

УДК 629.113

В. С. Савицкий, В. П. Тарасик

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ФРИКЦИОНАМИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

UDC 629.113

V. S. Savitsky, V. P. Tarasik

BENCH TESTS OF THE MECHANISM FOR CONTROLLING FRICTION CLUTCHES OF THE HYDROMECHANICAL TRANSMISSION IN A QUARRY DUMP TRUCK

Аннотация

Приведены результаты стендовых испытаний разработанного механизма управления фрикционами гидромеханической передачи. Построены его статические и переходные характеристики. Определены утечки рабочей жидкости во включенном и в выключенном состоянии. Определены параметры осцилляции тока управления.

Ключевые слова:

гидромеханическая передача, механизм управления фрикционами, статическая характеристика, утечки рабочей жидкости, гистерезис.

Abstract

The results of bench tests of the mechanism developed for controlling friction clutches of the hydromechanical transmission are presented. Its static and transient characteristics are constructed. Leakages of the working fluid in the ON and OFF modes are determined. The parameters of the control current oscillation are defined.

Keywords:

hydromechanical transmission, friction clutch control mechanism, static characteristics, working fluid leakage, hysteresis.

В трансмиссии карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 30...60 т, а также строительно-дорожной техники используются гидромеханические передачи (ГМП), которые состоят из гидротрансформатора (ГДТ) и вальной либо планетарной коробки передач (КП). Переключение ступеней КП осуществляется многодисковыми фрикционами с электрогидравлическим приводом управления.

Для управления ГМП БелАЗ создана мехатронная система автоматического управления (МСАУ), которая позволила существенно улучшить ряд показателей эксплуатационных свойств самосвала, повысить безопасность дви-

жения, увеличить ресурс механизмов трансмиссии, создать комфортные условия труда водителю. В разработке МСАУ принимали участие сотрудники кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета, в том числе авторы статьи [1–3].

Для обеспечения высоких показателей работы машины и комфортных условий водителю давление во включаемом и выключаемом фрикционах должно изменяться по сложным характеристикам, и изменяться в зависимости от состояния автомобиля и условий эксплуатации. В состав МСАУ входит микропроцессорный контроллер, который способен реализовать любую ха-



рактическую характеристику изменения тока, а механизм управления фрикционом должен преобразовать ток в давление рабочей жидкости, поступающей в гидроцилиндр фрикциона.

В настоящее время все ведущие производители ГМП в качестве механизмов управления фрикционами используют электрогидравлические пропорциональные клапаны (ЭГПК) [4–7]. Эти клапаны позволяют обеспечить любую характеристику изменения давления в гидроцилиндрах фрикционов ГМП, поскольку давление, поддерживаемое клапаном, пропорционально току, протекающему в обмотке электромагнита. Это важное свойство позволяет обеспечивать высокую плавность переключения ступеней, безразрывность передачи энергии на ведущие колёса, а также адаптацию характеристик управления к изменению параметров ГМП и эксплуатационных условий.

Для МСАУ ГМП БелАЗ разработан механизм управления фрикционами (МУФ), конструкция которого представлена на рис. 1. Он выполнен в виде двухступенчатого ЭГПК, состоящего из регулятора давления (РД) с шаровым запорно-регулирующим органом и золотникового регулятора-распределителя (РР). РД состоит из пропорционального электромагнита 1, шарикового затвора 4, седла клапана 5 и камеры регулирования 6, соединённой через дроссель 20 с полостью управления 7 регулятора-распределителя. Эта полость через дроссели 8, 13 и 20 постоянно соединена с каналом 14 подвода рабочей жидкости от гидронасоса. Основные элементы РР – золотник 10 и пружина 12. Канал 14 РР соединён с гидронасосом, канал 15 – с гидроцилиндром фрикциона, а канал 16 – с гидробаком.

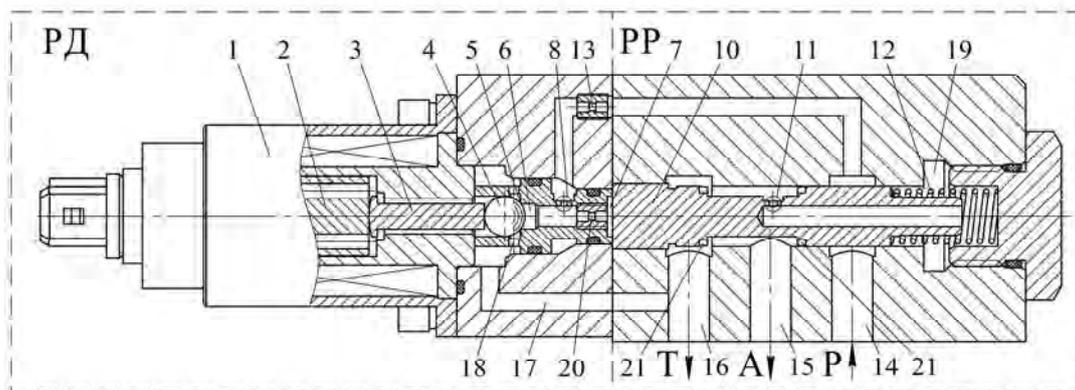


Рис. 1. Механизм управления фрикционом

С целью проверки работоспособности созданного механизма управления фрикционами ГМП проведены стендовые испытания опытной партии МУФ в количестве 20 шт. Определению подлежали статические характеристики каждого образца МУФ, характеристики формирования давления на выходе МУФ при включении гидроцилиндра стенда, линейность статической харак-

теристики и её гистерезис, запаздывание срабатывания МУФ, а также утечки рабочей жидкости из МУФ.

