

УДК 629.113

Н. Н. Горбатенко, В. П. Тарасик

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РЕДУКЦИОННОГО КЛАПАНА С ЭЛЕКТРОННЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ**

UDC 629.113

N. N. Gorbatenko, V. P. Tarasik

**THE EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS
OF ELECTRONICALLY-CONTROLLED PROPORTIONAL REDUCING VALVE**

Аннотация

Представлены результаты исследования статических и переходных характеристик пропорционального редукционного клапана с электронным управлением, описание экспериментальной установки, методика проведения экспериментов, результаты испытаний, анализ влияния осцилляции тока управления на параметры функциональных свойств пропорционального клапана, структура и параметры математической модели клапана.

Ключевые слова:

редукционный клапан, пропорциональный электромагнит, электронный блок управления, осцилляция тока управления, гистерезис, время запаздывания, передаточная функция.

Abstract

The results of investigating static and transient characteristics of an electronically-controlled proportional reducing valve are given in this paper; the experimental setup is described; the techniques of performing the experiments and tests results are presented; the analysis of the influence of control current oscillation on the parameters of functional properties of the proportional valve is performed; the structure and parameters of the mathematical model of the valve are determined.

Key words:

reducing valve, proportional electromagnet, electronic control unit, oscillation of the control current, hysteresis, time delay, the transfer function.

Введение

Пропорциональные редукционные клапаны являются устройствами, осуществляющими линейное преобразование электрического сигнала, получаемого от электронного блока управления (ЭБУ), в давление в отводимом потоке рабочей жидкости. Такие клапаны широко применяются в различных областях техники при создании систем дистанционного регулирования давления в гидравлических аппаратах и контурах при помощи электрических сигналов.

Сотрудниками кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета разработан электрогидравлический исполнительный механизм управления фрикционом гидромеханической передачи, предназначенный для применения в карьерных самосвалах БелАЗ [1, 2]. Он изготовлен по схеме двухкаскадного трехлинейного регулятора давления золотникового типа, его основными составными частями являются пилотный и главный клапаны регулирования давления. В этом механизме

функцию пилотного каскада выполняет пропорциональный редукционный клапан серии FTDRE 2K, изготавливаемый группой компаний «Бош Рэксрот» (Bosch Rexroth AG) [3]. Клапан характеризуется малыми габаритными размерами, небольшим расходом масла, требуемым для управления, и рекомендуется для использования в гидросистемах мобильных машин.

Качество процесса регулирования давления, обеспечиваемое спроектированным электрогидравлическим механизмом, в значительной степени определяется функциональными свойствами пропорционального клапана, которые принято оценивать рядом показателей. Главные из них – время запаздывания, зона нечувствительности, диапазон регулирования давления, коэффициент передачи клапана, гистерезис, степень линейности статической характеристики. Эти показатели необходимы для расчёта и выбора конструктивных параметров дросселирующего золотника главного клапана, настройки электронного блока управления, а также для построения математической модели электрогидравлического механизма. Как правило, показатели функциональных свойств определяют на основе анализа статической и переходной характеристик клапана, получаемых экспериментальным методом как наиболее достоверным.

Авторами проведено экспериментальное исследование установившихся и переходных режимов работы клапана FTDRE 2K. Цель исследования – определение статической и переходной характеристик клапана; оценка влияния осцилляции тока управления на функциональные свойства клапана; выявление эффективных приёмов управления клапаном, позволяющих с высоким быстродействием и точностью формировать необходимые характеристики регулирования давления. Кроме того, ставилась задача идентификации структуры и параметров математической модели пропорционального клапана на основе анализа его переходных характеристик.

Устройство и работа пропорционального редукционного клапана

Пропорциональный редукционный клапан (рис. 1) состоит из пропорционального электромагнита 2 и трехлинейного редукционного клапана с дросселирующим золотником 1, прижатым пружиной 3 к якорю электромагнита. Управление клапаном осуществляется с помощью программируемого электронного блока посредством так называемого ШИМа – регулятора силы тока, работающего на принципе широтно-импульсной модуляции. Максимальный ток управления клапаном составляет 800 мА.

