

УДК 629.3

Экспериментальные исследования электрогидравлического пропорционального клапана мехатронной системы управления автоматической коробкой передач**Experimental research of electro-hydraulic proportional valve of mechatronic control system of automatic gearbox****В. П. ТАРАСИК, д-р техн. наук
В. С. САВИЦКИЙ, инж.****Белорусско-Российский университет,
Могилев, Республика Беларусь,
avtomobili@bru.by****V. P. TARASIK, DSc in Engineering
V. S. SAVITSKIY, Engineer****Belarusian-Russian University,
Mogilev, Republic of Belarus,
avtomobili@bru.by**

Для управления механизмами автомобилей, тракторов, строительных и дорожных машин широко используются мехатронные системы автоматического управления, один из важнейших компонентов которых — электрогидравлический пропорциональный клапан. Мехатронные системы позволяют реализовать сложные алгоритмы адаптивного управления, обеспечивают высокое качество процессов функционирования управляемых механизмов и существенно повышают эффективность выполнения производственных процессов. Цель работы — экспериментальные исследования характеристик электрогидравлического пропорционального клапана и оптимизация параметров его управления, осуществляемого микропроцессорным контроллером. Такие клапаны применяют в автоматических трансмиссиях для управления переключением передач и рабочими органами. Приведена принципиальная схема созданного клапана и отображено его взаимодействие с механизмами мехатронных систем. Описано функционирование системы в процессе реализации алгоритма ее работы под управлением микропроцессорного контроллера. Изложены результаты экспериментальных исследований электрогидравлического пропорционального клапана и принятые на их основе технические решения, позволившие существенно улучшить показатели эффективности его функционирования. Получены статические и переходные характеристики клапана и его компонентов. Установлено, что вид переходной характеристики пропорционального электромагнита существенно зависит от характеристики источника питания. При использовании источника постоянного напряжения переходная характеристика соответствует аperiodическому звену, а при управлении от контроллера — колебательному. Колебательный характер переходной характеристики обусловлен управляющим воздействием регулятора тока контроллера. Параметры регулятора тока влияют на величину относительного перерегулирования и время запаздывания нарастания тока в обмотке пропорционального электромагнита. Определены оптимальные параметры настройки регулятора тока контроллера управления. Исследовано влияние осцилляции управляющего сигнала контроллера на гистерезис статической характеристики механизма управления. Приведены основные параметры электрогидравлического пропорционального клапана, позволяющие оценить возможность его применения для управления рабочими органами машин.

Ключевые слова: мехатронная система автоматического управления; электрогидравлический пропорциональный клапан; пропорциональный электромагнит; регулятор давления; регулятор-распределитель; микропроцессорный контроллер управления; широтно-импульсный модулятор; пропорционально-интегральный регулятор тока; осцилляция тока управления; гистерезис статической характеристики; переходная характеристика.

To control the mechanisms of automobiles, tractors, building and road machines, the mechatronic automatic control systems are commonly used; one of their most important components is the electro-hydraulic proportional valve. Mechatronic systems allow to implement the sophisticated adaptive control algorithms, provide the high quality of functioning processes of controlled mechanisms and significantly increase the efficiency of production processes. The article deals with the experimental research of characteristics of electro-hydraulic proportional valve and the optimization of parameters of its control implemented by the microprocessor controller. Such valves are applied in automatic transmissions for the control of gear shift and working organs. The key diagram of created valve is given; its interaction with mechanisms of mechatronic systems is shown. The system functioning in implementation process of its work algorithm under control of the microprocessor controller is described. The article describes the results of experimental research of the electro-hydraulic proportional valve and technical solutions that allow to improve significantly its performance. The static and transient responses of the valve and its components are obtained. It is found that the form of transient response of proportional solenoid depends on the power source characteristic. With the use of direct current source, the transient response corresponds to aperiodic link, but with the use of controller, it corresponds to oscillatory one. The oscillatory character of transient response is caused by the control action of current controller. Current controller parameters influence the relative overshoot and the delay time of current rise in the proportional solenoid winding. The optimal parameters of current controller settings are defined. Influence of oscillation of control signal on the hysteresis of static response of control mechanism is investigated. Parameters of electro-hydraulic proportional valve that allow to estimate the possibility of its application for the control of working organs of machines are described.

Keywords: mechatronic automatic control system; electro-hydraulic proportional valve; proportional solenoid; pressure regulator; regulator-distributor; microprocessor controller; pulse-width modulator; proportional-plus-integral controller of current; control current oscillation; hysteresis of static performance; transient response.

Введение

В системах управления механизмами мобильных машин широкое применение находят электрогидравлические пропорциональные клапаны (ЭГПК). Они позволяют реализовать сложные алгоритмы адаптивного управления, обеспечивают высокое качество процессов функционирования управляемых механизмов и существенно повышают эффективность выполнения машинами производственных процессов. Такие клапаны применяют в автоматических трансмиссиях различных машин для управления процессами переключения передач, на строительно-дорожных машинах и с.-х. тракторах — для управления рабочими органами, на гусеничных промышленных тракторах — механизмами поворота [1–5].

Коллектив кафедры автомобилей Белорусско-Российского университета принял участие в выполнении задания Государственной научно-технической программы "Машиностроение" в 2010–2013 гг., в результате чего создан полный комплекс компонентов мехатронной системы управления гидромеханической передачей (ГМП) карьерных самосвалов "БелАЗ". Производство компонентов организовано на предприятии ОАО "Измеритель" (г. Новополоцк, Республика Беларусь). В комплекс входят: микропроцессорный контроллер управления, селектор выбора режимов управления, пропорциональный электромагнит, ЭГПК, система датчиков (частоты вращения валов, давления и температуры рабочей жидкости). Разработаны алгоритмы управления переключением передач и диагностирования механизмов ГМП и программное обеспечение контроллера управления.

Пропорциональные клапаны — важнейшие компоненты современных мехатронных систем автоматического управления (МСАУ). Они представляют собой исполнительные механизмы, реализующие команды

управления, формируемые микропроцессорным контроллером в соответствии с программой алгоритма управления.