Испытания проводились в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета. Для проведения испытаний был создан специальный стенд. Фотография стенда представлена на рис. 2. На нём обозначены:

1 – МУФ; 2 – датчик давления на выходе МУФ; 3 – насосная станция; 4 – плата сбора данных *National Instruments USB 6009*; 5 – контроллер управления; 6 – источник постоянного напряжения 24 В; 7 – гидроцилиндр (ГЦ);

8 – датчик давления системы управления; 9 – датчик температуры масла; 10 – датчик давления РД.

Принципиальная гидравлическая схема станда представлена на рис. 3.

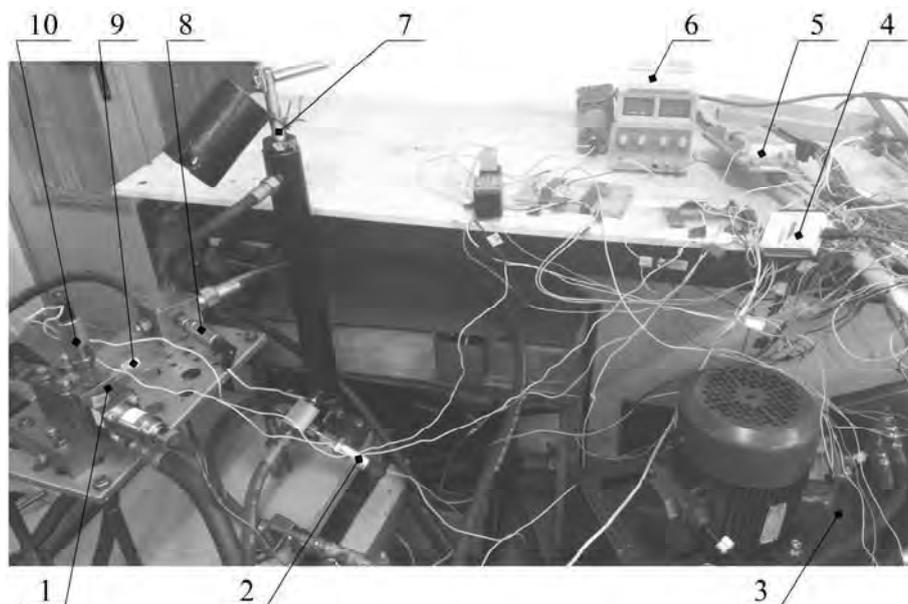


Рис. 2. Испытательный стенд

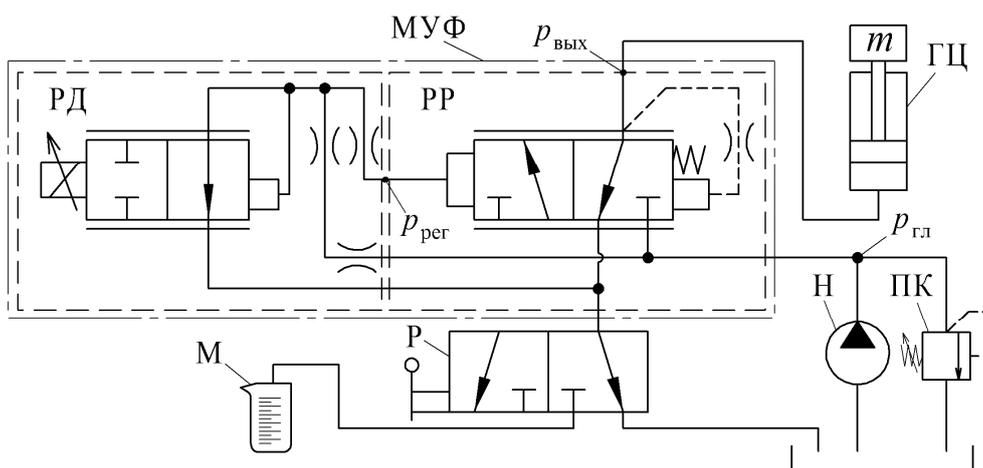


Рис. 3. Принципиальная гидравлическая схема станда

В состав станда входит испытываемый МУФ, насос Н, позволяющий развить давление, соответствующее рабочему давлению в главной гидромагистрали ГМП на различных передачах,

которое регулируется переливным клапаном ПК. Для имитации работы гидроцилиндра фрикциона ГМП использован гидроцилиндр ГЦ системы рулевого управления автомобиля МАЗ, возврат



штока гидроцилиндра в исходное положение осуществляется грузом массой m . Для определения величины утечек рабочей жидкости из МУФ в стенде предусмотрен гидрораспределитель Р, который позволяет перенаправлять поток рабочей жидкости, вытекающей из МУФ, из гидробака в мерную ёмкость М.

При проведении испытаний температура рабочей жидкости (масло марки «А», ТУ 38.1011282–89) составляла 35...45 °С.