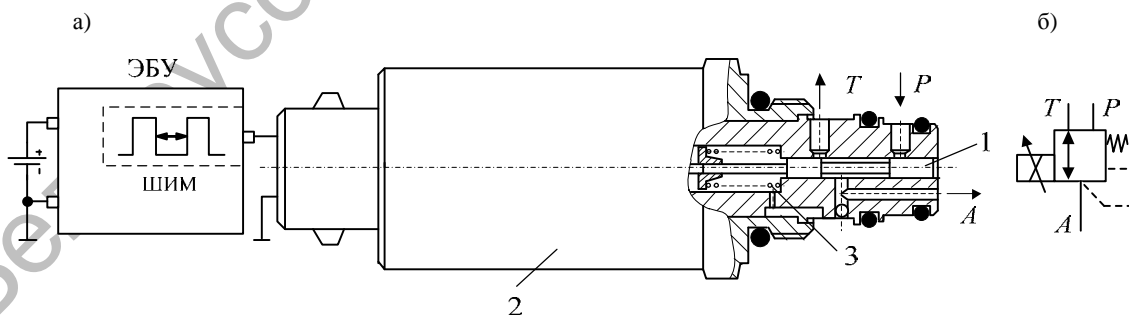


Рис. 1. Пропорциональный редукционный клапан серии FTDRE 2K: а – конструктивная схема; б – условное графическое обозначение

Ток управления, создаваемый электронным блоком, преобразуется электромагнитом в механическое перемещение якоря, а следовательно, и золотника. При этом сила тяги якоря и его перемещение всегда пропорциональны силе тока, протекающего по катушке электромагнита. Вызвано это тем, что тяговая характеристика u пропорционального электромагнита линейна по току и не зависит от величины хода якоря.

В корпусе гидроклапана выполнены два радиальных канала, один из которых соединен с источником давления питания P , а второй – с гидробаком T . Каналы вместе с поясками золотника образуют два дросселирующих окна переменного проходного сечения, площади которых одновременно меняются при перемещении золотника якорем электромагнита.

В обесточенном состоянии электромагнита пружина удерживает золотник относительно корпуса в положении, при котором выходной канал A клапана соединен с гидробаком T , а канал P перекрыт пояском золотника. При подаче тока управления постоянного уровня на обмотку электромагнита золотник перемещается в некоторое равновесное состояние, когда сила тяги, развиваемая якорем, уравновешивается усилием возвратной пружины и силой давления жидкости, действующей на золотник со стороны выходного канала. Из уравнения баланса сил на золотнике можно получить, что

$$p_{\text{пк}} = \frac{k_{\text{т}} i_{\text{эм}} - F_{\text{пр}}}{A_{\text{пз}}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{пк}}$ – давление на выходе пропорционального клапана; $i_{\text{эм}}$ – сила тока в катушке электромагнита; $k_{\text{т}}$ – коэффициент пропорциональности между током и силой тяги якоря; $F_{\text{пр}}$ – усилие отжимной пружины; $A_{\text{пз}}$ – площадь золотника.

Анализ уравнения (1) показывает, что давление, создаваемое пропорциональным клапаном, однозначно определяется силой тока, протекающего в катушке электромагнита, и что зависимость $p_{\text{пк}} = f(i_{\text{эм}})$ является линейной.

Если по каким-либо причинам давление на выходе клапана превысит значение, установленное током управления, то баланс сил на золотнике нарушается, и последний перемещается влево, соединяя канал A с гидробаком, что приводит к падению давления и восстановлению баланса сил на золотнике. В результате на выходе клапана снова установится давление, соответствующее заданному току управления.

Описание экспериментальной установки

Для исследования характеристик клапана была собрана экспериментальная установка (рис. 2), состоящая из гидравлического источника энергии, пропорционального редукционного клапана (ПРК), электронного блока управления, комплекта датчиков, системы сбора и отображения сигналов датчиков.

Источник гидравлической энергии, основу которого составляет шестеренный насос, приводимый в действие электродвигателем, обеспечивал подачу масла к пропорциональному клапану с максимальным расходом 40 л/мин и давлением 2500 кПа через фильтр (Φ) с номинальной толщиной фильтрации 10 мкм. Требуемый уровень давления в напорной линии насоса устанавливался вручную путём регулирования преднатяга пружины переливного клапана (ПК) и контролировался манометром (МН). Бак насосной установки был заполнен маслом марки МГЕ 46В. Температура масла в баке регистрировалась термометром (Т). Поток масла, создаваемый (ПК), подавался в замкнутую гидравлическую полость объёмом 0,7436 см³.