На рис. 1, а представлена принципиальная схема ЭГПК и взаимодействующих с ним компонентов МСАУ. В состав ЭГПК входят регулятор давления (РД) и регулятор-распределитель (РР). Регулятор давления состоит из пропорционального электромагнита (ПЭМ) и гидравлического двухлинейного клапана с шаровым запорно-регулирующим органом. Регулятор-распределитель представляет собой трехлинейный гидроклапан с дифференциальным золотниковым запорно-регулирующим органом и гидравлической обратной связью по выходному давлению. Питание ЭГПК осуществляется гидронасосом (Н) с переливным клапаном (ПК). Выходной канал РР соединен с гидроцилиндром (ГЦ) управляемого механизма. Например, в случае автоматической трансмиссии ГЦ принадлежит фрикциону переключения передач. Конструкция ЭГПК приведена в работах [1, 2, 6].

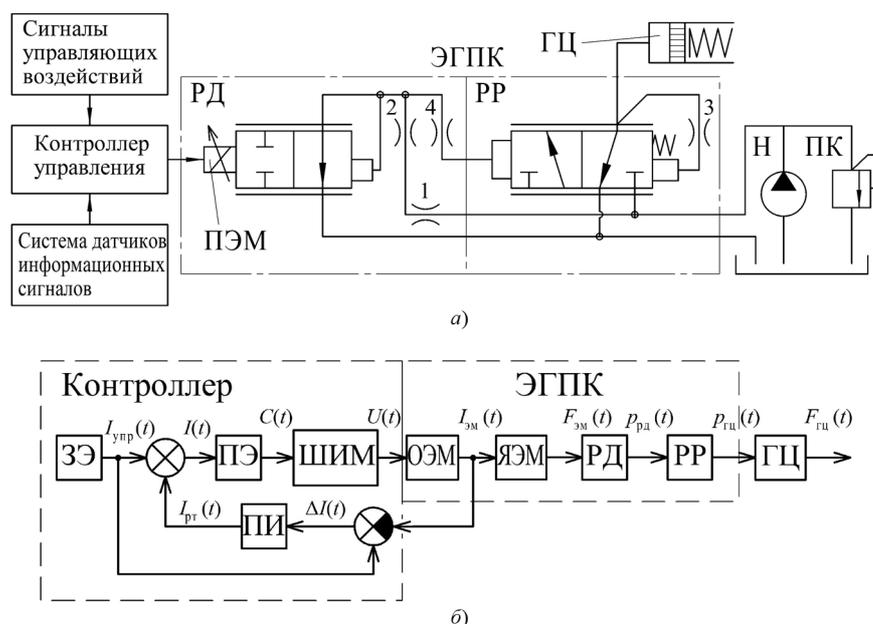


Рис. 1. Принципиальная схема ЭГПК (а) и функциональная схема МСАУ (б)

На рис. 1, б представлена функциональная схема МСАУ. В ее состав входят: задающий элемент (ЗЭ); преобразующий элемент (ПЭ); широтно-импульсный модулятор (ШИМ) микропроцессорного контроллера управления автоматической трансмиссией; ПЭМ, содержащий обмотку (ОЭМ), магнитопровод и якорь (ЯЭМ); РД и РР; ГЦ привода управляемого рабочего органа машины.

Контроллер управления определяет оптимальные условия и своевременность осуществления переключения передач и формирует характеристику управления фрикционом, реализуемую на выходе задающего элемента в виде характеристики изменения во времени тока управления $I_{упр}(t)$. Преобразующий элемент преобразует эту характеристику в дискретный сигнал, определяющий величину скважности $C(t)$ сигнала, формируемого ШИМ на его выходе. Скважность сигнала ШИМ определяет среднюю величину напряжения $U(t)$, подаваемого на обмотку электромагнита [5]. В результате под действием создаваемого магнитного потока в магнитопроводе возникает сила воздействия на якорь ПЭМ $F_{эм}(t)$, пропорциональная силе тока в обмотке $I_{эм}(t)$. Якорь ПЭМ через шток непосредственно воздействует на запорно-регулирующий орган регулятора давления, вследствие чего на его выходе формируется сигнал давления рабочей жидкости $p_{рд}(t)$, величина которого пропорциональна силе тока в обмотке ПЭМ $I_{эм}(t)$:

$$p_{рд}(t) = k_{рд} I_{эм}(t),$$

где $k_{рд}$ — коэффициент пропорциональности.

Назначение регулятора-распределителя заключается в усилении мощности потока рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр фрикциона в процессе его включения. После заполнения гидроцилиндра характеристика давления рабочей жидкости в его полости $p_{гц}(t)$, поддерживаемая РР, несколько отличается от давления $p_{рд}(t)$, но изменяется практически пропорционально силе тока в ОЭМ $I_{эм}(t)$.

В процессе управления включением фрикциона происходит нагрев обмотки, и ее сопротивление изменяется, что приводит к отклонению характеристики тока $I_{эм}(t)$ от характеристики тока управления $I_{упр}(t)$. Для поддержания требуемой характеристики тока ПЭМ $I_{эм}(t)$ в контроллере предусмотрен регулятор, обеспечивающий пропорционально-интегральный закон управления величиной тока (ПИ-регулятор). На его вход подается сигнал отклонения $\Delta I(t)$ тока в ОЭМ $I_{эм}(t)$ от величины тока управления $I_{упр}(t)$, представляющий собой разность между ними:

$$\Delta I(t) = I_{упр}(t) - I_{эм}(t).$$

На выходе ПИ-регулятора формируется сигнал $I_{рт}(t)$, определяемый выражением:

$$I_{рт}(t) = k_{рт} \left[\Delta I(t) + \frac{1}{T_{и0}} \int_0^t \Delta I(t) dt \right],$$

где $k_{рт}$ — коэффициент передачи регулятора; $T_{и}$ — постоянная времени интегрирования; t — текущее время.

Получаемый выходной сигнал ПИ-регулятора $I_{рт}(t)$ складывается с сигналом управления $I_{упр}(t)$, и их сумма $I(t) = I_{упр}(t) + I_{рт}(t)$ поступает на вход ПЭ. В результате происходит корректировка напряжения $U(t)$ на выходе ШИМ, что позволяет поддерживать требуемую характеристику регулирования давления $p_{рд}(t)$.

Эффективная работа МСАУ достигается согласованностью процессов функционирования всех элементов системы, что зависит от выбора характеристик и параметров взаимодействующих компонентов МСАУ.