Во время проведения испытаний регистрировались следующие параметры:

- давление на выходе насосной установки системы питания $p_{ГД}$;
- давление на выходе регулятора давления МУФ $p_{рег}$;
- давление на выходе МУФ $p_{вых}$;
- ток в обмотке электромагнита пропорционального клапана $I_{эм}$.

Регистрация параметров осуществлялась платой сбора данных *National Instruments USB 6009* с использованием датчиков давления фирмы ООО «ПОИНТ», модель ИД-И-2,5, и датчика температуры ДТ-01 производства ОАО «Измеритель».

Процесс проведения испытаний МУФ разделяется на ряд этапов:

- установка на стенде опытного образца МУФ и датчиков давления в гидроприводе управления; подключение датчиков к плате сбора данных *NI USB 6009*; тарировка датчиков;
- определение статической характеристики клапана путем формирования линейной характеристики изменения тока, подаваемого на обмотку электромагнита, состоящей из двух ветвей: плавного нарастания тока от нуля до заданного максимального значения $I_{эм} = \max$, а затем плавного спада тока до нулевого значения. Длительность периода каждой ветви составляла 25 с;
- определение выходных характеристик регулятора давления и регулятора-распределителя МУФ при включении гидроцилиндра стенда, имитирующего гидроцилиндр фрикциона. При этом сигнал, который контроллер передает на обмотку электромагнита клапана на этапе регулирования давления, имеет заранее заданную форму, аналогичную форме реального сигнала, реализуемого МУФ. Сигнал управления представлен на рис. 4.

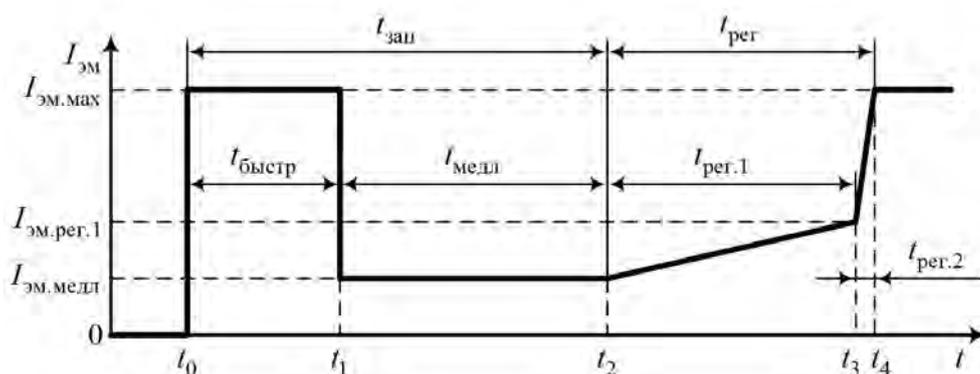


Рис. 4. Сигнал управления

На обмотку электромагнита пропорционального клапана в момент времени t_0 подается сигнал максимальной скважности, формируемый контролле-

ром, и возникающая в обмотке сила тока максимальной величины $I_{эм.мах}$ выдерживается в интервале времени $t_{быстр}$. Это обеспечивает поддержа-



ние высокого уровня давления рабочей жидкости, устанавливаемого МУФ в выходной гидролинии, что способствует быстрому заполнению гидроцилиндра на начальном этапе. Окончательный этап заполнения, так называемый этап медленного заполнения, в интервале времени $t_{\text{медл}}$ происходит при меньшем давлении, что способствует снижению величины всплеска давления, возникающего в гидроцилиндре в момент его полного заполнения и остановки поршня. 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 шага. На первом шаге $t_{\text{рег.1}}$ осуществляется плавное нарастание силы тока до величины $I_{\text{эм.рег.1}}$, что обеспечивает медленное нарастание давления в гидроцилиндре. На втором шаге регулирования $t_{\text{рег.2}}$ контроллер резко увеличивает силу тока в обмотке электромагнита до максимально возможного значения $I_{\text{эм.мах}}$, гарантирующего удержание гидроцилиндра во включенном состоянии.

В результате проведения испытаний были получены осциллограм-

мы процессов функционирования всех 20 экземпляров МУФ, подвергшихся испытаниям. На рис. 5–7 представлены результаты испытаний для одного из механизмов.

На рис. 5 приведены характеристики изменения давлений при плавном нарастании тока от нуля до заданного максимального значения $I_{\text{эм}} = \text{мах}$, а затем при плавном спаде тока до нулевого значения; на рис. 6 а, б – статические характеристики регулятора давления $p_{\text{рег}}$ и МУФ $p_{\text{вых}}$ в зависимости от тока в обмотке электромагнита $I_{\text{эм}}$, построенные по данным, приведенным на рис. 5.

На рис. 7 представлены графики процесса включения гидроцилиндра стенда, имитирующего гидроцилиндр фрикциона, отображающие изменение во времени следующих характеристик: тока в обмотке электромагнита $I_{\text{эм}}$ (управляющий сигнал); давления, формируемого регулятором давления $p_{\text{рег}}$; давления на выходе МУФ $p_{\text{вых}}$; давления насосной установки $p_{\text{гл}}$. Аналогичные характеристики получены для всей партии МУФ.

