

УДК 629.3

**В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф., Н. Н. Горбатенко, канд. техн. наук,  
О. А. Шаповалова, Р. В. Плякин, В. В. Региня**

## **ФРИКЦИОН ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ С МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Изложено описание конструкции фрикциона, разработанного авторами для гидромеханической передачи карьерных самосвалов БелАЗ. Описаны алгоритмы управления фрикционами, реализованные посредством мехатронной системы автоматического управления. Приведены результаты испытаний гидромеханической передачи с серийной и мехатронной системами управления.

Одним из наиболее эффективных способов повышения технико-экономических показателей автотранспортных средств является автоматизация управления их механизмами и системами. Существенное повышение показателей эффективности достигается, в частности, при автоматизации управления режимами двигателя и переключением передач в трансмиссии.

На карьерных самосвалах широкое применение получили гидромеханические передачи (ГМП). Переключение ступеней в коробке передач ГМП осуществляется многодисковыми фрикционами с гидравлическим приводом управления. При автоматизации ГМП возникает проблема эффективного управления фрикционами. Для этого конструкция фрикционов должна быть приспособлена для их автоматизации.

Фрикционы - наиболее сложные и в то же время уязвимые механизмы ГМП. Их надежность и долговечность существенно зависят от характеристик гидравлической системы управления процессами их включения и выключения.

Автоматическое управление ГМП позволяет не только повысить эффективность использования потенциальных возможностей автомобиля, что достигается путем рационального управления скоростными и нагрузочными режимами двигателя, но и существенно улучшить условия работы фрикционов ГМП:

предотвратить превышение предельно допустимых расчетных значений работы буксования фрикционов; снизить экстремальные значения температуры нагрева фрикционных дисков; уменьшить динамические нагрузки в трансмиссии при переключении передач; исключить возможность возникновения чрезмерно больших нагрузок, обусловленных ошибочными действиями водителя при командном управлении.

Эффективность и качество процесса функционирования автоматической системы управления переключением передач зависят от согласованного управления включаемыми и выключаемыми фрикционами. Согласованность их взаимодействия обеспечивается алгоритмом управления. Параметры алгоритма управления фрикционами выбирают из условия обеспечения плавности движения автомобиля при переключении передач, без рывков и значительных динамических нагрузок в трансмиссии. Для этого процесс переключения передач должен осуществляться без разрыва потока мощности, при плавном нарастании момента трения включаемого фрикциона и согласованном взаимодействии включаемого и выключаемого фрикционов. Выполнение этих требований достигается соответствующим выбором конструктивной схемы и параметров электрогидравлической исполнительской системы, способной реализо-

вать программу алгоритма управления. Эта система должна адекватно реагировать на сигналы управления фрикционными, формируемые электронным блоком управления. Конструкция фрикционных также должна быть приспособлена для согласованной работы всех элементов системы управления переключением передач.

В серийных гидромеханических передачах карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 45.60 тонн управление переключением передач осуществляется посредством электрогидравлических распределителей дискретного типа, которые обеспечивают лишь изменение направления потока жидкости — либо от источника подачи к гидроцилиндру фрикциона при его включении, либо из гидроцилиндра фрикциона на слив при его выключении. Блок распределителей выполнен таким образом, что магистраль подачи жидкости к гидроцилиндрам проходит через все гидрораспределители управления фрикционами. В результате, если гидрораспределитель управления каким-либо фрикционом находится во включенном состоянии, гидроцилиндры всех остальных фрикционов оказываются соединенными со сливом независимо от состояния их распределителей. Но поскольку процесс включения фрикциона содержит этап заполнения гидроцилиндра, то такой механизм управления не позволяет переключать передачи без разрыва потока мощности. Следовательно, не выполняется важнейшее требование к системе автоматического управления гидромеханической передачей. Кроме того, дискретные электрогидравлические распределители не обеспечивают режим регулирования давления рабочей жидкости в гидроцилиндре фрикциона в процессе его включения, что не позволяет управлять качеством переходного процесса при переключении передач.