Цель исследования

Цель исследования — определение и выбор характеристик и параметров компонентов МСАУ, обеспечивающих высокие показатели качества и устойчивость функционирования системы в процессе формирования характеристики изменения давления рабочей жидкости на выходе ЭГПК, поступающей в управляемый исполнительный гидроцилиндр рабочего органа машины.

Материалы и методы

Решение поставленной задачи осуществлялось в два этапа. Вначале на основе математического моделирования были определены основные параметры ЭГПК и изготовлены опытные образцы, а затем для оценки эффективности принятых решений проведены экспериментальные исследования. Результаты экспериментов использованы для уточнения математических моделей и последующего решения задач оптимизации параметров создаваемой конструкции ЭГПК.

При выборе параметров гидроклапана регулятора давления использованы два критерия: расход рабочей жидкости в выключенном состоянии гидроклапана и коэффициент чувствительности характеристики регулирования давления. Выбором первого критерия преследовалась цель минимизации потерь подачи насоса гидросистемы через гидроклапан РД, поступающей на слив. Количество ЭГПК у конкретной машины составляет некоторое множество, поэтому расход на слив может быть весьма значительным. Например, в конструкции карьерного самосвала "БелАЗ" используется семь ЭГПК для управления фрикционами ГМП. Коэффициент чувствительности определяет быстродействие РД. Величина расхода рабочей жидкости через РД определяется количеством и диаметрами дросселей, устанавливаемых в магистрали питания РД. Их минимальное количество равно двум (дроссели 1 и 2 на рис. 1, а).

На рис. 2, а показаны графики зависимостей расхода $Q_{рд}$ от перемещения шарового затвора h относительно его седла при различных значениях диаметра дросселей $d_{др}$, на рис. 2, б — графики зависимостей давления $p_{рд}$ на выходе РД.

Из рис. 2 видно, что характеристики гидроклапана РД существенно зависят от диаметра дросселей $d_{др}$. На основе анализа образцов ЭГПК зарубежных фирм для создаваемой конструкции принято $d_{др} = 0,8$ мм, максимальный ход шарового затвора $h_{max} = 0,3$ мм.

На рис. 3, а приведены графики зависимостей $Q_{рд} = f(h)$, на рис. 3, б — графики $p_{рд} = f(h)$ при

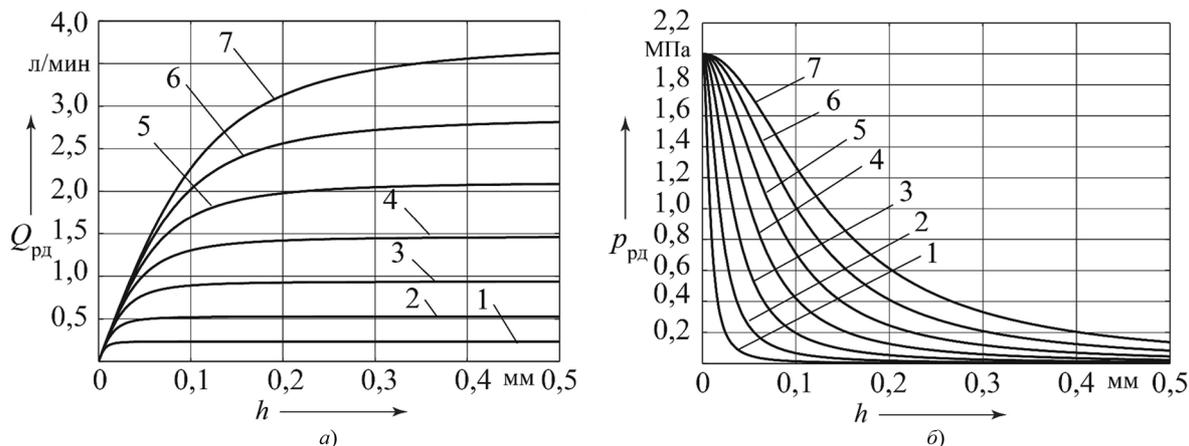


Рис. 2. Изменения характеристик расхода рабочей жидкости на слив $Q_{рд}$ (а) и регулируемого давления $p_{рд}$ (б) при диаметрах дросселей $d_{др}$, равных:

1 — 0,4 мм; 2 — 0,6 мм; 3 — 0,8 мм; 4 — 1 мм; 5 — 1,2 мм; 6 — 1,4 мм; 7 — 1,6 мм

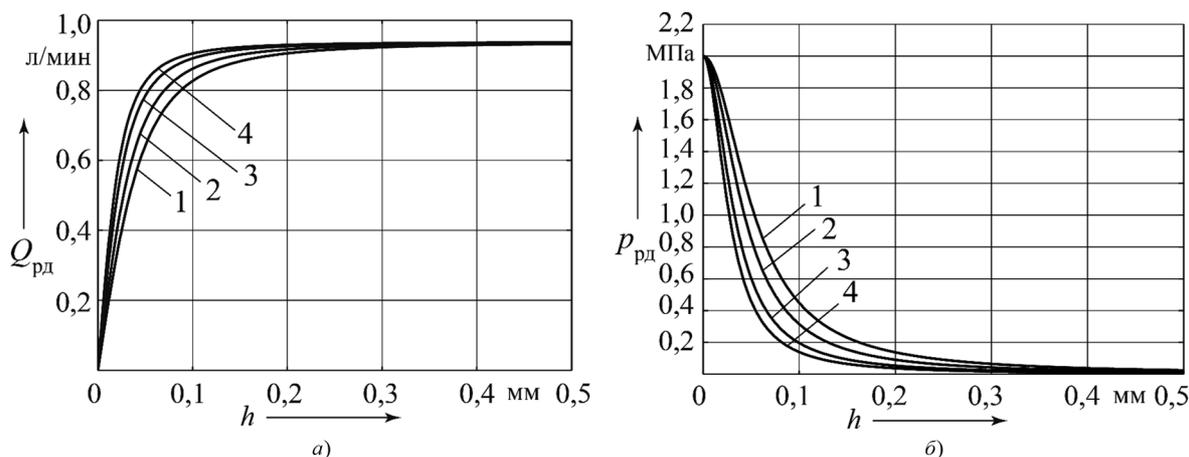


Рис. 3, а, б. Характеристики гидроклапана регулятора давления при различных размерах шарового затвора:

1 — $d_{ш} = 4,763$ мм, $d_c = 2,5$ мм; 2 — $d_{ш} = 6,35$ мм, $d_c = 3$ мм; 3 — $d_{ш} = 7,938$ мм, $d_c = 4$ мм; 4 — $d_{ш} = 9$ мм, $d_c = 5$ мм

$d_{др} = 0,8$ мм и различных значениях диаметра шарового затвора $d_{ш}$ и его седла d_c . Характеристика $Q_{рд} = f(h)$ слабо зависит от d_c , но величина d_c существенно влияет на коэффициент чувствительности РД $k_{ч} = dp_{рд}/dh$. С увеличением d_c значение $k_{ч}$ возрастает, но при этом увеличивается необходимое усилие ПЭМ. У созданного ПЭМ максимальное усилие составляет $F_{эм\ max} = 25$ Н при токе $I_{эм} = 0,8$ А, что предопределило выбор параметров запорно-регулирующего органа РД: диаметр седла $d_c = 4$ мм, диаметр шарового затвора $d_{ш} = 7,938$ мм.

При управлении рабочими органами машин важное значение имеет быстродействие системы. Обычно время полного перемещения рабочего органа составляет 0,5–2 с. Например, при включении фрикционного ГМП время заполнения гидроцилиндра не должно превышать 0,5–0,7 с при его объеме 0,4–0,5 л. Регулятор давления не может обеспечить выполнение этого условия. Поэтому ЭГПК выполнен двухступенчатым, а параметры РР определяются отмеченными требованиями к быстродействию. В созданной конструкции РР диаметры по-

ясков дифференциального золотника равны соответственно 12 и 13 мм, ход золотника составляет 5 мм. При перепаде давления на выходе и входе в 0,7 МПа обеспечивается расход рабочей жидкости около 50 л/мин.

Для уточнения расчетных характеристик ЭГПК проведены испытания по определению расхода рабочей жидкости в процессе его функционирования. Испытаниям подвергнуты 20 опытных образцов. Расход определялся в двух состояниях ЭГПК: выключенном и включенном после завершения процесса управления. В выключенном состоянии ЭГПК получены следующие результаты: при давлении источника питания 2 МПа среднее выборочное значение расхода $\bar{Q}_{сл} = 0,95$ л/мин, среднее квадратическое отклонение $\sigma_{Qсл} = 0,127$ л/мин; при давлении источника питания 1 МПа $\bar{Q}_{сл} = 0,64$ л/мин, $\sigma_{Qсл} = 0,118$ л/мин. Во включенном состоянии ЭГПК расход на слив незначителен, его максимальные значения не превышали 0,07 л/мин.

Приведенные значения параметров созданного ЭГПК позволяют определить возможность его примене-

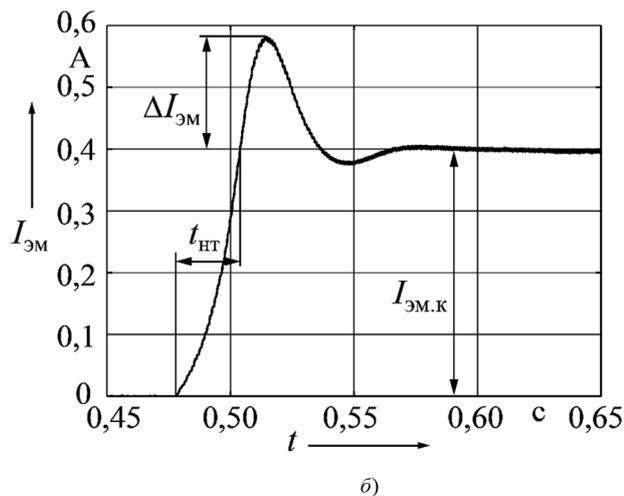
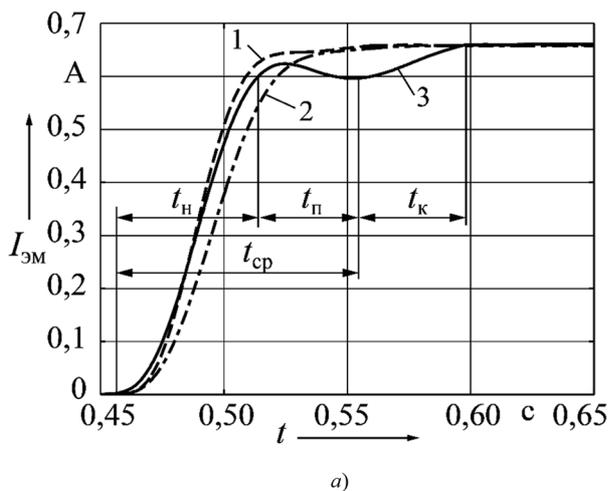


Рис. 4. Переходные характеристики при включении ПЭМ от источника постоянного напряжения (а) и контроллера (б)

ния для управления рабочими органами любых машин и механизмов. Созданные компоненты МСАУ могут быть использованы для автоматизации управления рабочими органами различных машин.

Для получения достоверной информации о физических свойствах созданных компонентов МСАУ проведены экспериментальные исследования, в первую очередь — испытания ПЭМ с целью определения его статических и динамических характеристик.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4, а показаны переходные характеристики при включении ПЭМ. Переходная характеристика представляет собой реакцию управляемого объекта на ступенчатое воздействие. Использован источник питания постоянного напряжения — аккумулятор с номинальным напряжением 12 В. Графики иллюстрируют изменение тока в обмотке ПЭМ во времени при ступенчатом (скачкообразном) характере подачи напряжения. График 1 соответствует блокировке якоря в исходном положении, график 2 — в конечном, а график 3 получен при поднятии электромагнитом груза массой $m_{гр} = 2$ кг в процессе перемещения якоря ПЭМ из исходного положения в конечное.

Графики 1 и 2 имеют вид типовой переходной характеристики апериодического звена второго порядка [7]. Переходная характеристика этого звена соответствует выражению:

$$I_{ЭМ}(t) = \left(1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-t/T_1} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-t/T_2}\right) k \cdot 1(t),$$

где T_1, T_2 — постоянные времени; k — коэффициент передачи звена; $1(t)$ — функция единичного ступенчатого воздействия (в рассматриваемом случае это напряжение аккумуляторной батареи U).

