

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА

## SIMULATION MODELING OF THE VOLUMETRIC HYDRAULIC DRIVE

**А.Ю. ПОПОВ**<sup>1,2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет,  
Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Ростовский государственный университет путей  
сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, popov\_a\_ju@mail.ru

**A.YU. POPOV**<sup>1,2</sup>, PhD in Engineering

<sup>1</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Rostov State Transport University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation, popov\_a\_ju@mail.ru

В устройстве множества современных сельскохозяйственных машин широкое применение получил гидравлический привод с возвратно-поступательным движением для подъема, опускания и перемещения рабочих органов. Одним из важных этапов проектирования гидравлических приводов и трансмиссий является моделирование. В связи с трудоемкостью проведения натурного эксперимента и громоздкостью расчета математических моделей гидросистем, а также с развитием вычислительной техники, большое применение получило имитационное моделирование. Такой вид компьютерного моделирования позволяет изучать сложные системы на основе разработки многозвенных факторных моделей с визуализацией численного эксперимента. В статье приводится порядок проведения имитационного моделирования динамических процессов, протекающих в объемном гидроприводе. Модель разработана на базе стандартных библиотек вычислительной системы MATLAB Simulink. Объемный гидропривод представлен в виде структурной модели и состоит из взаимосвязанных блоков, которые моделируют на базе систем дифференциальных уравнений работу насосной станции с механическим приводом, предохранительный клапан, золотниковый трехсекционный четырехлинейный гидрораспределитель, силовой гидроцилиндр двустороннего действия с непроходным штоком, гидробак. При расчете имитационной модели учтены изменение модуля упругости жидкости в зависимости от давления в гидросистеме, параметры рабочей жидкости, жесткий стоп при достижении крайних положений штоком гидроцилиндра, трение между подвижными частями в силовом гидроцилиндре. Разработанная программа позволяет на этапе проектирования смоделировать рабочие процессы и получить необходимые данные о динамических свойствах гидросистемы на всех режимах функционирования, проводить демонстрацию в виде графиков и осциллограмм, упрощает анализ переходных процессов в гидросистеме, а также позволяет подбирать рациональные конструктивные параметры составляющих элементов объемного гидропривода.

**Ключевые слова:** имитационная модель, гидросистема, гидропривод, Simulink, давление, расход, гидроцилиндр, гидрораспределитель, клапан.

In the design of a variety of the modern agricultural machines, the hydraulic drive with reciprocating motion for lifting, lowering and moving the working bodies has obtained a wide application. One of the important stages in the design of hydraulic drives and transmissions is a simulation. In connection with the laboriousness of carrying out the full-scale experiment and the cumbersome calculation of mathematical models of hydrosystems, as well as the development of the computing machinery, the simulation modeling has obtained a widespread usage. This type of computer simulation allows to investigate complex systems based on the development of multilink factor models with the visualization of a numerical experiment. The article presents the procedure for the simulation modeling of dynamic processes occurring in the volumetric hydraulic drive. The model is developed on the basis of standard libraries of the computing system MATLAB Simulink. The volumetric hydraulic drive is presented in the form of a structural model and consists of interconnected blocks that on the base of differential equations modeling the operation of a pumping station with a mechanical drive, a safety valve, a three-section four-line hydraulic distributor, double-acting power cylinder with special rod, a hydraulic tank. During the calculation of the simulation model takes into account a change of the modulus of elasticity of the fluid depending on the pressure in the hydraulic system, the parameters of the working fluid, the stiff stop when the extreme positions are reached by the rod of the hydraulic cylinder, the friction between the moving parts in the power hydrocylinder. The developed program allows to simulate working processes at the design stage and obtain the necessary data on the dynamic properties of the hydraulic system in all modes of operation, to demonstrate in the form of graphs and oscillograms, to simplify the analysis of transient processes in the hydraulic system, and also to select the rational design parameters of constituent elements of the volumetric hydraulic drive.