Другой особенностью серийных гидромеханических передач БелАЗ яв-

ляется специфическая конструкция фрикционов переключения передач (рис. 1).

Для обеспечения плавности включения фрикциона его гидроцилиндр разделен на две полости, которые связаны между собой посредством клапана. При перемещении поршня одна из полостей гидроцилиндра заполняется воздухом, который затем сжимается поступающей в нее рабочей жидкостью через клапан, что позволяет растянуть во времени нарастание усилия сжатия фрикционных дисков и повысить плавность включения фрикциона. Однако, поскольку давление источника подачи рабочей жидкости не регулируется, то характеристика процесса сжатия дисков остается практически постоянной независимо от скоростного и нагрузочного режимов трансмиссии. В результате желаемое снижение динамических нагрузок в трансмиссии при переключении передач не достигается.

На кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета совместно с НТЦ ОАО «Белорусский автомобильный завод» разработана мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей (МСАУ ГМП). В ГМП, оборудованной МСАУ, управление фрикционами при переключении передач и блокировании гидротрансформатора производится посредством электрогидравлических пропорциональных клапанов (ЭПК), которые осуществляют управление процессами включения и выключения фрикционов и регулирование давления в гидроцилиндрах фрикционов по командам электронного блока управления. Параметры алгоритма управления фрикционами выбраны из условия обеспечения переключения передач без разрыва потока мощности и плавного изменения моментов трения фрикционов. Это необходимые условия для движения автомобиля без рывков и значительных динамических нагрузок в трансмиссии.

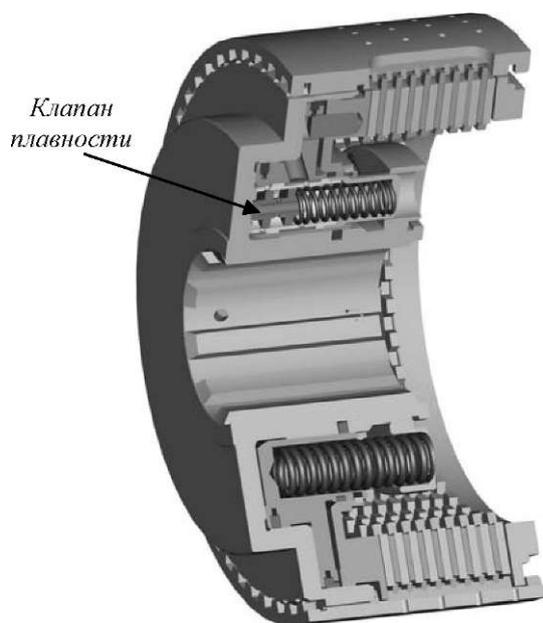


Рис. 1. Конструкция серийного фрикциона ГМП БелАЗ

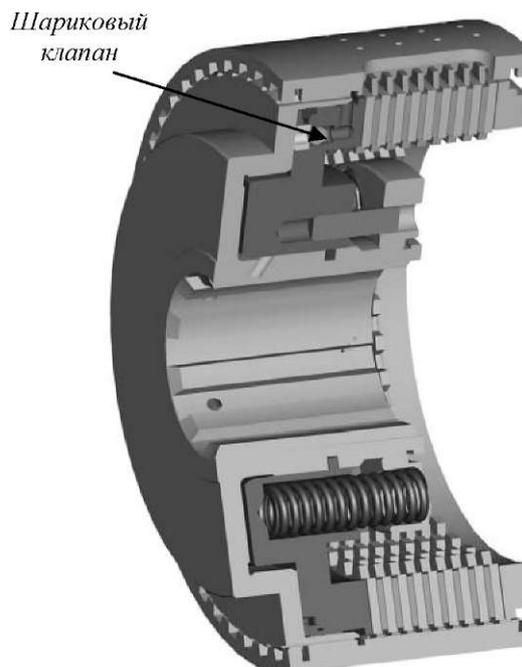


Рис. 2. Конструкция фрикциона ГМП с МСАУ

Поэтому возникла необходимость разработки конструкции фрикционов, осуществляющих переключение передач в ГМП, адаптированных к совместной работе с ЭГПК и электронным блоком управления (ЭБУ).