Постоянные времени T_1 и T_2 определяются по методике, изложенной в работе [7]. Для графика 1 получено $T_1 = 0,0103$ с, $T_2 = 0,0128$ с, для графика 2 — $T_1 = 0,016$ с, $T_2 = 0,0115$ с.

График 3 существенно отличается от графиков 1 и 2. Согласно этому графику, после подачи ступенчатого воздействия $U(t)$ в течение интервала времени $t_н$ происходит нарастание тока в обмотке ПЭМ $I_{ЭМ}(t)$ при неподвижном якоре, находящемся в исходном положении, и соответственно возрастает развиваемое им усилие $F_{ЭМ}(t)$. В конце этого интервала величина усилия $F_{ЭМ}(t)$ оказывается достаточной для преодоления силы тяжести груза $m_{гр}g$, и якорь ПЭМ начинает перемещаться, поднимая груз. При движении якоря в интервале времени $t_п$ возникает противо-ЭДС, направленная противоположно напряжению источника питания, что приводит к снижению тока в обмотке ПЭМ, т.е. к спаду кривой $I_{ЭМ}(t)$ [8]. После остановки якоря в конечном положении ток $I_{ЭМ}(t)$ снова начинает возрастать в интервале времени $t_к$ до конечного значения $I_{ЭМ \max}$, но с меньшей интенсивностью, чем в интервале $t_н$, так как в новом положении якоря индуктивность обмотки ПЭМ иная. Интервал времени $t_{ср} = t_н + t_п$ называют временем срабатывания ПЭМ, а время переходного процесса $t_{птп} = t_н + t_п + t_к$.

Уравнение баланса напряжений на обмотке ПЭМ при перемещении якоря имеет вид:

$$U_0 = I_{ЭМ}R + L \frac{dI_{ЭМ}}{dt} + I_{ЭМ} \frac{dL}{dt},$$

где U_0 — напряжение источника питания, В; $I_{ЭМ}$ — ток в обмотке ПЭМ, А; R — активное сопротивление обмотки, Ом; L — индуктивность ПЭМ, Гн.

Первое слагаемое в этом уравнении представляет собой падение напряжения на активном сопротивлении обмотки. Второе слагаемое — это ЭДС самоиндукции. Третье слагаемое обусловлено изменением индуктивности при перемещении якоря. Оно возникает только при перемещении якоря, а при неподвижном якоре равно нулю.

Однако в реальных условиях функционирования ЭГПК управление электромагнитом осуществляет контроллер посредством широтно-импульсного модулятора. Цепь питания ПЭМ снабжена обратной связью, в которую включен ПИ-регулятор тока (см. рис. 1, б). Пе-

реходная характеристика тока ПЭМ в этом случае оказывается совершенно иной по сравнению с управлением от источника постоянного напряжения.

На рис. 4, б показана переходная характеристика $I_{ЭМ} = f(t)$ при подаче ступенчатого управляющего сигнала $I_{упр} = 0,4$ А (см. рис. 1, б). Переходная характеристика тока в обмотке ПЭМ в этом случае имеет колебательный характер. В процессе испытаний установлено, что ее параметры зависят от величины коэффициентов пропорциональной $k_{п}$ и интегральной $k_{и}$ составляющих ПИ-регулятора. В контроллерах производства ОАО "Измеритель" значение $k_{п}$ можно изменять в диапазоне от 0 до 100, $k_{и}$ — от 0 до 50.

Получаемую переходную характеристику оценивали по двум критериям качества: времени запаздывания нарастания тока $t_{нт}$ от нуля до заданной конечной величины $I_{ЭМк}$ и относительному перерегулированию тока $k_{пт}$, вычисляемому по формуле:

$$k_{пт} = 1 + \Delta I_{ЭМ} / I_{ЭМк},$$

где $\Delta I_{ЭМ}$ — абсолютная величина перерегулирования тока (см. рис. 4, б).

Таблица 1

Значения факторов на уровнях варьирования при проведении эксперимента

Обозначение фактора		Натуральное значение фактора		
Натуральное	Нормированное	На нижнем уровне ($x_i = -1$)	В центре плана ($x_i = 0$)	На верхнем уровне ($x_i = +1$)
$k_{п}$	x_1	5	40	75
$k_{и}$	x_2	5	25	45

Таблица 2

Параметры регрессионных моделей

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента регрессии и оценка адекватности модели	
	$k_{птj}$	$t_{нт}$
b_0	1,177 375	22,5
b_1	-0,196 21	-2,933 33
b_2	-0,002 46	-0,333 33
b_3	0,000 375	0,35
b_4	0,0855	3
b_5	$-2,1 \cdot 10^{-16}$	0,1
Критерий Фишера	Расчетный F	2116,8
	Табличный F_T	19,3
Коэффициент детерминации R^2	0,999	0,995

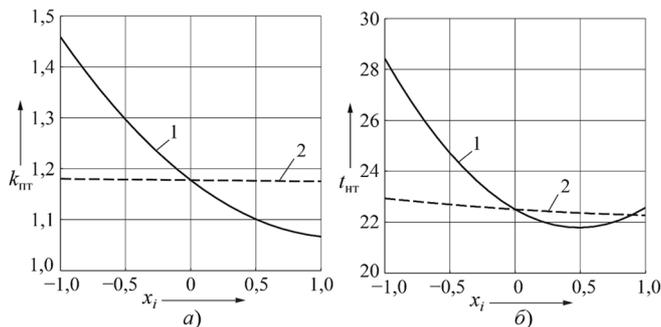


Рис. 5. Зависимости функций отклика $k_{пт}$ (а) и $t_{нт}$ (б) от нормированных факторов x_i , $i = 1, 2$

Как известно, колебательный переходный процесс обеспечивает более высокое быстродействие управляемого объекта, однако при этом возникает проблема снижения величины перерегулирования.