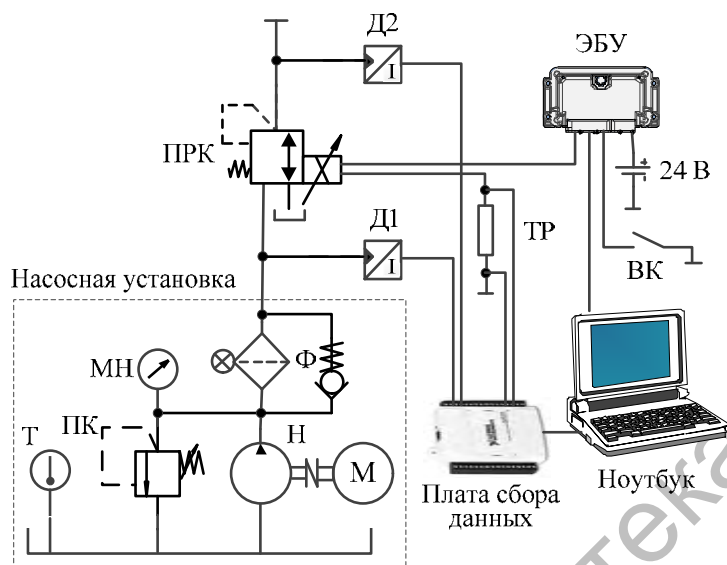


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик пропорционального клапана серии FTDRE 2K

Экспериментальная установка оснащена двумя датчиками давления Д1 и Д2 (марки ИД-И-2,5-1-3-Д компании «Поинт», Беларусь) с токовым унифицированным выходным сигналом 4...20 мА. Один из датчиков установлен на входе, а второй – на выходе пропорционального клапана. Диапазон измерения давления датчиков 0...2500 кПа, предел допускаемой основной погрешности измерения $\pm 0,5\%$. Измерение тока в катушке электромагнита осуществлялось посредством токоизмерительного резистора (ТР) сопротивлением 1 Ом. Сила тока в катушке электромагнита определялась как падение напряжения на этом резисторе. Выключатель (ВК) служит для управления состоянием пропорционального клапана.

Выходные сигналы датчиков регистрировались с помощью USB-устройства сбора данных серии 6009 компании «Нэйшонал Инструментс» (National Instruments). В программном продукте LabVIEW был создан виртуальный прибор, позволяющий конфигурировать устройство сбора данных, считывать выходные сигналы датчиков с частотой 10 кГц, осуществлять их фильтрацию, отображать на экране но-

утбука и записывать в текстовый файл с целью последующей обработки. Для фильтрации высокочастотных составляющих выходных сигналов датчиков давления использовался фильтр Батерворда третьего порядка с частотой среза 30 Гц, а для фильтрации выходного сигнала токоизмерительного резистора – фильтр Батерворда четвертого порядка с частотой среза 100 Гц.

В качестве управляющего устройства пропорционального клапана применялся программируемый ЭБУ серии RC2/2-21 компании «Бош Рэксорт» (Bosch Rexroth AG), имеющий определенный набор входов и выходов для подключения датчиков и пропорциональных клапанов. ЭБУ обрабатывал информацию со входов и создавал электрический сигнал управления на ШИМ-выходе. Несущая частота работы ШИМа составляла 1 кГц.

Программирование электронного блока выполнялось в среде BODAS-design, предназначенной для написания, компиляции и отладки управляющих программ контроллеров серии RC с использованием языков программирования, специфицированных в международном стандарте МЭК 61131-3. Загрузка программы из среды BODAS-design в

память ЭБУ производилась через последовательный интерфейс RS-232. Время одного цикла работы контроллера составляло 0,01 с.

Методика проведения эксперимента

В ходе испытаний регистрировались статические и переходные характеристики клапана.

Статическая характеристика представляет собой зависимость давления на выходе клапана от тока управления при установившемся режиме работы клапана. Точки для её построения определялись на основе анализа характеристики функционирования клапана, полученной при подаче на электромагнит тока управления, ступенчато изменяющегося от 0 до 800 мА и, наоборот, от 800 до 0 мА с шагом 50 мА (рис. 3, а). Для того чтобы клапан после каждого

ступенчатого изменения тока управления успевал достигнуть установившегося состояния, продолжительность каждой ступеньки принималась равной 1 с.

Переходная характеристика является откликом клапана на ступенчатый сигнал управления. Для её получения на вход клапана непрерывно подавались прямоугольные импульсы тока длительностью 1 с (рис. 3, б). Амплитуда импульсов тока варьировалась от 300 до 800 мА с шагом 100 мА.

Также определялась переходная характеристика, отражающая реакцию клапана на кусочно-линейный сигнал управления, свойственный применению клапана в составе электрогидравлического исполнительного механизма. Для получения этой характеристики использовался командный сигнал управления, представленный на рис. 3, в.

