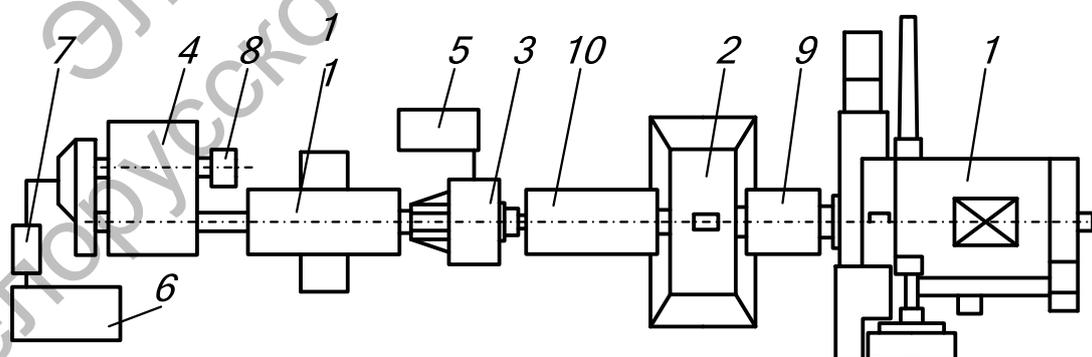


Рис. 4. Принципиальная схема стенда испытаний фрикциона ГМП

Стенд включает в себя балансирующую машину постоянного тока 1, инерционную массу 2, гидротрансформатор 3, двухвальный редуктор с испытываемым фрикционом 4, насосную станцию для подачи рабочей жидкости в круг циркуляции гидротрансформатора 5, насосную станцию гидропривода включения фрикциона 6, исполнительный механизм управления фрикционом 7, датчик силы 8 и карданные валы 9, 10 и 11. Стенд позволяет исследовать различные режимы включения испытываемого фрикциона под нагрузкой.

Испытания мехатронной системы пропорционального управления фрикционами ГМП проводились для двух режимов управления фрикционом: режима программного управления и режима управления по обратной связи. На рис. 5 приведена осциллограмма переходных процессов в гидроприводе мехатронной системы пропорционального управления фрикционами ГМП при включении фрикционной муфты при частоте вращения входного вала стенда 1000 об/мин.

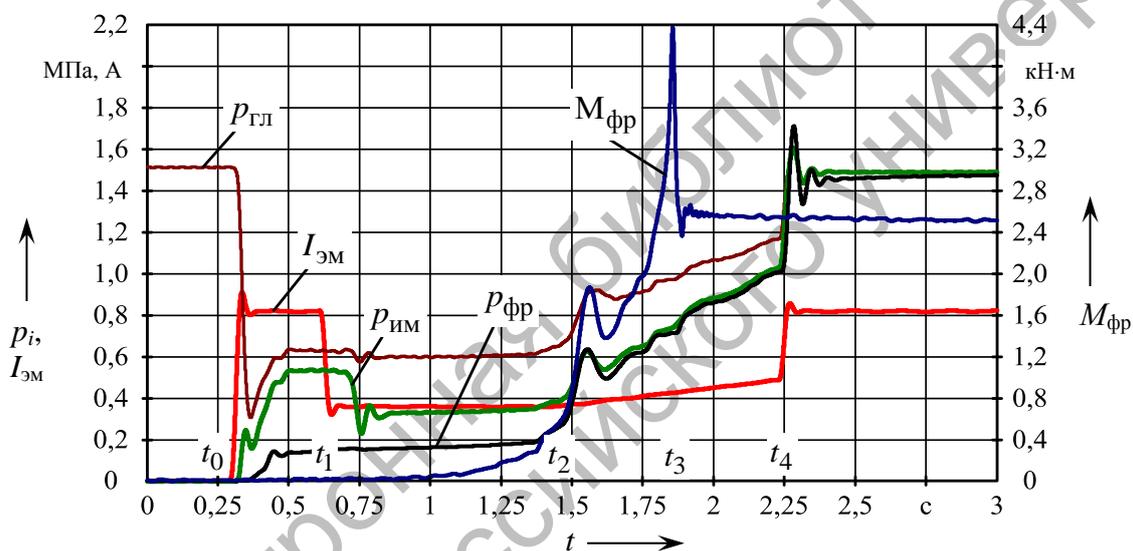


Рис. 5. Осциллограмма переходных процессов в гидроприводе мехатронной системы пропорционального управления фрикционами ГМП при включении фрикционной муфты в режиме программного управления

В момент времени t_0 ЭБУ подает на обмотку электромагнита сигнал максимальной скважности, что соответствует максимальной силе тока $I_{ЭМ.мах}$. При этом давление на выходе исполнительного механизма $p_{ИМ}$ возрастает до своего максимального значения, ограниченного давлением в главной магистрали $p_{ГЛ}$ с учетом потерь давления в гидравлических сопротивлениях. В используемом стенде установлен гидронасос с малой подачей, поэтому на этапе заполнения гидроцилиндра фрикциона наблюдается значи-

тельное падение давления в главной гидромагистрали $p_{ГЛ}$. Давление в гидроцилиндре фрикциона $p_{ФР}$ возрастает до значения, соответствующего усилию возвратных пружин фрикциона.