**Keywords:** simulation model, hydraulic system, hydraulic drive, Simulink, pressure, flow, hydraulic cylinder, hydraulic distributor, valve.

## Введение

В устройстве множества современных сельскохозяйственных машин широкое применение получил гидравлический привод с возвратно-поступательным движением для подъема, опускания и перемещения рабочих органов, управления вариаторами, системами автоматического регулирования и т.д. Это связано, прежде всего, с высоким быстродействием гидросистем, передачей больших мощностей при малых габаритах, независимым размещением узлов и высокой точностью отработки сигналов управления [1].

На сегодняшний день одним из важных этапов проектирования гидравлических приводов и трансмиссий является моделирование. С помощью данного вида проектирования можно задолго до создания опытного образца устройства или системы смоделировать рабочие процессы и получить необходимые данные о динамических свойствах гидросистемы и особенностях протекания динамических процессов, обратить внимание на наличие слабых мест в гидросистеме, а также до проведения испытаний осуществить оптимизацию проектного решения на базе результатов математического моделирования и вариантного анализа [2–4]. Математическое моделирование современных технических объектов и процессов (механических, гидравлических, электрических и др.) связано с построением на основе результатов экспериментальных или теоретических исследований моделей, обеспечивающих формализованное описание произвольной структуры [1, 4–9]. Но такой подход обычно ограничен рассмотрением динамических процессов, протекающих в отдельных устройствах и аппаратах. Моделирование же более сложных, многосоставных систем, включающих большое количество элементов различного характера функционирования, становится громоздким, трудоемким и требует большой степени абстрагирования. Однако с развитием программной и аппаратной базы вычислительной техники получило большое применение имитационное компьютерное моделирование, которое позволяет изучать сложные системы на основе разработки многосвязных факторных моделей с визуализацией численного эксперимента. Поэтому разработка и применение методов имитационного моделирования для описания динамических процессов в сложных разнородных системах, в том числе и гидравлических, является актуальной задачей.

## Цель исследования

Целью исследования является моделирование объемного гидропривода возвратно-поступательного движения и его последующий анализ.

## Построение модели

Для имитационного моделирования гидравлических процессов существует большое количество универсальных и специальных программных средств [1, 3, 5, 10–12]. Среди систем для компьютерного моделирования можно выделить математическую систему MATLAB, обладающую мощными средствами диалога, графики и визуализации вычислений. Система MATLAB представляет собой язык программирования высокого уровня для проведения технических вычислений, функционал которого расширяется большим количеством специализированных библиотек и пакетов прикладных программ. Самым известным из них является расширение Simulink, которое обеспечивает блочное структурное моделирование различных устройств, систем и процессов с применением технологии визуально-ориентированного программирования.

Рассмотрим моделирование объемного гидропривода возвратно-поступательного движения в программном комплексе Simulink. Как правило, такой гидропривод обязательно включает в себя: бак для хранения рабочей жидкости и ее охлаждения; насос для подачи рабочей жидкости в систему и создания давления; разнообразные клапаны (предохранительные, редуцирующие, переливные, обратные); исполнительный механизм (силовой гидроцилиндр, гидродвигатель); фильтр для очистки рабочей жидкости; гидролинии, соединяющие элементы гидросистемы между собой. Гидравлическая схема одной из таких систем представлена на рис. 1.

В рассматриваемой гидросистеме можно выделить следующие компоненты: блок питания с предохранительным устройством; управляющее устройство в виде золотникового гидрораспределителя; исполнительный механизм в виде гидроцилиндра двустороннего действия, гидробак.

Рассмотрим моделирование каждого компонента гидравлической системы в отдельности. Для этого воспользуемся библиотекой SimHydraulics, представляющую собой отдельный пакет Simulink среды MATLAB, предназначенный для моделирования гидросистем.