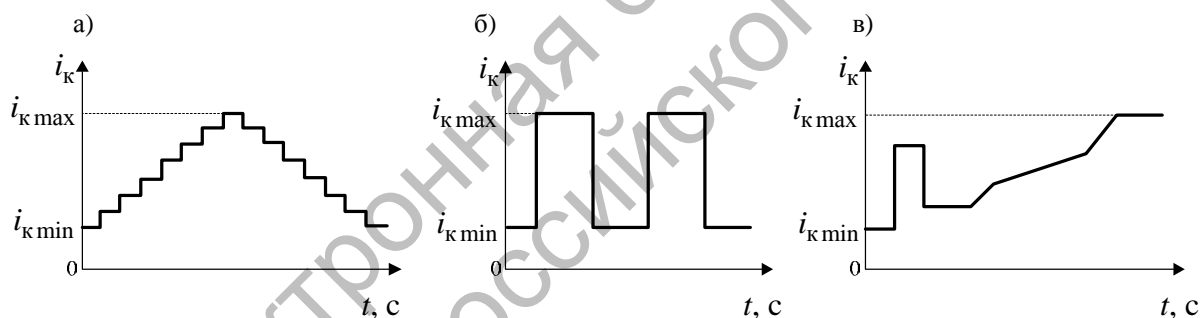


Рис. 3. Характеристики командных сигналов управления клапаном: а – непрерывный ступенчатый сигнал; б – прямоугольные импульсы; в – кусочно-линейный сигнал

Чтобы улучшить функциональные свойства клапана на ток управления, формируемый ШИМом, дополнительно накладывался периодический сигнал тока треугольной формы, амплитуду и частоту которого можно задавать при программировании ЭБУ RC2/2-21. Это делается для того, чтобы золотник клапана осциллировал, т. е. колебался в заданной позиции с малой амплитудой и большой частотой. В таком состоянии между золотником и корпусом начинают действовать силы трения скольжения, значительно меньшие, чем силы

трения покоя, что повышает чувствительность золотника к управляющим сигналам и улучшает стабильность его работы [4].

С целью оценки влияния осцилляции на функциональные свойства клапана регистрация статической и переходной характеристик производилась для двух вариантов управления клапаном: с осцилляцией и без осцилляции тока управления. Частота осцилляций тока в катушке электромагнита устанавливалась равной 166 Гц, а амплитуда – 100 мА.

Во время экспериментов переливной клапан насосной установки был настроен на главное давление $p_{гд} = 1300$ кПа, температура масла в гидробаке поддерживалась равной (40 ± 5) °С, каждый опыт проводился не менее 3 раз.

Результаты эксперимента и их анализ

На рис. 4 показаны графики изменения тока $i_{эм}$ в катушке электромагнита, главного давления $p_{гд}$ и давления $p_{пк}$ на выходе клапана при воздействии на него непрерывно изменяющегося ступенчатого сигнала управления (см. рис. 3, а). Как видно на графиках, при каждом ступенчатом изменении тока управления нарушалось равновесное состояние клапана, он совершал переходный процесс, по завершении которого давление на выходе клапана стабилизировалось возле некоторого нового значения. В результате обработки полученных осциллограмм были построены статические характеристики клапана, приведенные на рис. 5. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

– рабочий диапазон регулирования давления клапана составляет от 0 до 1285 кПа при изменении тока управле-

ния в интервале от 200 до 650 мА;

– диапазон регулирования давления ограничивается давлением питания клапана. При токе управления электромагнитом от 650 до 800 мА статические характеристики имеют зону насыщения. Это обусловлено тем, что в указанном интервале сила тяги якоря электромагнита превышает силу давления жидкости, действующую на золотник со стороны выходного канала клапана. В результате он занимает положение, когда канал слива перекрыт пояском золотника, а выход клапана напрямую соединен с входом;

– клапан имеет зону нечувствительности, обусловленную положительным перекрытием золотника и канала, связанного с источником давления питания. Пороговое значение силы тока, соответствующее включению клапана в работу, равно 200 мА. В интервале изменения тока от 0 до 200 мА давление на выходе клапана близко к нулю;

– в рабочем диапазоне регулирования давления статическая характеристика клапана является почти линейной с узкой петлей гистерезиса, вызванной трением и зазорами в электромагнитном и гидравлическом элементах клапана.