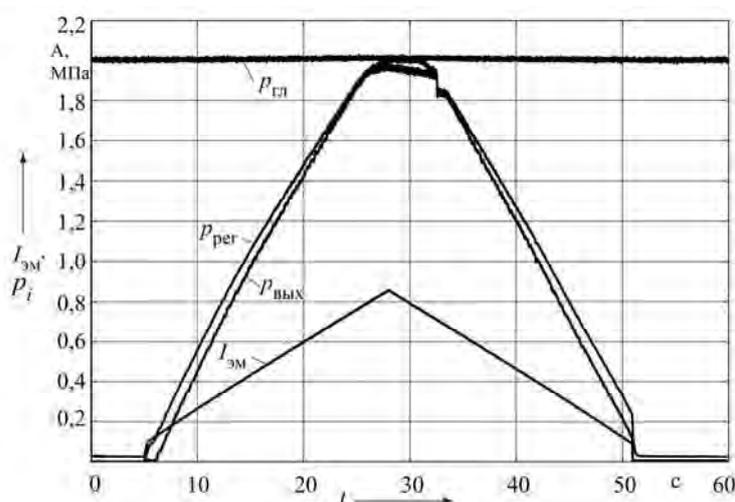


Рис. 5. Осциллограмма процесса испытания МУФ



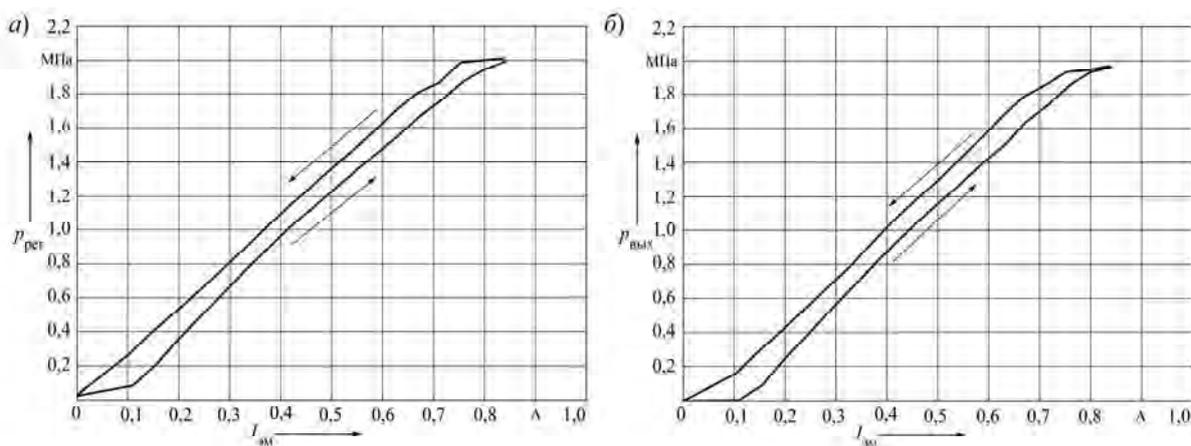


Рис. 6. Статические характеристики: а – регулятора давления $p_{\text{рег}} = f(I_{\text{эм}})$; б – МУФ $p_{\text{вых}} = f(I_{\text{эм}})$

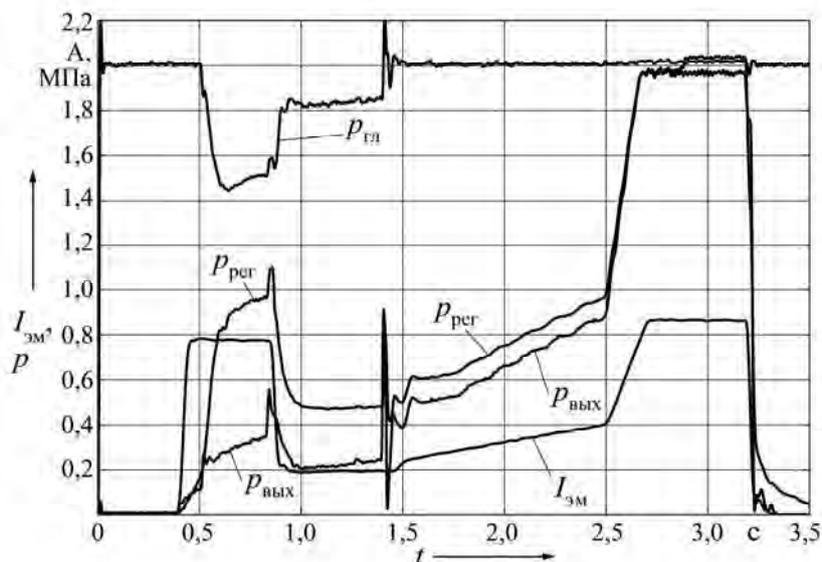


Рис. 7. Выходные характеристики МУФ

Время запаздывания формирования сигнала управления характеризует отставание давления на выходе РД и МУФ от тока управления. По графикам выходных характеристик МУФ установлено, что время запаздывания регулятора давления $t_{\text{рег}}$ изменяется в пределах 20...30 мс, а время запаздывания регулятора-распределителя $t_{\text{вых}}$ – в диапазоне 25...40 мс. Полученные оценки сравнивали с параметрами образцов зарубежных фирм. У ЭГПК фирмы Thomas Magnete, модель PPCP09-HFPPRV-V2,

время запаздывания формирования выходного сигнала составляет 100 мс, у ЭГПК HydraForce TS98-T34 – 50 мс. Таким образом, запаздывание находится ниже уровня зарубежных аналогов.