Кроме того, управление моментом трения фрикциона должно однозначно определяться выходным сигналом ЭГПК — давлением на его выходе, формируемым по командам ЭБУ. После снятия сигнала управления фрикцион должен надежно выключаться во всем диапазоне изменения скоростных режимов двигателя и трансмиссии. При выборе технического решения для разработки конструкции фрикциона было принято условие сохранения взаимозаменяемости с серийным фрикционом ГМП карьерного самосвала БелАЗ—7555 на уровне сборочной единицы.

В процессе проведенного комплекса исследований разработана конструкция фрикциона переключения передач ГМП, обеспечивающая выполне-

ние всех сформулированных требований (рис. 2).

Основные технические решения, принятые в разработанной конструкции: — гидроцилиндр фрикциона выполнен с одной рабочей полостью, обеспечивающей однозначную зависимость между управляющим сигналом давления на выходе ЭГПК и усилием сжатия фрикционных дисков, определяющим характер регулирования момента трения фрикциона;

— в гидроцилиндре установлен шариковый клапан слива, обеспечивающий минимизацию усилия возвратных пружин поршня и подстраховку процесса выключения фрикциона в экстремальных условиях, например, при значительном увеличении скорости автомобиля на крутом спуске, при не критичных дефектах изготовления или сборки и др.;

— исключено устройство компенсации усилия центробежного давления жидкости на поршень, применяемое в

серийном фрикционе, что существенно упростило конструкцию фрикциона.

В разработанном алгоритме управления фрикционами ГМП предусмотрена возможность использования двух принципов регулирования давления в гидроцилиндре фрикциона: принцип разомкнутого управления и принцип управления по отклонению. Принцип разомкнутого управления обеспечивает реализацию заданной программы изменения давления независимо от результата управления, т. е. от протекания процесса буксования фрикциона во времени. В результате время и работа буксования существенно зависят от дорожных условий и режимов работы двигателя. Для реализации принципа управления по отклонению используется система с замкнутым контуром, снабженная обратной связью по отклонению параметра управления. В разработанной системе управления фрикцио-

ном ГМП в качестве сигнала обратной связи использовано отклонение скорости скольжения фрикционных дисков в процессе буксования фрикциона от заданной эталонной характеристики.

Таким образом, разработанная МСАУ позволяет реализовать два режима управления фрикционами: программный и с обратной связью по отклонению скорости скольжения дисков от эталонной характеристики. Последний в дальнейшем будем сокращенно называть режимом управления с обратной связью.

При программном управлении сигнал, который ЭБУ передает на обмотку электромагнита пропорционального клапана на этапе регулирования давления, имеет заранее заданную форму. График изменения силы тока  $I_{\text{эм}}$  в обмотке электромагнита в этом случае имеет вид, представленный на рис. 3.

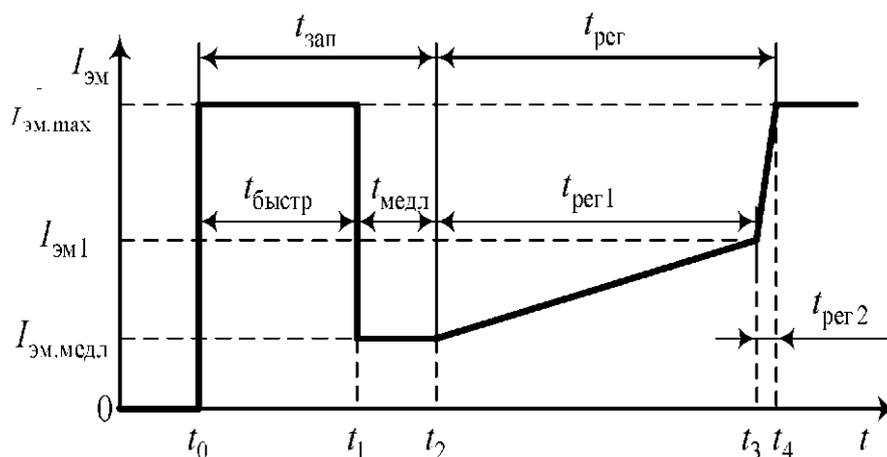


Рис. 3. Сигнал управления электромагнитным клапаном при программном режиме управления