На этапе медленного заполнения сила в момент времени t_1 ЭБУ формирует сигнал о снижении силы тока в обмотке электромагнита до уровня $I_{ЭМ.медл}$. С некоторой задержкой, обусловленной инерционностью электромагнитного клапана и регулятора-распределителя, давление на выходе ис-

полнительного механизма уменьшается до значения $p_{\text{медл}}$. Величина задержки составляет не более 0,1 с. График $p_{\text{фр}} = f(t)$ на рис. 5 на этапе медленного заполнения имеет более пологую форму, что соответствует меньшей скорости движения поршня гидроцилиндра. За счет уменьшения скорости и обеспечивается снижение динамической нагрузки при его включении фрикциона. В конце этапа медленного заполнения фрикционные диски поджимаются и начинают передавать вращающий момент $M_{\text{фр}}$. При этом наблюдается возрастание давления в гидроцилиндре фрикциона и на выходе исполнительного механизма.

В момент времени t_2 алгоритм обнаружения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона ЭБУ формирует сигнал на начало регулирования давления. Сила тока в обмотке электромагнита клапана $I_{\text{эм}}$ изменяется по линейному закону до момента времени t_4 . В конце этапа регулирования сила тока $I_{\text{эм}}$ увеличивается до своего максимального значения гарантированного замыкания дисков и удержания фрикциона во включенном состоянии. График изменения давления на выходе исполнительного ме-

ханизма $p_{\text{им}}$ и в гидроцилиндре фрикциона $p_{\text{фр}}$ после затухания колебаний также носит линейный характер. На графике изменения вращающего момента $M_{\text{фр}}$, передаваемого фрикционом, наблюдаются два характерных всплеска. Первый всплеск обусловлен остановкой поршня гидроцилиндра. Второй всплеск обусловлен динамической нагрузкой вращающихся инерционных масс, вследствие полного замыкания фрикциона.

При программном режиме управления фрикционом невозможно управлять временем буксования фрикциона $t_{\text{букс}} = t_4 - t_3$, т. к. оно зависит не только от наклона характеристики силы тока $I_{\text{эм}}$ на этапе регулирования, но и от нагрузки, передаваемой фрикционом. Этот недостаток отсутствует в режиме управления по обратной связи, т. к. время буксования $t_{\text{букс}}$ в данном случае задается как параметр управления. На рис. 6 приведена осциллограмма переходных процессов в гидроприводе мехатронной системы пропорционального управления фрикционом ГМП при включении фрикционной муфты в режиме управления по обратной связи.

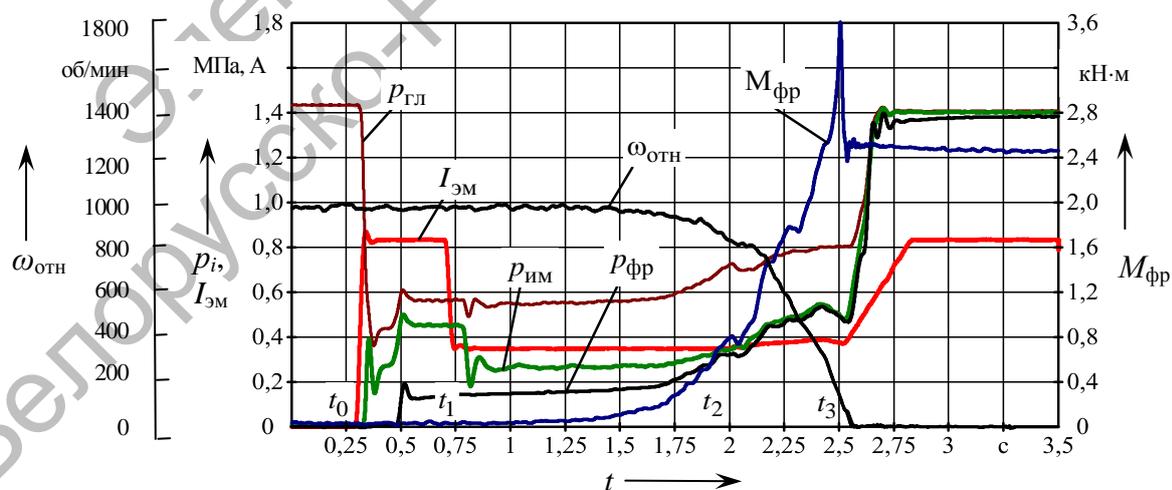


Рис. 6. Осциллограмма переходных процессов в гидроприводе мехатронной системы пропорционального управления фрикционом ГМП при включении фрикционной муфты в режиме управления по обратной связи