Важной характеристикой МУФ является величина утечек рабочей жидкости, т. к. от неё в определённой мере зависят требования к источнику энергии гидросистемы ГМП, т. е. к масляному насосу.

Испытаниям на утечки подвергались все изготовленные экземпляры МУФ. Результаты испытаний приведе-



ны в табл. 1. Можно отметить, что в включенном состоянии утечки через все МУФ близки к расчетному значе-

нию 0,8 л/мин, а во включенном состоянии почти равны нулю.

Табл. 1. Результаты испытания МУФ на утечки

Номер МУФ	Величина утечек $Q_{ут}$, л/мин при $p_{гд} = 2,0$ МПа		Номер МУФ	Величина утечек $Q_{ут}$, л/мин при $p_{гд} = 2,0$ МПа	
	Клапан выключен	Клапан включен		Клапан выключен	Клапан включен
1	0,81	0,07	11	0,86	≈ 0
2	0,89	≈ 0	12	0,79	≈ 0
3	0,90	0,07	13	0,92	≈ 0
4	0,86	≈ 0	14	0,85	≈ 0
5	0,85	≈ 0	15	0,89	≈ 0
6	0,88	0,06	16	0,89	0,06
7	0,86	≈ 0	17	0,91	0,10
8	0,93	≈ 0	18	0,78	≈ 0
9	0,89	≈ 0	19	0,93	0,12
10	0,82	0,08	20	0,88	≈ 0

Гистерезис характеристики МУФ $G_{вых}$ определялся по формуле

$$G_{вых} = \frac{\Delta p}{p_{вых. max}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Δp – максимальная ширина петли гистерезиса, Па (определяется по статическим характеристикам); $p_{вых. max}$ – максимальное давление на выходе МУФ, соответствующее максимальному значению тока I_{max} , подаваемого в обмотку электромагнита, Па, в данном случае $p_{вых. max} = 2,0$ МПа.

Величина гистерезиса $G_{вых}$ изготовленных образцов МУФ находится в пределах 7,5...17 %. Гистерезис характеристик МУФ обусловлен потерями на трение в золотниковом клапане и в электромагните, а также величиной ЭДС самоиндукции электромагнитной системы электромагнита.

Один из способов борьбы с гистерезисом заключается в формировании

осциллирующих относительных перемещений сопрягаемых подвижных элементов [8], обеспечиваемых осцилляцией тока, подаваемого в обмотку ЭМ. Это означает, что к току управления, который формируется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ), добавляется гармонический сигнал с небольшой частотой и амплитудой.

В контроллере производства ОАО «Измеритель», который использован в МСАУ ГМП, частота ШИМ составляет 1000 Гц. Она значительно выше собственной частоты колебаний подвижных деталей МУФ, поэтому колебания тока с этой частотой почти не вызывают перемещений подвижных элементов. Но в контроллере предусмотрена возможность создания осцилляции тока на нескольких фиксированных частотах, а именно на частотах 66, 100, 166, 200 и 250 Гц. Амплитуда осцилляции задаётся в битах в диапазоне от 0 до 80, при этом 1 бит соответствует 2,5 мА.

На рис. 8 приведены графики,



отображающие характер изменения тока, подаваемого в обмотку электромагнита без осцилляции (схема *a*) и с осцилляцией (схема *б*).

Проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния параметров осцилляции тока на величину

гистерезиса статической характеристики механизма управления фрикционным. Варьировались различные сочетания параметров осцилляции и вычислялось соответствующее им значение гистерезиса. На рис. 9 представлены результаты этих исследований.

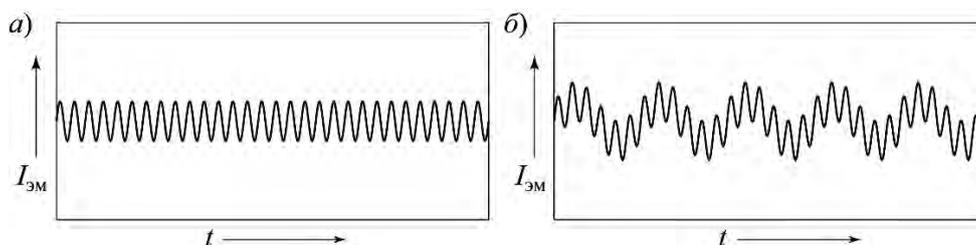


Рис. 8. Схемы управляющего сигнала без осцилляции (*a*) и с осцилляцией (*б*)