На обмотку электромагнита пропорционального клапана в момент времени  $t_0$  подается сигнал максимальной скважности, формируемый ЭБУ, и возникающая в обмотке сила тока максимальной величины  $I_{\text{эм.мах}}$  выдерживается в течение интервала времени  $\hat{\Delta}_{\text{быстр}}$ . Это обеспечивает поддержание высоко-

го уровня давления рабочей жидкости, устанавливаемого ЭГПК в выходной гидролинии, что способствует быстрому заполнению гидроцилиндра на начальном этапе. Окончательный этап заполнения, так называемый этап медленного заполнения, происходит в течение интервала времени  $\hat{\Delta}_{\text{едл}}$  при меньшем

давлении, что способствует снижению величины всплеска давления, возникающего в гидроцилиндре фрикциона в момент его полного заполнения. При этом в обмотке электромагнита клапана формируется сила тока  $I_{эм\text{медл}}$ .

На интервале регулирования давления  $\hat{p}_{рег}$  управление током в обмотке электромагнита осуществляется в два этапа. На первом этапе  $\hat{e}_{г1}$  осуществляется плавное нарастание силы тока до величины  $I_{эм1}$ , что обеспечивает медленное нарастание давления в гидроцилиндре фрикциона и плавное снижение скорости скольжения фрикционных дисков до их полного замыкания. На втором этапе регулирования  $\hat{e}_{г2}$  темп нарастания силы тока в обмотке электромагнита, регулируемый ЭБУ, значи-

тельно возрастает, а по окончании этого этапа сила тока достигает максимально возможного значения  $I_{эм\text{max}}$ , что обеспечивает гарантированное замыкание фрикциона и удержание его во включенном состоянии при передаче нагрузки.

При использовании режима управления фрикционом по обратной связи сигнал на электромагнит клапана на этапе регулирования давления формируется в зависимости от отклонения скорости скольжения фрикционных дисков от эталонной характеристики. Этап же заполнения гидроцилиндра протекает аналогично программному режиму управления. Графики процесса управления фрикционом по обратной связи приведены на рис. 4.

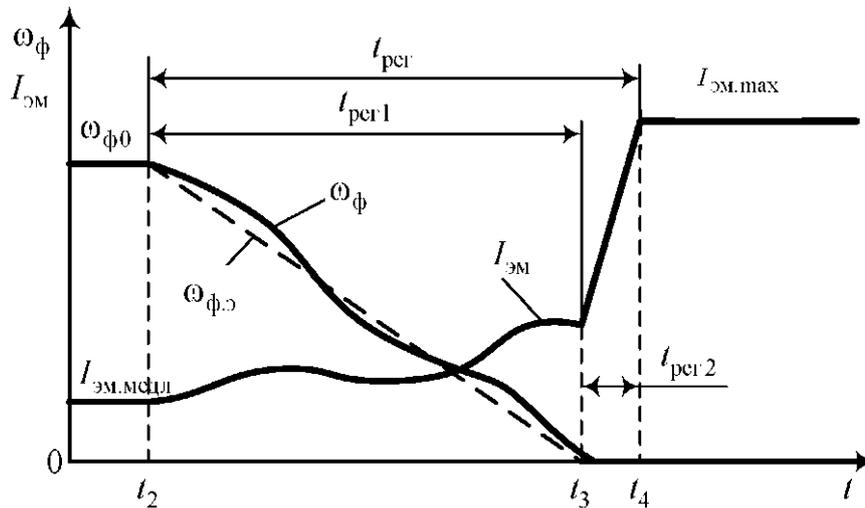


Рис. 4. Графики изменения параметров управления фрикционом ГМП посредством ПИД-регулятора