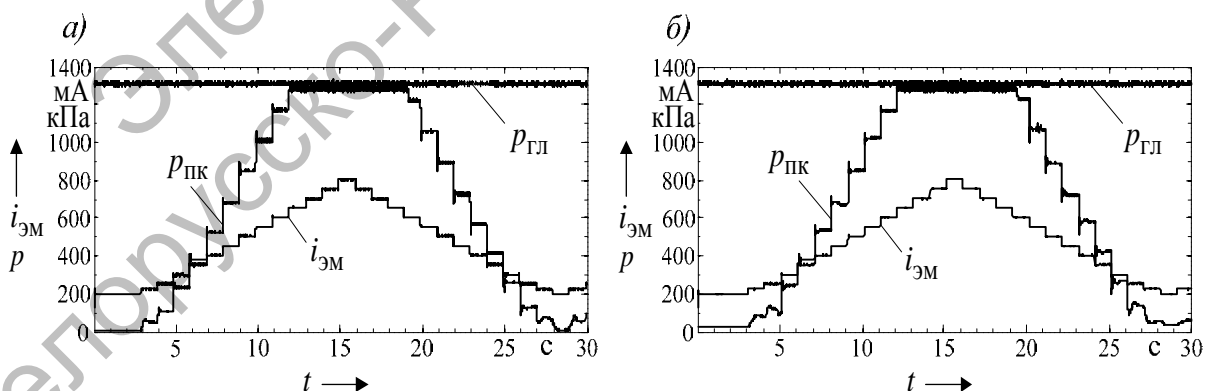


Рис. 4. Характеристики процесса функционирования пропорционального клапана при подаче на электромагнит непрерывного ступенчатого сигнала управления: а – с осциллирующей током управления; б – без осцилляции тока управления

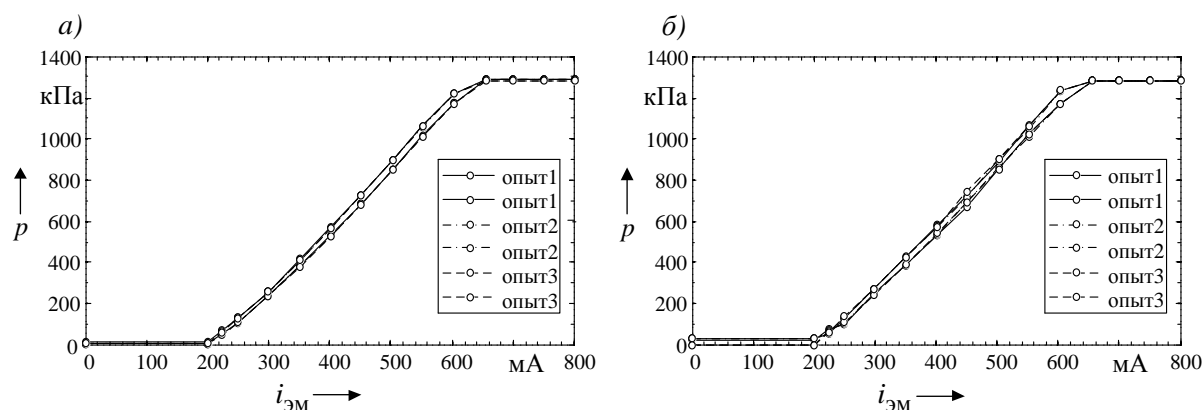


Рис. 5. Статические характеристики пропорционального клапана: а – с осциллирующей тока управления; б – без осцилляции тока управления

Гистерезис определяется делением максимальной разности давления, развиваемого клапаном, при одинаковом значении тока управления на рабочий диапазон регулирования давления. Для случая управления с осцилляцией тока гистерезис статической характеристики равен 3,68 %, а при управлении без осцилляции – 5,33 %.

Введение осцилляции, кроме уменьшения ширины гистерезисной петли, обеспечивает высокую степень повторяемости статических характеристик клапана от одного опыта к другому, повышает точность регулирования давления на установившихся режимах работы клапана. Из сравнения графиков, показанных на рис. 5, следует, что при осцилляции тока управления статические характеристики клапана остаются неизменными в трёх выполненных подряд опытах, а в случае управления без осцилляции они меняются от одного опыта к другому. После завершения переходного процесса давление на выходе клапана при управлении с осцилляцией всегда было постоянным (см. рис. 4, а), а без осцилляции (см. рис. 4, б) оно иногда медленно снижалось (периоды времени 4...5 и 8...9 с) или повышалось (период времени 5...6 с), могли наблюдаться высокочастотные колебания малой амплитуды (период времени 20...21 с).

Из рис. 4 и 5 также видно, что при токе управления 200 мА без осцилляции невозможно обеспечить нулевой уровень давления на выходе клапана.