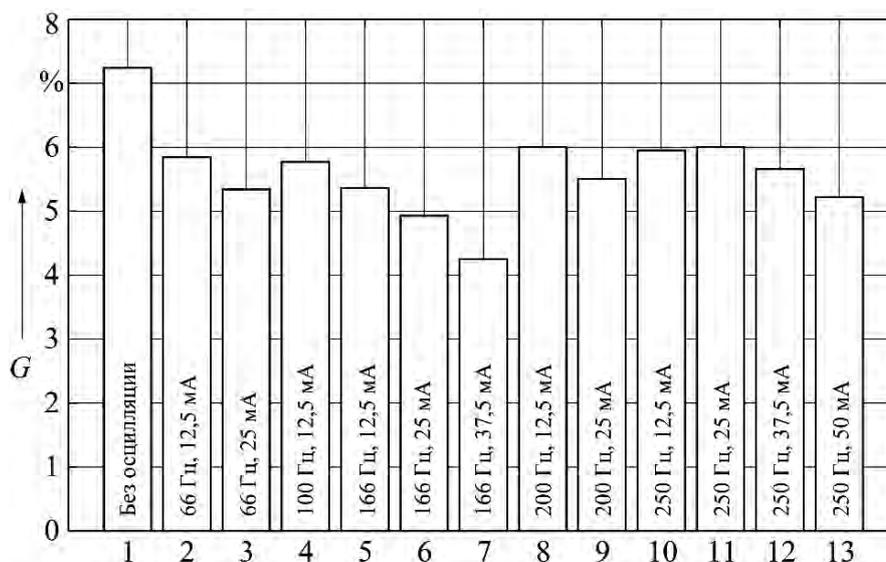


Рис. 9. Результаты исследований по выбору параметров осцилляции управляющего сигнала

Установлено, что при неудачно выбранных сочетаниях параметров могут возникать колебания регулируемого давления рабочей жидкости на выходах регулятора давления и регулятора-распределителя вследствие увеличения амплитуды тока в обмотке электромагнита. Такие результаты отбраковывались и на рис. 9 не представлены. Пример подобного процесса отображен

на рис. 10. Процесс регулирования давления $p_{вых}$ в этом случае неудовлетворителен и не отвечает требованиям, предъявляемым к МУФ. Управление процессом переключения передач при этом неустойчиво и может приводить к повреждению фрикционов.

Из рис. 9 следует, что при управлении без осцилляции величина гистерезиса характеристики давления состав-



ляет 7,24 %. При использовании осцилляции гистерезис снижается. Минимальное его значение получено при частоте 166 Гц и амплитуде 37,5 мА и составляет 4,25 %. Статическая характеристика при этих параметрах приведена

на рис. 11, б. Получена практически линейная характеристика на всём интервале изменения тока в обмотке электромагнита. На рис. 11, а представлена статическая характеристика этого же МУФ при управлении без осцилляции.

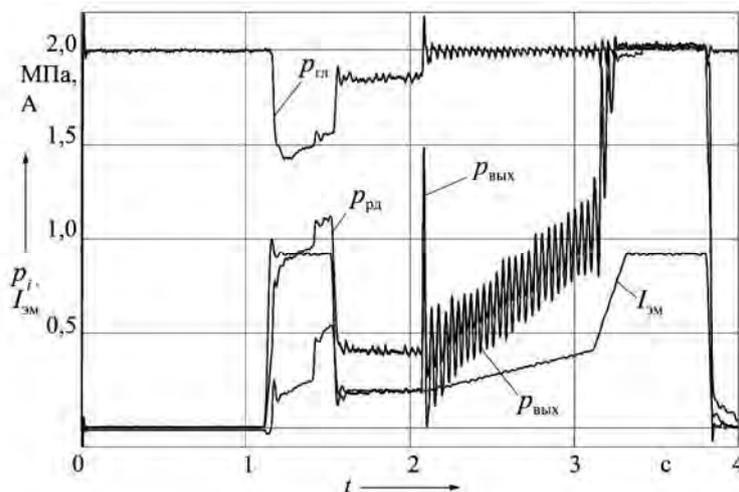


Рис. 10. Процесс включения ГЦ при управлении с частотой осцилляции 66 Гц и амплитудой 50 мА

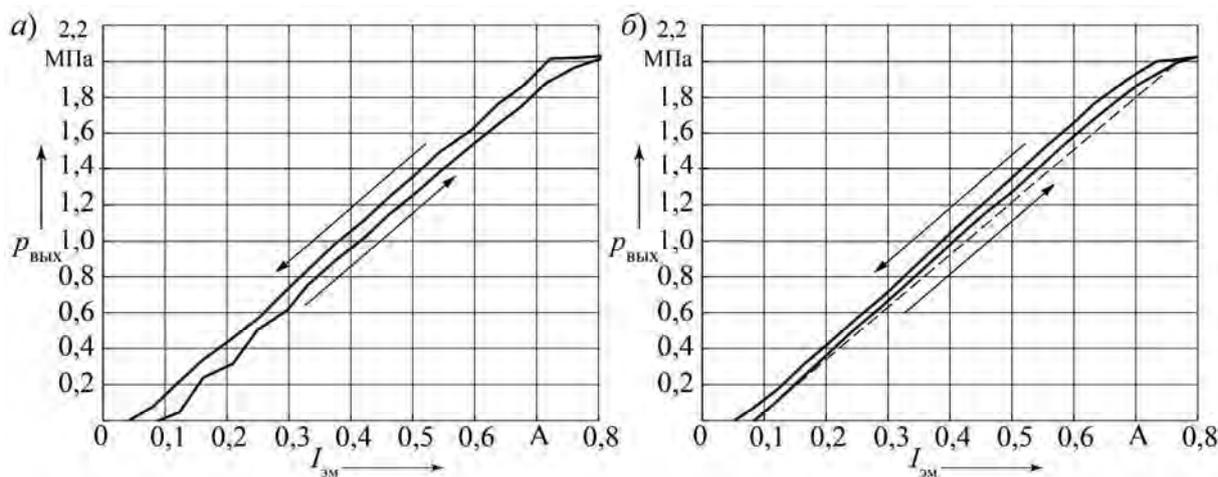


Рис. 11. Статическая характеристика механизма управления фрикционом: а – управление без осцилляции; б – управление с частотой осцилляции 166 Гц и амплитудой 37,5 мА

Производители указывают, что для ЭГПК HydraForce TS98-T34 и Thomas Magnete PPCP09-HFPPRV-V2 гистерезис не превышает 5 %, а для ЭГПК Comatrol XRP 044 максимальный гистерезис составляет 6 %.