Для формирования сигнала управления электромагнитным клапаном в ЭБУ используется алгоритм ПИД-регулирования. Сигналом обратной связи является отклонение  $Lш$  скорости скольжения фрикционных дисков Юф от заданной эталонной характеристики Юфэ

$$Lш = ш_φ - ш_φ.э. \quad (1)$$

Значение Юф равно разности скоростей ведущих  $ю_{вдц}$  и ведомых  $ю_{вдм}$  фрикционных дисков в процессе буксования фрикциона при его включении:

$$ш_φ = ш_{вдц} - ш_{вдм}. \quad (2)$$

Значения  $\omega_{вдц}$  и  $\omega_{вдм}$  вычисляет ЭБУ на основе информации об измеряемых величинах частот вращения валов коробки передач ГМП с учетом передаточных чисел между соответствующими дисками фрикциона и валами, с которыми кинематически связаны эти диски. В результате получаем следующее выражение для определения скорости скольжения фрикционных дисков  $\omega_{ф}(\wedge)$ , изменяемой во времени  $t$  при буксовании фрикциона в процессе его включения:

$$\omega_{ф}(\wedge) = \frac{\omega_{вх}(\wedge)}{U1} - \omega_{вх}(\wedge) \cdot 2 \quad (3)$$

где  $U1$  - передаточное число от входного вала коробки передач ГМП до ведущих дисков фрикциона;  $U2$  - передаточное число от выходного вала коробки передач до ведущих дисков.

Эталонная характеристика может быть линейной, кусочно-линейной, криволинейной. Наиболее часто используют линейную характеристику:

$$\omega_{ф.э}(\wedge) = \omega_{ф0} \frac{\omega_{ф}(\wedge) - \omega_{ф0}}{t_{пер1}} \quad (4)$$

где  $\omega_{ф0}$  - начальная скорость скольжения фрикционных дисков, фиксируемая контроллером в момент времени  $t_2$  (см. рис. 4);  $t$  - текущее время процесса управления.

ПИД-регулятор ЭБУ управляет током в обмотке электромагнита пропорционального клапана таким образом, чтобы изменение скорости скольжения фрикционных дисков  $\omega_{ф}(\wedge)$  как можно точнее совпадало с заданной эталонной характеристикой  $\omega_{ф.э}(\wedge)$ . В результате снижается всплеск вращающего момента на карданном валу трансмиссии в момент полного замыкания фрикционных дисков. После замыкания фрикционных дисков ЭБУ в течение периода времени  $\wedge_{ег2}$  постепенно увеличивает силу тока в обмотке электромагнита

$I_{эм}$  до максимального значения (см. рис. 4). Вычисление силы тока управления  $I_{эм}(t)$  осуществляется по формуле

$$I_{эм}(t) = K \left( \frac{1}{T} \int_0^t Du(\wedge) dt + Du(\wedge) + T \frac{dDu(\wedge)}{dt} \right) \quad (5)$$

где  $K_p$  - коэффициент передачи регулятора;  $T_u, T_d$  - постоянные времени соответственно интегрирования и дифференцирования ошибки управления.

Одним из главных достоинств управления фрикционом по принципу обратной связи является возможность однозначного обеспечения заданного времени буксования фрикциона  $k = \wedge_{ег1}$ , что ограничивает предельное значение работы буксования. Одновременно снижается величина динамической нагрузки механизмов трансмиссии благодаря адаптации параметров управления давлением рабочей жидкости в гидроцилиндре фрикциона с учетом изменения коэффициента трения дисков в процессе буксования. Такое управление позволяет увеличить срок службы фрикционных накладок за счет снижения теплонапряженности пар трения, а также других деталей трансмиссии в связи со снижением максимальных значений нагрузок.

Испытания созданной МСАУ проводились в экспериментальном цеху Белорусского автомобильного завода на моторно-трансмиссионном стенде, предназначенном для исследования процессов переключения передач и блокирования гидротрансформатора ГМП карьерных самосвалов грузоподъемностью 45.60 тонн.