На рис. 6 показано, как изменяются главное давление $p_{гд}$, давление на выходе клапана $p_{пк}$ и нефильтрованный ток $i_{эм}$ в катушке электромагнита во время переходного процесса при обработке клапаном непрерывной последовательности прямоугольных импульсов командного сигнала i_k от начального значения i_{kmin} до максимального значения $i_{kmax} = 500$ мА.

Графики (см. рис. 6) дают представление об особенностях процесса регулирования тока в катушке электромагнита пропорционального клапана. При регулировании без осцилляции (см. рис. 6, а) изменение тока носит пилообразный характер, период следования импульсов тока $T_{шм}$, формируемых ШИМом, составляет 0,001 с. При управлении с осцилляцией на ток, создаваемый ШИМом, дополнительно накладывается сигнал тока треугольной формы с периодом следования $T_{ос} = 0,006$ с. Благодаря этому золотник клапана совершает высокочастотные колебания с небольшой амплитудой вокруг некоторого среднего положения, определяемого командным сигналом.

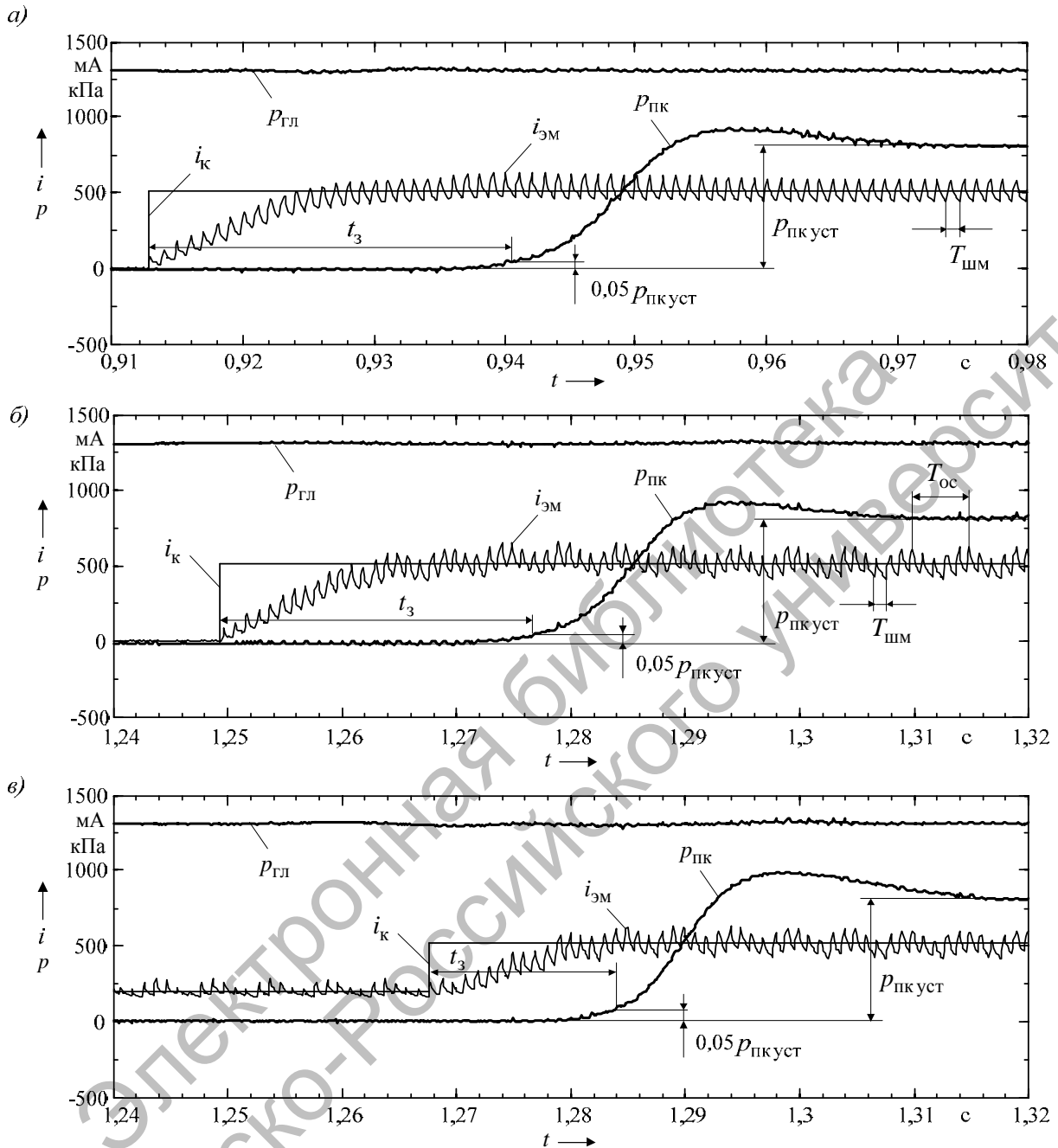


Рис. 6. Переходные характеристики пропорционального клапана при подаче на электромагнит тока управления 500 мА: а – без осцилляции при $i_{к\ min} = 0$ мА; б – с осцилляцией при $i_{к\ min} = 0$ мА; в – с осцилляцией при $i_{к\ min} = 200$ мА