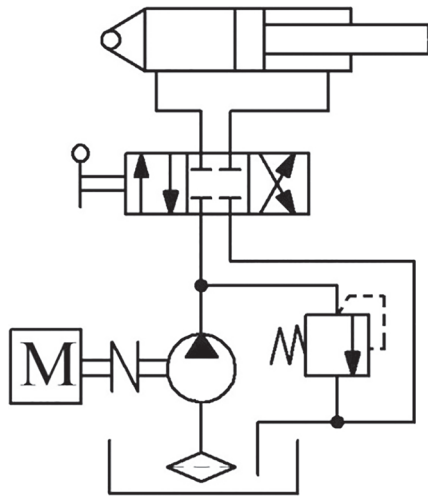


Рис. 1. Гидравлическая схема объемного гидропривода

Начнем с блока питания, функция которого заключается в снабжении системы необходимым количеством жидкости при определенном давлении. Для моделирования работы насоса воспользуемся блоком насоса постоянной подачи, который находится в разделе Pumps and Motors библиотеки SimHydraulics и представляет собой модель нерегулируемого роторного насоса. Основными параметрами для этого блока являются рабочий объем насоса, объемный и полный коэффициенты полезного действия, номинальное давление и угловая скорость приводного вала насоса. При построении модели блока питания необходимо достигнуть компромисса между надежностью, быстродействием моделирования и точностью,

подразумевая, что модель должна быть настолько проста, насколько возможно снабдить ее приемлемой точностью в пределах рабочего диапазона переменных параметров.

В зависимости от цели моделирования гидравлической системы можно упростить модель блока питания без потери в точности. Основными факторами, которые рассматриваются в данном процессе, является вариация величины угловой скорости приводного вала насоса и изменение амплитуды давления в гидросистеме. Если угловая скорость первичного двигателя остается фактически постоянной в течение моделируемого времени или изменяется незначительно относительно его стационарного значения, вся подсистема приводного вала может быть заменена идеальным блоком источника угловой скорости, выход которого установлен в стационарное значение, как это показывают на рис. 2.

Кроме того, в модель добавлен блок, имитирующий работу предохранительного клапана. В настройках блока установлено значение давления 5 МПа, при котором клапан начинает открываться.

Рассмотрим моделирование работы гидрораспределителя, представленного на рис. 3. Из рис. 3, а видно, что в рассматриваемой системе для управления гидроцилиндром используется трехпозиционный четырехлинейный гидрораспределитель. У такого вида гидрораспределителя есть четыре кромки, которые изменяют свое сопротивление при изменении входного сигнала  $S$  [13]. Для моделирования