При анализе экспериментальных данных в качестве оценочных критериев качества переходных процессов, вызванных включением фрикционов ГМП, были приняты:

- максимальный динамический момент на выходном валу ГМП  $M_{вх max}$ ;

- коэффициент динамичности момента на выходном валу ГМП  $k_d$ ;

- время буксования включаемого фрикциона  $t^{\wedge}$

Значение  $k_d$  вычислялось по формуле

$$k_d = \frac{M_{\text{вых. макс}}}{M_{\text{вых.уст}}} \quad (6)$$

где  $M_{\text{вых.уст}}$  - установившийся момент на выходном валу ГМП.

Параметры  $k_d$  и  $M_{\text{вых. макс}}$  представляют собой критерии динамической нагруженности трансмиссии, а параметр  $t^{\wedge}$  косвенно характеризует тепловую на-

груженность фрикциона.

Во время испытаний были получены осциллограммы переходных процессов при переключении передач с первой по шестую и при включении передачи заднего хода, отображающие процессы в гидроприводе управления фрикционом, а также изменения относительной угловой скорости фрикционных дисков и вращающего момента, передаваемого ГМП.

На рис. 5 приведены графики, полученные при испытаниях ГМП в процессе переключения передач в режиме управления по обратной связи.

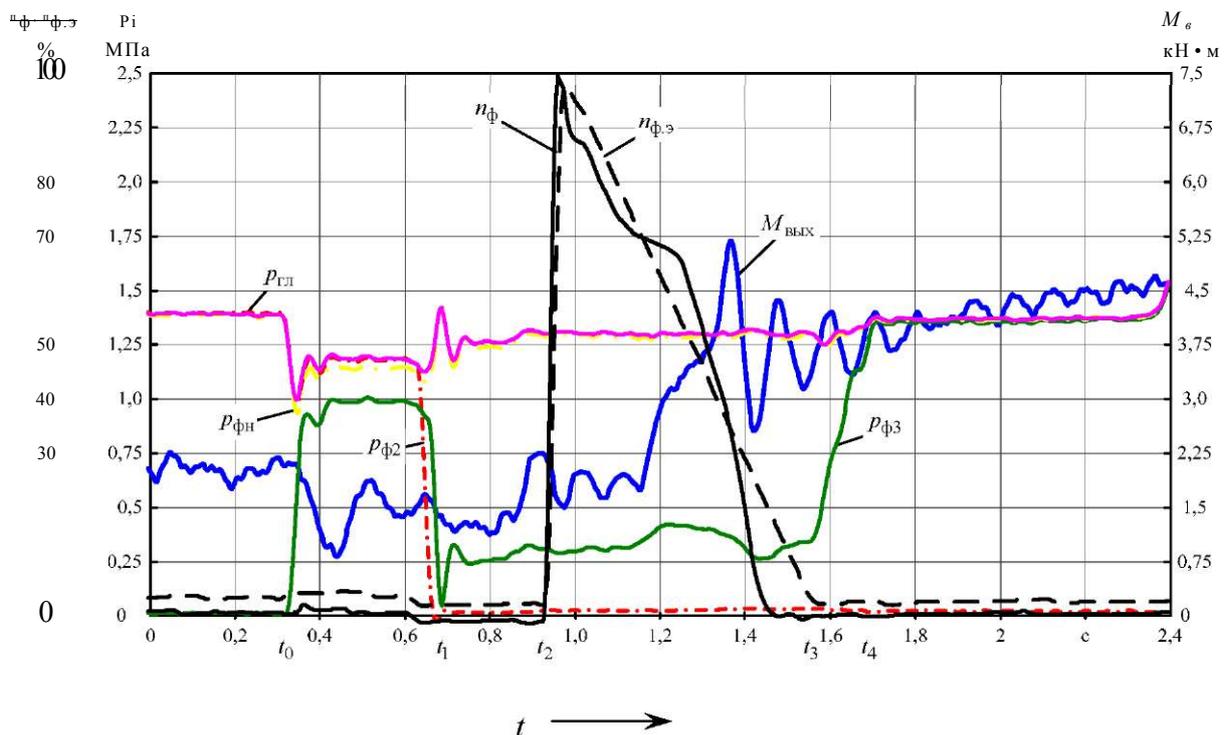


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса при переключении передач  $2^3$  в режиме управления по обратной связи