На графиках (см. рис. 6) видно, что процесс изменения давления на выходе пропорционального клапана характеризуется запаздыванием – интервалом времени t_3 между моментом изменения ко-

мандного сигнала i_k и началом подъема давления $p_{ПК}$. При обработке осциллограмм за точку начала подъема давления принималось значение, равное 5 % от установившегося давления $p_{ПК\ уст}$.

В ходе испытаний было исследовано влияние осцилляции тока управле-

ния на задержку срабатывания клапана. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Задержка срабатывания клапана при $i_{к\ min} = 200$ мА

Параметры сигнала управления		Задержка срабатывания клапана t_3 , с	
$i_{к\ min}$, мА	$i_{к\ max}$, мА	с осцилляцией	без осцилляции
200	300	0,0153	0,0181
200	400	0,0151	0,0152
200	500	0,0148	0,0132
200	600	0,0122	0,0133
200	700	0,0135	0,0132
200	800	0,0133	0,0131

Табл. 2. Задержка срабатывания клапана при $i_{к\ min} = 0$ мА

Параметры сигнала управления		Задержка срабатывания клапана t_3 , с	
$i_{к\ min}$, мА	$i_{к\ max}$, мА	с осцилляцией	без осцилляции
0	300	0,0491	0,0525
0	400	0,0329	0,0336
0	500	0,0274	0,0274
0	600	0,0251	0,0254
0	700	0,0232	0,0239
0	800	0,0226	0,0232

Анализ данных, содержащихся в таблицах, позволяет сделать вывод о том, что на задержку срабатывания клапана осцилляция тока почти не влияет. Задержка срабатывания определяется значением начального уровня сигнала управления $i_{к\ min}$. Если в выключенном состоянии клапана (при нулевом давлении на выходе) на катушке электромагнита постоянно поддерживать ток $i_{эм} = 200$ мА, то можно уменьшить время срабатывания клапана в 1,71...3,21 раза при управлении с осцилляцией тока и в 1,77...2,89 раза при управлении без осцилляции по сравнению с вариантами управления, когда подъём тока осуществлялся с нулевого уровня. Это обусловлено тем,

что при подаче на электромагнит тока управления $i_{к\ min} = 200$ мА устраняется положительное перекрытие золотника с напорным каналом.

На рис. 7 показан процесс функционирования пропорционального клапана при подаче на его вход кусочно-линейного сигнала управления. Видно, что давление, создаваемое клапаном, меняется прямо пропорционально сигналу управления с высокой точностью и быстродействием.

Идентификация структуры и параметров математической модели клапана

Для идентификации структуры и параметров математической модели

клапана использовался метод передаточных функций [5]. Сущность метода заключается в выборе такой структуры передаточной функции, чтобы постро-

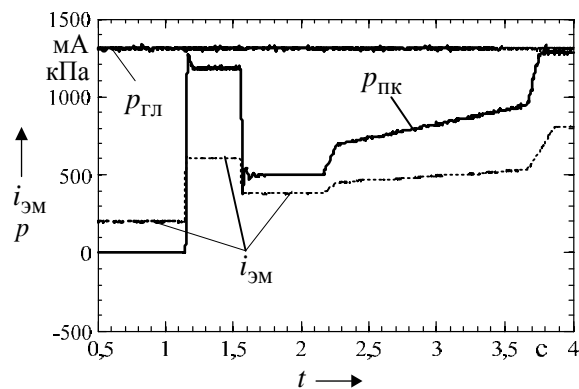


Рис. 7. Характеристики функционирования клапана при кусочно-линейном сигнале управления

На рис. 8 изображена переходная характеристика клапана при ступенчатом изменении командного тока i_k от 0 до 500 мА. Видно, что подъём давления $p_{ПК}$ на выходе клапана начался с временной задержкой $\tau = 0,0132$ с после подачи командного сигнала, а давление в переходном процессе совершает затухающие колебания. Исходя из данных предпосылок, передаточную функцию пропорционального клапана можно представить в виде произведения двух динамических звеньев – колебательного звена и звена запаздывания:

$$W(s) = \frac{p_{ПК}(s)}{i_k(s)} = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (2)$$