На рис. 12 приведены графики

процесса включения ГЦ при управлении с частотой осцилляции 166 Гц и амплитудой 37,5 мА. Можно отметить, что переходный процесс является устойчивым и затухающим. На этапе регулирования характеристика изменения давления линейная. Таким образом, рацио-



нальный выбор параметров осцилляции тока управления позволяет существенно снизить гистерезис статической харак-

теристики МУФ и при этом не вызывает появления колебаний давления при управлении фрикционом.

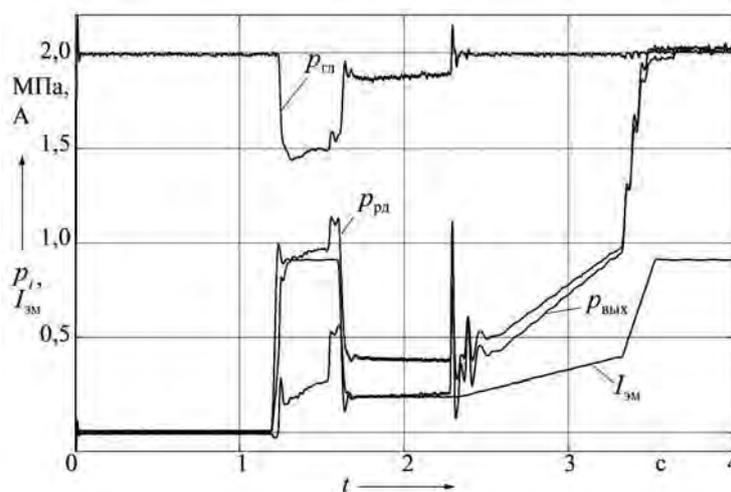


Рис. 12. Процесс включения ГЦ при управлении с частотой осцилляции 166 Гц и амплитудой 37,5 мА

Для систем автоматического управления важным свойством исполнительных механизмов является линейность их характеристик. Это упрощает алгоритмы управления и повышает качество процессов функционирования системы.

Сравним линейность статической характеристики разработанного МУФ с пропорциональными клапанами иностранного производства Somatrol XRP 044, HydraForce TS98-T34 и Thomas Magnete PPCP09-HFPPRV-V2. На рис. 13 приведены статические характеристики данных клапанов, которые получены из каталогов продукции. Для клапана Somatrol XRP 044 существуют два варианта катушек электромагнита, в результате чего у клапана возможны две статические характеристики, отличающиеся диапазоном регулирования давления и тока. На рис. 13, а они отмечены числами «20» и «25», что соответствует максимальному поддерживаемому давлению. Для оценки линейности на статических характеристиках данных клапанов, а также разработанного МУФ (рис. 11, б) были нанесе-

ны прямые штриховые линии, соединяющие минимальные и максимальные значения давления, поддерживаемого клапанами.

Отклонение от линейности вычислялось по формуле

$$N = \frac{\max(\Delta p)}{P_{\max}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где N – величина нелинейности; $\max(\Delta p)$ – максимальная ширина петли, образованной штриховой линией и статической характеристикой, Па; P_{\max} – максимальное давление, поддерживаемое клапаном, Па.

Результаты вычислений N приведены в табл. 2. В последнем столбце таблицы приведена величина $N/N_{\text{МУФ}}$, которая представляет собой отношение нелинейности клапана к нелинейности разработанного МУФ. Согласно приведенным результатам, статическая характеристика разработанного МУФ практически линейна. Величина её нелинейности



в 2 раза меньше, чем нелинейность Comatrol XRP 044 (вариант «20»), и почти в 4 раза меньше этого по-

казателя клапана Thomas Magne-
te PPCP09-HFPPRV-V2.