Рассмотрим пример переключения передач  $2^3$  в режиме управления по обратной связи (рис. 5). При данном переключении задействованы два фрикциона: выключаемый Ф2 и включаемый Ф3. Процесс переключения передач начинается в момент времени  $t_0$ , когда ЭБУ формирует сигнал на подъем давления

рфз в гидроцилиндре включаемого фрикциона Ф3. Процесс управления давлением во включаемом фрикционе на этапе заполнения ( $t_0 - t_2$ ) описан выше (см. рис. 3). Для снижения времени разрыва потока мощности давление рф2 в гидроцилиндре выключаемого фрикциона Ф2 поддерживается на максимальном

уровне до окончания этапа быстрого заполнения (момент времени  $t_1$ ). После этого ЭБУ обесточивает электромагнит управления фрикциона Ф2.

После окончания этапа медленно-го заполнения (момент времени  $t_2$ ) алгоритм, реализующий ПИД-регулятор, высчитывает относительную скорость Скольжения фрикционных дисков Юф и принимает это значение за 100 %. Дальнейшие вычисления ведутся в относительных единицах. Это позволяет упростить вычислительный процесс алгоритма ПИД-регулятора и повысить его точность. Далее в промежуток времени  $t_2 - t_g$  ПИД-регулятор ЭБУ управляет током в обмотке электромагнита пропорционального клапана таким образом, чтобы изменение скорости скольжения фрикционных дисков Юф как можно

точнее совпадало с заданной эталонной прямолинейной характеристикой Юф. После замыкания фрикционных дисков (момент времени  $t_3$ ) ЭБУ постепенно увеличивает силу тока в обмотке электромагнита управления включаемым фрикционом Ф3 до максимального значения.

При проведении испытаний опыты по переключению передач повторялись от 3-х до 5-ти раз. В табл. 1 приведены полученные при испытаниях усредненные значения коэффициента динамичности  $k_d$ , позволяющие дать оценку качества переходных процессов при переключении передач ГМП посредством МСАУ в сравнении с показателями, достигаемыми с серийной системой управления ГМП.

Табл. 1. Значения коэффициента динамичности  $k_d$  переходных процессов при переключениях передач

Переключаемая передача	Серийная ГМП	Модернизированная ГМП с МСАУ	
		Программное управление фрикционами	Управление фрикционами по обратной связи
N - 1	1,995	1,800	1,445
1 - 2	2,210	1,715	1,470
2 - 3	2,100	1,645	1,445
3 - 4	2,020	1,825	1,555
4 - 5	2,005	1,675	1,405
5 - 6	1,925	1,585	1,415
6 - 5	1,975	1,670	1,490
5 - 4	2,110	1,685	1,525
4 - 3	2,020	1,960	1,780
3 - 2	2,050	1,795	1,660
2 - 1	2,045	1,840	1,525
N - R	1,975	1,715	1,680

Для ГМП с серийной системой управления значения коэффициентов динамичности при переключениях передач, как правило, превышают величину 2. Высокие значения коэффициентов динамичности обусловлены несоответствием параметров процесса регулирования давления в гидроцилиндре клапаном плавности

величине вращающего момента, нагружающего фрикцион при переключении передачи. Другим фактором, влияющим на эффективность результатов управления, является то, что переключения передач в ГМП с серийной системой управления осуществляются с разрывом потока мощности. Время разрыва потока мощно-

сти определяется временем заполнения рабочей жидкостью гидроцилиндров фрикционов и составляет 0,25.0,45 с. Меньшие значения характерны для переключений, в которых участвуют два фрикциона (при переключениях 1—2, 2—3, 4—5, 5—6 и обратные переключения), а большие — для переключений с четырьмя управляемыми фрикционами (переключения 3—4 и 4—3). С увеличением износа фрикционных дисков в процессе эксплуатации время заполнения гидроцилиндров фрикционов  $\Delta_{\text{зап}}$  возрастает, следовательно, увеличивается время разрыва потока мощности, что приводит к ухудшению показателей качества переходных процессов.