Для выявления влияния коэффициентов $k_{п}$ и $k_{и}$ настройки ПИ-регулятора тока на принятые критерии качества переходной характеристики $t_{нт}$ и $k_{пт}$ проведен планируемый эксперимент и получена регрессионная модель системы управления. Регрессионная модель строилась по методике, изложенной в работе [9]. В качестве искомого уравнений регрессии принят квадратный полином вида:

$$y_j = b_{0j} + b_{1j}x_1 + b_{2j}x_2 + b_{3j}x_1x_2 + b_{4j}x_1^2 + b_{5j}x_2^2;$$

$$j = \overline{1, 2}, \quad (1)$$

где x_1, x_2 — нормированные значения факторов (параметров $k_{п}$ и $k_{и}$, подлежащих оптимизации); y_j — j -я функция отклика (критерии качества $k_{птj}$ и $t_{нтj}$); $b_{0j}, b_{1j}, \dots, b_{5j}$ — коэффициенты j -го уравнения регрессии.

В ходе эксперимента варьирование факторов осуществляли в соответствии с табл. 1.

Значения коэффициентов регрессии и оценки адекватности и работоспособности полученных регрессионных моделей приведены в табл. 2.

На рис. 5 приведены графики зависимостей критериев качества от нормированных значений оптимизируемых параметров, полученные по уравнениям регрессии (1).

Полученная регрессионная модель использована для оптимизации коэффициентов $k_{п}$ и $k_{и}$ настройки ПИ-регулятора тока контроллера управления автоматической трансмиссией. Оптимизация осуществлялась на основе минимаксной стратегии. Целевая функция минимакса $F(\vec{X})$ при наличии регрессионной математической модели объекта формируется согласно выражению [9]:

$$F(\vec{X}) = \sum_{j=1}^m c_j \left(\frac{y_j(\vec{X}) - y_{j\text{extr}}}{y_{j\text{max}} - y_{j\text{min}}} \right)^2,$$

где $y_j(\vec{X})$ — зависимость j -го критерия от вектора оптимизируемых параметров $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; n — количество оптимизируемых параметров; $y_{j\text{extr}}$ — экстремальное значение j -го критерия; $y_{j\text{min}}, y_{j\text{max}}$ — минимальное и максимальные значения j -го критерия, достигаемые в

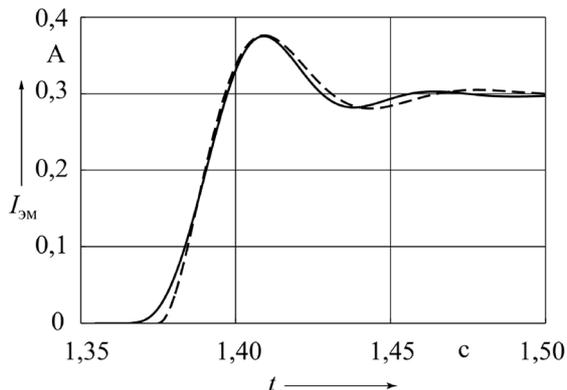


Рис. 6. Графики переходных характеристик при оптимальных параметрах настройки ПИ-регулятора тока

области варьирования факторов \vec{X} (находятся по графикам на рис. 6); c_j — коэффициент веса, характеризующий значимость j -го критерия; m — количество критериев.

Коэффициенты веса выбирают из условия:

$$\sum_{j=1}^m c_j = 1; \quad c_j > 0.$$

Оптимальные значения параметров соответствуют минимуму целевой функции. При $c_1 = c_2 = 0,5$ получены следующие значения искомым оптимальных коэффициентов настройки ПИ-регулятора: $k_{\text{П}} = 65,328$; $k_{\text{И}} = 37,899$. При этом показатели качества: $k_{\text{ПТ}} = 1,079$; $t_{\text{НТ}} = 21,939$. В выбранном диапазоне варьирования факторов (см. табл. 1) наихудшие значения показателей качества: $k_{\text{ПТ}} = 1,459$; $t_{\text{НТ}} = 28,43$. Таким образом, в результате выполненных исследований удалось снизить относительное перерегулирование тока в 1,35 раза, время запаздывания нарастания тока — в 1,3 раза.

На рис. 6 приведен график переходной характеристики изменения тока в обмотке ПЭМ, полученный экспериментально при оптимальных параметрах настройки регулятора тока контроллера (представлен сплошной линией).

На основе этого графика определены параметры переходной характеристики, необходимые для построения математической модели функционирования ПЭМ в системе автоматического управления переключением передач. Переходная характеристика колебательного звена описывается выражением [7]:

$$I_{\text{ЭМ}}(t) = \frac{U_0}{R} \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\cos(\beta t) + \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta t) \right) \right],$$

где α — коэффициент затухания колебаний, рад/с; β — частота затухающих колебаний, рад/с.

Значения α и β находят по формулам:

$$\alpha = \frac{2}{\tau} \ln \left| \frac{A_1}{A_2} \right|; \quad \beta = 2\pi/\tau,$$

где A_1, A_2 — 1-я и 2-я амплитуды колебаний; τ — период затухающих колебаний, с.

Значения A_1, A_2 и τ измеряют непосредственно по графику полученной записи осциллограммы изменения тока в обмотке ПЭМ [7].

Дифференциальное уравнение изменения тока в обмотке ПЭМ имеет вид:

$$T^2 d^2 I_{\text{ЭМ}}/dt^2 + 2\xi T dI_{\text{ЭМ}}/dt + I_{\text{ЭМ}} = kU,$$

где T — постоянная времени, с; ξ — относительный коэффициент затухания; k — коэффициент передачи.

Значения T и ξ вычисляют по формулам:

$$T = 1/\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}; \quad \xi = \alpha/\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}.$$

Получены следующие значения параметров: $\alpha = 51,679$ рад/с; $\beta = 116,355$ рад/с. При этом $T = 8,091 \cdot 10^{-3}$ с; $\xi = 0,41937$. Переходная характеристика, построенная по формуле (1), представлена на рис. 6 (штриховая линия).

Дальнейшие испытания проводились при полном комплекте МСАУ. В ее состав входили все компоненты, изображенные на функциональной схеме (см. рис. 1, б). Основное внимание было сосредоточено на исключении резонансных колебаний давления на выходе регулятора-распределителя, снижении амплитуд этих колебаний и уменьшении ширины петли гистерезиса статической характеристики ЭГПК. Основная причина гистерезиса — сухое трение между перемещаемыми относительно друг друга механическими элементами механизмов. Сухое трение в сопряжениях золотника регулятора-распределителя с его корпусом, якоря и штока ПЭМ относительно опорных поверхностей приводит к увеличению амплитуд колебаний управляемого давления рабочей жидкости.