Этап заполнения гидроцилиндра фрикциона при управлении по обратной связи осуществляется по тому же алгоритму, что и для программного управления. В момент времени t_2 алгоритм обнаружения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона ЭБУ формирует сигнал на начало регулирования давления. На этом этапе ПИД-регулятор алгоритма управления формирует сигнал на электромагнит клапана таким образом, чтобы приблизить относительную угловую скорость фрикционных дисков $\omega_{отн}$ к эталонной прямолинейной характеристике. В результате снижается всплеск вращающего момента $M_{фр}$ в момент полного замыкания фрикционных дисков. После включения фрикциона ЭБУ увеличивает силу тока на обмотке электромагнита $I_{эм}$ до максимального значения.

Из осциллограмм переходных процессов видно, что включение фрикциона осуществляется плавно, с минимальным коэффициентом динамичности вращающего момента выходного вала, что позволяет значительно снизить динамические нагрузки в трансмиссии и теплонапряженность пар трения в момент переключения передач ГМП. Плавность включения фрикциона в значительной мере достигнута за счет оптимизации параметров алгоритма управления. Дублирующиеся способы обнаружения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона позволяют начать этап регулирования давления непосредственно в момент начала передачи фрикционом нагрузки. Это значительно снижает скачок вращающего момента в момент полного замыкания фрикциона.

На основании результатов испытаний можно сделать вывод, что разработанная на кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета совместно с конструкторами КБ ГМП «Белорусского автомобильного завода» мехатронная система управления фрикционами ГМП позволяет осуществлять пропорциональное управление давлением в

гидроцилиндрах фрикционов ГМП, что является одним из основных требований к системе автоматического управления. Данная система позволяет осуществлять управление фрикционом как в программном режиме, так и в режиме управления по обратной связи. Она отличается высокой точностью управления и высоким быстродействием.

Пропорциональность управления, точность и высокое быстродействие системы достигнуты за счет подбора оптимальных параметров регулятора-распределителя исполнительного механизма и применения малогабаритного быстродействующего редукционного пропорционального клапана в качестве пилотной ступени. Немалое значение имеет и способ формирования сигнала управления фрикционом. ЭБУ, в качестве которого используется микроконтроллер фирмы «Рексрот», позволяет формировать сигнал управления пилотной ступенью на основании двух алгоритмов: программного управления либо управления по обратной связи. Плавное включение фрикциона в значительной мере определяется точностью обнаружения момента окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона. Данные алгоритмы используют дублирование различных способов обнаружения, что позволяет точно и надежно обнаружить момент окончания заполнения гидроцилиндра фрикциона, тем самым снизив всплеск вращающего момента в момент полного замыкания фрикциона.

Сравнительный анализ двух описанных режимов управления фрикционом, программного управления и управления по обратной связи, показал, что способ управления, использующий обратную связь по относительной угловой скорости фрикционных дисков, дает возможность управлять относительной угловой скоростью фрикциона на этапе его замыкания по заданной характеристике. Это значительно снижает коэффициент динамичности вращающего момента фрикциона в момент его включения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасик, В. П. Механизм управления фрикционом гидромеханической передачи / В. П. Тарасик, Р. В. Плякин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 4. – С. 31–39.

2. Пат. 9916 РБ, МКИ⁷ F16 D 29/00, F 16 H 61/06. Механизм управления фрикционом / В. П. Тарасик [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20051023 ; заявл. 25.10.05 ; опубл. 30.10.07, Бюл. № 5. – 8 с. : ил.

3. Разработка перспективных систем автоматического управления гидромеханическими передачами мобильных машин / В. П. Тарасик [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-т. – 2006. – № 4. – С. 46–51.

4. Тарасик, В. П. Интеллектуальные системы управления транспортными средствами: монография / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 512 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 09.06.2009

**V. P. Tarasik, N. N. Gorbatenko,
R. V. Plyakin, A. N. Egorov**
**Mechatronic system of hydromechanical
transmission friction clutch proportioned
control**

Observed in the paper are the principles of operation of a mechatronic system of the hydromechanical transmission clutch proportioned control The design of the actuator of the clutches control of hydromechanical transmission developed for heavy-duty trucks BelAZ is offered. The description of the pressure control in the clutch hydraulic actuator is given. The results of bench testing of the prototype of the developed mechatronic control system by friction clutches of the hydromechanical transmission are presented.