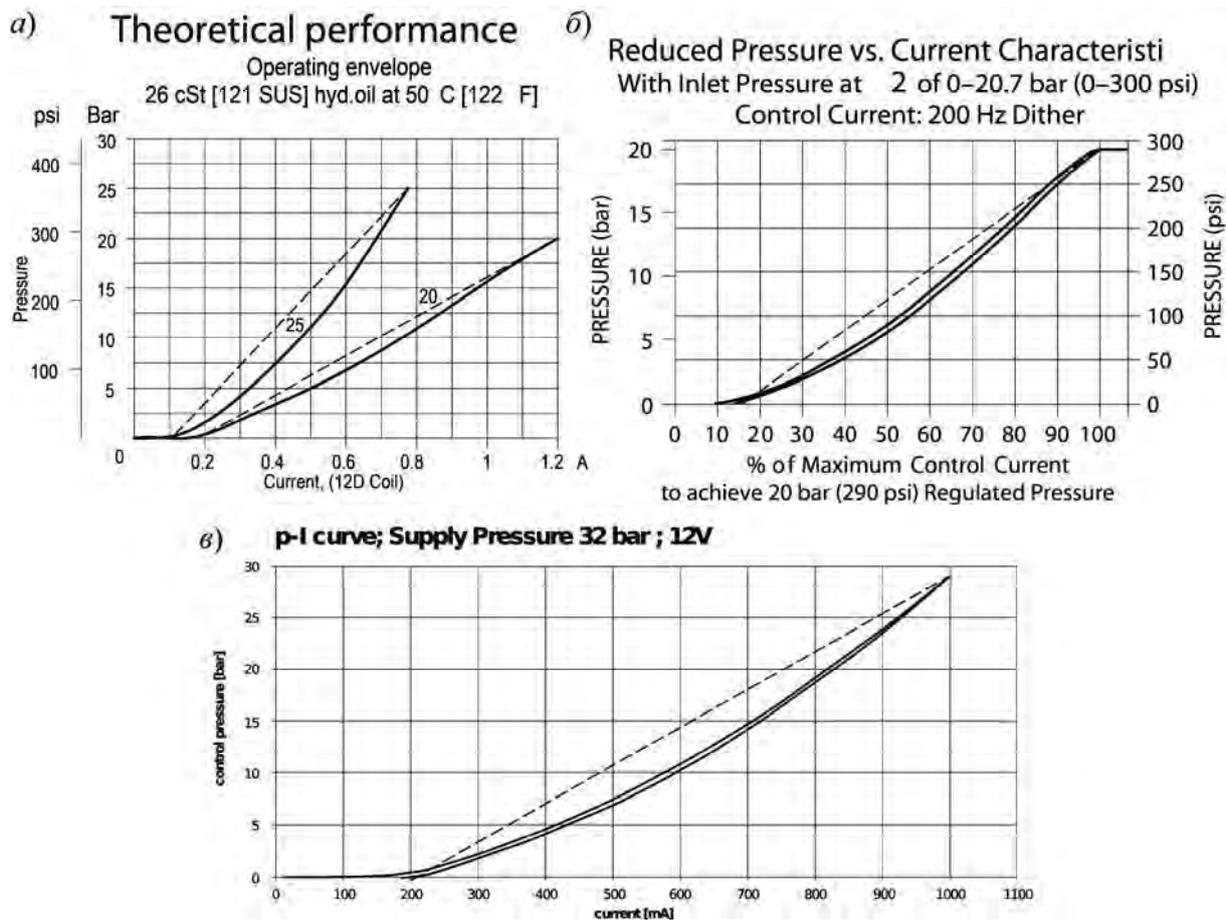


Рис. 13. Статические характеристики ЭГПК: а – Comatrol XRP 044; б – HydraForce TS98-T34; в – Thomas Magne-
nete PPCP09-HFPPRV-V2

Табл. 2. Результаты анализа нелинейности статических характеристик

Клапан	N , %	$N / N_{\text{МУФ}}$
Разработанный МУФ	3,8	1
Comatrol XRP 044 (вариант «20»)	7,5	1,97
Comatrol XRP 044 (вариант «25»)	13,3	3,5
HydraForce TS98-T34	12,9	3,39
Thomas Magne- te PPCP09-HFPPRV-V2	14,6	3,84



Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что разработанная конструкция механизма управления фрикционными полностью отвечает современным требованиям, предъявляемым к исполнительным механизмам системы автоматического управления переключением передач, и может быть

использована в МСАУ ГМП карьерной техники производства ОАО «БелАЗ».

Самосвал БелАЗ-7555Е, укомплектованный созданными МУФ, проходит производственные испытания в карьере РУП «Гранит», г. Микашевичи, Брестская область.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ / В. П. Тарасик [и др.] // Грузовик. – 2011. – № 2. – С. 2–11.
2. Мехатронная система автоматического управления ГМП карьерного самосвала / В. П. Тарасик [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 12–15.
3. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей мобильных машин / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, Р. В. Плякин, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 2 (47). – С. 68–80.
4. **Kato, Yoshiaki.** Advanced Component Technology of Automatic Transmission with Electro-hydraulic Controls / Yoshiaki Kato // J. Soc. Automot. Eng. Jap. – 1989. – № 8. – P. 26–30.
5. Komatsu Rigid Dump Trucks HD465-7 Shop Manual [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ru.scribd.com/doc/206952837/HD465-7-Shop-Manual-SN-7001-Up>. – Date of access: 25.02.2017.
6. Electro-Hydraulic Control Solutions for Wheel Loaders [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.hydraforce.com/Literature/Solution_Brochures/English/WheelLoader_Solutions_Manual.pdf. – Date of access: 25.02.2017.
7. **Кириллов, А. А.** Электронное управление на тракторах / А. А. Кириллов // Строительные и дорожные машины. – 2011. – № 3. – С. 33–35.
8. **Башта, Т. М.** Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – Москва: Машиностроение, 1972. – 320 с.

Статья сдана в редакцию 23 сентября 2019 года

Виктор Сергеевич Савицкий, инженер-конструктор, ОДО «СТРИМ». Тел.: 8-033-627-04-87, 8-044-799-00-06.

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-45.

Viktor Sergeevich Savitsky, design engineer, ALC STRIM. Tel.: 8-033-627-04-87, 8-044-799-00-06.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-25-36-45.