На рис. 7, а приведена статическая характеристика ЭГПК, представляющая собой зависимость давления на его выходе $p_{\text{ГЦ}}$ от тока в обмотке $I_{\text{ЭМ}}$. Питание обмотки ПЭМ осуществлялось от ШИМ контроллера. Стрелками показано направление изменения тока при испытаниях. Полученная статическая характеристика имеет петлю гистерезиса значительной величины. Величину гистерезиса G оценивали по формуле:

$$G = \frac{\Delta p_{\text{ГЦ}}}{p_{\text{ГЦ max}}} \cdot 100 \%,$$

где $\Delta p_{\text{ГЦ}}$ — ширина петли гистерезиса, МПа; $p_{\text{ГЦ max}}$ — максимальное давление, соответствующее максимальному значению тока $I_{\text{ЭМ max}}$, подаваемого в обмотку ПЭМ.

Значение величины гистерезиса находится в пределах 7–8 %, а при низких значениях тока статическая характеристика ПЭМ становится нелинейной.

Один из способов борьбы с гистерезисом заключается в обеспечении осциллирующих относительных перемещений сопрягаемых подвижных элементов. Это можно обеспечить осцилляцией тока, подаваемого в обмотку ПЭМ.

В контроллере производства ОАО "Измеритель" рабочая частота ШИМ составляет 1000 Гц. Она значительно выше собственной частоты колебаний подвижных деталей ПЭМ и взаимодействующего с ним регулятора давления и регулятора-распределителя. Поэтому на этой

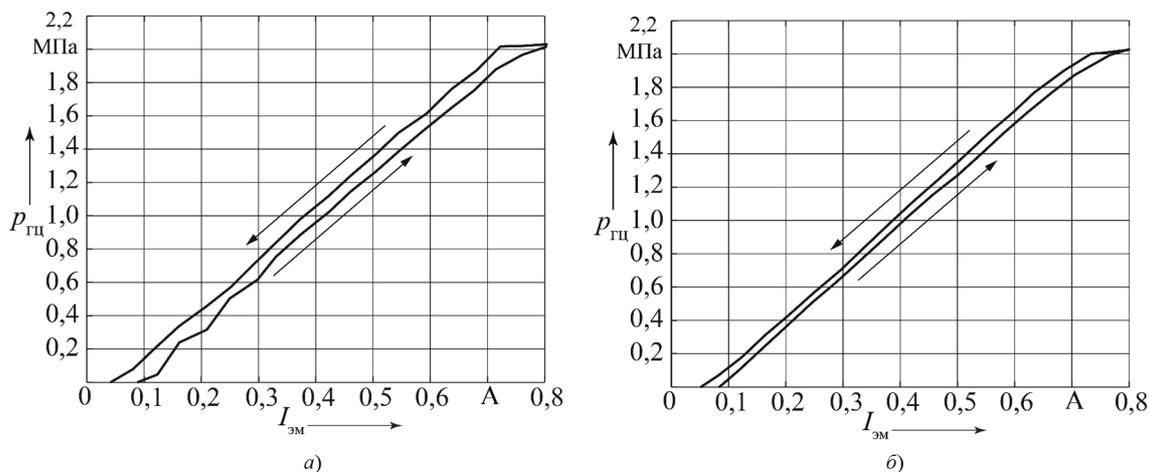


Рис. 7. Статическая характеристика ЭГПК без осцилляции управляющего сигнала контроллера (а) и с осцилляцией (б)

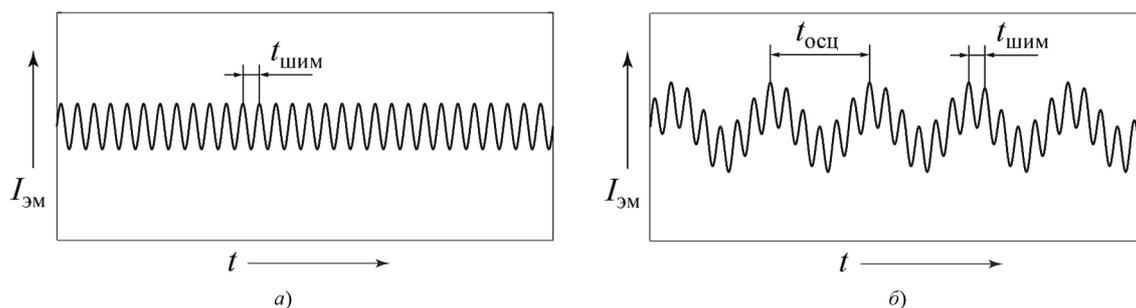


Рис. 8. Схемы управляющего сигнала без осцилляции (а) и с осцилляцией (б)

частоте их колебания не возникают. Но в контроллере предусмотрена возможность создания осцилляции тока на нескольких фиксированных частотах: 66, 100, 166, 200 и 250 Гц. Амплитуда осцилляции задается в битах в диапазоне от 0 до 80, при этом 1 бит равен 2,5 мА.

На рис. 8 приведены графики, отображающие характер изменения тока, подаваемого в обмотку ПЭМ без осцилляции (схема а) и с осцилляцией (схема б). Период изменения тока без осцилляции, формируемый ШИМ контроллера, обозначен $t_{\text{ШИМ}}$, период осцилляции тока $t_{\text{осц}}$.

Проведены экспериментальные исследования (табл. 3) по выявлению влияния параметров осцилляции тока на величину гистерезиса статической характеристики ЭГПК, представляющей собой зависимость давления на выходе регулятора-распределителя от управляющего тока в обмотке ПЭМ. Варьировались различные сочетания параметров осцилляции.

Установлено, что при неудачно выбранных сочетаниях параметров осцилляции тока могут возникать колебания регулируемого давления рабочей жидкости на выходах регулятора давления и регулятора-распределителя вследствие увеличения амплитуды тока в обмотке ПЭМ. Такие результаты не включались в табл. 3. Из нее следует, что при управлении без осцилляции тока величина гистерезиса характеристики давления составляет 7,24 %. При использовании осцилляции гистерезис сни-

жается. Его минимальное значение получено при частоте 166 Гц и амплитуде 37,5 мА и составляет 4,25 %. Статическая характеристика при этих параметрах приведена на рис. 7, б. Получена линейная характеристика на всем интервале изменения тока в обмотке электромагнита.