где $W(s)$ – передаточная функция клапана; $p_{ПК}(s)$ – изображение по Лапласу давления на выходе клапана; $i_k(s)$ – изображение по Лапласу командного сигнала; s – переменная Лапласа; k – коэффициент передачи клапана; T – постоянная времени клапана; ξ – коэффициент относительного демпфирования клапана; τ – задержка срабатыва-

ющая с её использованием переходная характеристика клапана как можно точнее совпадала с экспериментальными данными.

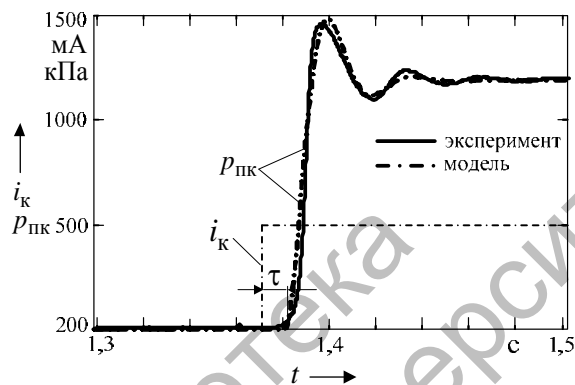


Рис. 8. Переходная характеристика клапана

ния клапана.

Определение параметров передаточной функции проводилось в среде Matlab с помощью пакета программ ident, предназначенного для построения математических моделей динамических систем на основе результатов измерения их входных и выходных сигналов. Получены следующие значения параметров модели: $k = 1,9824 \cdot 10^6$ Па/А; $T = 0,0053867$ с; $\xi = 0,40562$. Переходная характеристика пропорционального клапана, построенная с помощью передаточной функции, совпадает с экспериментальными данными (см. рис. 8), следовательно, предложенная модель адекватно описывает реальный процесс функционирования клапана при заданном управляющем воздействии.

Заключение

В ходе работы выполнено следующее.

1. Создан стенд для исследования характеристик пропорциональных редукционных клапанов, состоящий из гидравлического источника энергии,

электронного блока управления, комплекта датчиков, системы сбора и отображения сигналов датчиков.

2. Определены статические и переходные характеристики пропорционального клапана серии FTDRE 2K в широком диапазоне управляющих воздействий. Установлено, что:

– рабочий диапазон регулирования давления клапана составляет от 0 до 1285 кПа при изменении тока управления в интервале от 200 до 650 мА;

– диапазон регулирования давления ограничивается давлением питания клапана. При токе управления электромагнитом от 650 до 800 мА статические характеристики имеют зону насыщения, обусловленную положительным перекрытием золотника и канала, связанного с источником давления питания;

– пороговое значение силы тока, соответствующее включению кла-

пана в работу, равно 200 мА. В интервале изменения тока от 0 до 200 мА давление на выходе клапана близко к нулю;

– в рабочем диапазоне регулирования давления статическая характеристика клапана является линейной с узкой петлей гистерезиса.

3. С целью уменьшения времени срабатывания целесообразно в неактивном состоянии клапана, т. е. когда он не регулирует давление, всегда удерживать в катушке ток управления, равный 200 мА.

4. Идентифицирована структура и определены параметры математической модели пропорционального клапана. Установлено, что модель клапана может быть представлена в виде произведения передаточных функций двух звеньев – колебательного звена и звена запаздывания. Предложенная модель адекватно описывает реальный процесс функционирования клапана при заданном управляющем воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ / В. П. Тарасик [и др.] // Грузовик. Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай. – 2011. – № 2. – С. 2–11.
2. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин / Н. Н. Горбатенко [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с. : ил.
3. Proportional pressure reducing valve Type FTDRE 2K [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : // www.boschrexroth.com/mobile-hydraulics-catalog](http://www.boschrexroth.com/mobile-hydraulics-catalog). – Дата доступа : 21.03.2013.
4. Наземцев, А. С. Пневматические приводы и системы. Ч. 2 : Гидравлические приводы и системы / А. С. Наземцев, Д. Е. Рыбальченко. – М. : ФОРУМ, 2007. – 304 с.
5. Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. – М. : Энергия, 1979. – 240 с.

Статья сдана в редакцию 25 марта 2013 года

Николай Николаевич Горбатенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-45.

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

Nikolai Nikolayevich Gorbatenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-25-36-45.

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