Одной из задач системы управления автоматической коробкой передач является обеспечение необходимого перекрытия передач при переключении. Под перекрытием понимается временной интервал, в котором еще полностью не разблокирован выключаемый фрикцион предыдущей передачи, а включаемый фрикцион уже развивает момент трения и воспринимает нагрузку, передаваемую через трансмиссию. Оба фрикциона — выключаемый и включаемый — могут одновременно при этом выполнять работу трения, т. е. находиться в режиме буксования. Разработанная МСАУ ГМП позволяет реализовать режим перекрытия моментов трения фрикционов и управлять величиной

времени перекрытия. При реализации этого режима к ведущим колесам непрерывно подводится поток энергии от двигателя, что позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели карьерных самосвалов: повысить среднюю скорость движения, производительность, плавность хода, снизить расход топлива.

При испытаниях применялись два способа управления давлением: программный и с обратной связью по отклонению скорости скольжения дисков фрикционов от эталонной характеристики. Сравнивая результаты, полученные при обоих способах управления (см. табл. 1), следует отметить, что при управлении по обратной связи нагруженность трансмиссии снижается, а плавность переключения передач получается гораздо выше.

Таким образом, результаты проведенных испытаний показали, что разработанная конструкция фрикциона (см. рис. 2) в сочетании с мехатронной системой управления обеспечивает надежную работу как на режиме включения, так и при выключении фрикциона, существенно улучшает показатели качества переходных процессов при переключении передач, что позволяет повысить надежность и долговечность всех элементов трансмиссии, включая и фрикционы ГМП.

Белорусско-Российский университет  
ОАО «Белорусский автомобильный завод»  
Материал поступил 16.11.2010

V. P. Tarasik, N. N. Gorbatenko, O. A. Shapovalova,  
R. V. Pliakin, V. V. Reginya  
**The friction clutch of the hydromechanical  
transmission with the mechatronic system  
of automatic control**

The design of the friction clutch developed by the authors for the hydromechanical transmission of the BELAZ quarry dump trucks is presented. Algorithms of friction clutches control, implemented by means of the mechatronic system of automatic control are given. The paper gives the results of testing the hydromechanical transmission with both serial and mechatronic control systems.

## **Редакционная коллегия**

Главный редактор	д-р техн. наук, проф. И. С. Сазонов
Зам. главного редактора	д-р техн. наук, доц. В. М. Пашкевич
Зам. главного редактора	канд. техн. наук, доц. М. Е. Лустенков
Ответственный секретарь	В. И. Кошелева

## **Члены редколлегии**

Д-р экон. наук, проф. Н. И. Базылев, д-р экон. наук, проф. С. И. Барановский, д-р техн. наук, проф. Э. И. Батяновский, д-р техн. наук, проф. Е. И. Берестов, д-р техн. наук, проф. Л. А. Борисенко, д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисов, д-р техн. наук, проф. С. В. Босаков, д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Гапоненко, д-р техн. наук, проф. П. Н. Громыко, д-р техн. наук, доц. А. М. Даньков, д-р техн. наук, проф. В. А. Ким, д-р техн. наук, проф. А. П. Кузнецов, д-р техн. наук, проф. В. П. Куликов, д-р техн. наук, проф. А. М. Лазаренков, д-р техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. В. И. Луковников, д-р техн. наук, проф. В. А. Новиков, д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Редько, д-р техн. наук, доц. С. Д. Семенюк, д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Сотский, д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф. В. В. Тур, д-р техн. наук, проф. Б. И. Фираго, д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко

Подписано в печать 11.03.2011. Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 19,76. Уч.-изд. л. 15,0. Тираж 100 экз. Заказ № 192.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»  
ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.  
212000, г. Могилев, пр. Мира, 43

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2011