Таблица 3
Влияние параметров осцилляции тока на величину гистерезиса статической характеристики ЭГПК

Частота осцилляции, Гц	Амплитуда осцилляции, мА	Гистерезис, %
0	0	7,24
66	12,5	5,84
66	25	5,34
100	12,5	5,77
166	12,5	5,36
166	25	4,92
166	37,5	4,25
200	12,5	6
200	25	5,5
250	12,5	5,95
250	25	6
250	37,5	5,65
250	50	5,22

Таким образом, в результате проведенного комплекса экспериментальных исследований механизма управления фрикционами автоматической коробки передач и его основных компонентов достигнуто существенное улучшение характеристик и параметров функционирования всех элементов системы и высокое качество переходных процессов при переключении передач.

Выводы

1. Создан полный комплекс компонентов МСАУ, в состав которого входят: микропроцессорный контроллер управления; двухступенчатый ЭГПК с пропорциональным электромагнитом; система датчиков частоты вращения, давления и температуры рабочей жидкости; селектор выбора режимов управления автоматической трансмиссией.

2. Проведены экспериментальные исследования опытных образцов ЭГПК с учетом его взаимодействия с контроллером и исполнительным гидроцилиндром объекта управления. На основе полученных результатов осуществлена оптимизация параметров и характеристик ЭГПК.

3. Установлено, что переходная характеристика ПЭМ существенно зависит от характеристики источника питания. При использовании источника питания постоянного напряжения она имеет форму, характерную для апериодического звена, а при управлении от контроллера — для колебательного, что обусловлено влиянием регулятора тока контроллера, включенного в цепь обратной связи обмотки ПЭМ.

4. Параметры регулятора тока контроллера влияют на величину относительного перерегулирования и время запаздывания нарастания тока в обмотке ПЭМ. На основе экспериментов получены регрессионные модели, позволившие оптимизировать параметры ПИ-регулятора тока и существенно снизить относительное перерегулирование и время запаздывания (соответственно в 1,35 и 1,3 раза).

5. В процессе испытаний выявлено наличие существенного гистерезиса статической характеристики ЭГПК, обусловленного сухим трением. Для снижения величины гистерезиса предложено использовать осцилляцию управляющего сигнала тока контроллера, подаваемого в обмотку ПЭМ. Определены оптимальные параметры амплитуды и частоты тока осцилляции, позволившие снизить величину гистерезиса в 1,7 раза и получить линейную характеристику на всем интервале изменения тока в обмотке ПЭМ.

6. Приведенная информация о параметрах и характеристиках ЭГПК позволяет решить вопрос о возможности его использования для разработки МСАУ конкретного объекта управления.

Литература и источники

1. Тарасик В. П., Горбатенко Н. Н., Егоров А. Н. и др. Мехатронная система автоматического управления ГМП карьерного самосвала // Автомобильная промышленность. 2010, № 4. С. 16—19.

2. Тарасик В. П., Горбатенко Н. Н., Егоров А. Н. и др. Мехатронная система автоматического управления ГМП карьерного самосвала // Автомобильная промышленность. 2010, № 6. С. 12—15.

3. Кириллов А. А., Васильев А. С. Выбор пропорционального редуционного клапана для электрогидравлической системы управления трактором // Строительные и дорожные машины. 2008, № 3. С. 29—32.

4. Ляхов С. В., Снитков А. Г., Михайлов В. В. Метод экспресс-диагностики пилотной части пропорционального электромагнитного клапана // Актуальные вопросы машиноведения. 2014, № 3. С. 132—136.

5. Тарасик В. П., Горбатенко Н. Н., Плякин Р. В. и др. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ // Грузовик. 2011, № 2. С. 2—11.

6. Тарасик В. П., Горбатенко Н. Н., Дычкин И. М. и др. Двухступенчатый электрогидравлический механизм управления давлением: Патент РФ № 2459982, 2012.

7. Ксеневиц И. П., Тарасик В. П. Теория и проектирование автоматических систем. М.: Машиностроение, 1996. 479 с.

8. Таев И. С., Буль Б. К., Годжелло А. Г. и др. Основы теории электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.

9. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем. Минск: Новое знание, 2016. 592 с.

References

1. Tarasik V. P., Gorbatenko N. N., Egorov A. N., Reginya V. V. Mechatronic system of automatic control of hydromechanical transmission of a dump truck. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2010, no. 4, pp. 16—19 (in Russ.).

2. Tarasik V. P., Gorbatenko N. N., Egorov A. N., Reginya V. V. Mechatronic system of automatic control of hydromechanical transmission of a dump truck. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2010, no. 6, pp. 12—15 (in Russ.).

3. Kirillov A. A., Vasil'ev A. S. Selecting a proportional pressure reducing valve for electrohydraulic control system of a tractor. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2008, no. 3, pp. 29—32 (in Russ.).

4. Lyakhov S. V., Snitkov A. G., Mikhaylov V. V. Method of rapid diagnosis of a pilot stage of proportional solenoid valve. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya*, 2014, no. 3, pp. 132—136 (in Russ.).

5. Tarasik V. P., Gorbatenko N. N., Plyakin R. V., Egorov A. N., Reginya V. V. Mechatronic system of automatic control of hydro-mechanical transmission of BelAZ dump trucks. *Gruzovik*, 2011, no. 2, pp. 2—11 (in Russ.).

6. Tarasik V. P., Gorbatenko N. N., Dychkin I. M., Plyakin R. V., Kurstak V. I., Puzanova O. V., Egorov A. N., Reginya V. V., Tereshonok S. M. *Dvukhstupenchatyy elektrogidravlicheskiy mekhanizm upravleniya davleniem* [Two-stage electrohydraulic pressure control mechanism]. RF patent no. 2459982, 2012.

7. Ksenevich I. P., Tarasik V. P. *Teoriya i proektirovanie avtomaticheskikh sistem* [Theory and design of automatic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, 479 p.

8. Taev I. S., Bul' B. K., Godzhello A. G., Degtyar' V. G., Slivinskaya A. G., Chunikhin A. A. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987, 352 p.

9. Tarasik V. P. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2016, 592 p.