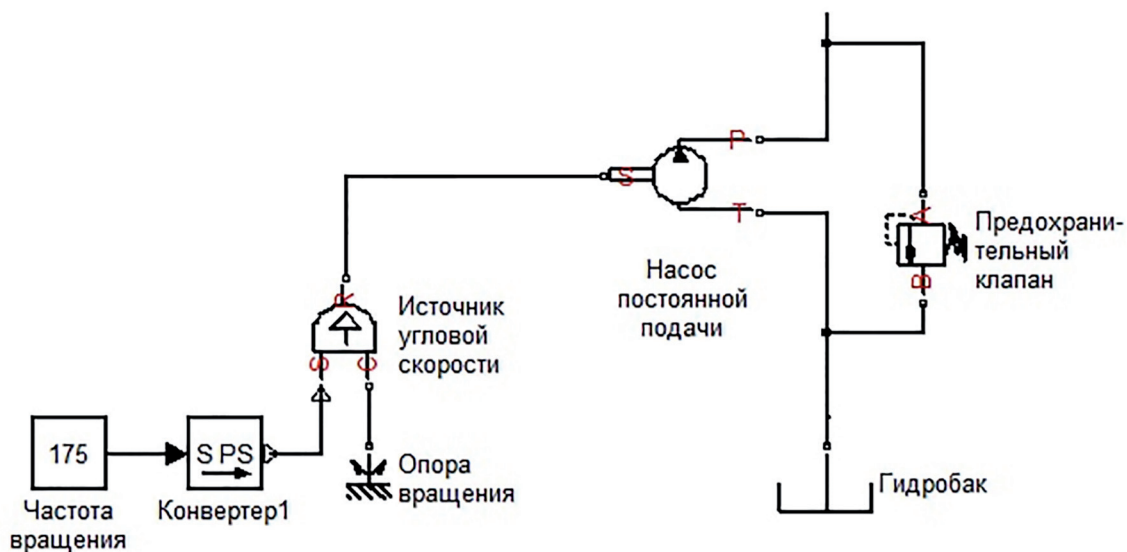


Рис. 2. Моделирование блока питания

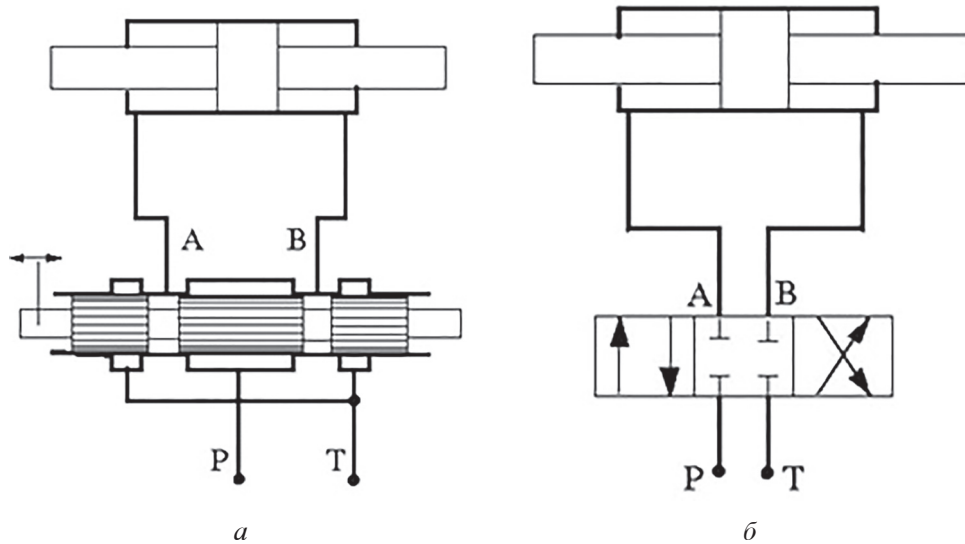


Рис. 3. Принципиальная (а) и гидравлическая (б) схемы золотникового гидрораспределителя

этих кромок в Simulink предусмотрено использование блоков «Регулируемый дроссель». Блок-схема гидрораспределителя представлена на рис. 4.

Работает схема следующим образом. Жидкость поступает через линию входа  $P$  и циркулирует между двумя внешними гидравлическими линиями  $A$  и  $B$ , которые обычно соединены с реверсивным силовым приводом. Сливается жидкость через линию  $T$ . У блока есть четыре гидравлических соединения, соответствующие впускному отверстию  $P$ , порты привода  $A$  и  $B$ , порт слива  $T$  и одно материальное сигнальное соединение порта  $S$ , который управляет положением золотника. Блоки регулируемых дросселей установлены следующим

образом: регулируемый дроссель  $P-A$  находится в пути  $P-A$ , регулируемый дроссель  $P-B$ , находится в пути  $P-B$ , регулируемый дроссель  $A-T$  находится в пути  $A-T$ , и регулируемый дроссель  $B-T$  находится в пути  $B-T$ . Всеми блоками управляет сигнал позиции, поступающий через материальное сигнальное порт  $S$ . Параметры ориентации дросселей в блок-схеме установлены таким образом, что положительный сигнал порта  $S$  открывает дроссели  $P-A$  и  $B-T$ , и закрывает дроссели  $P-B$  и  $A-T$ .

Задать изменение сопротивлений дросселей в зависимости от открытия можно путем настройки параметров в окне свойств гидрораспределителя. Для этого следует использовать блок позиционного привода. Он представля-

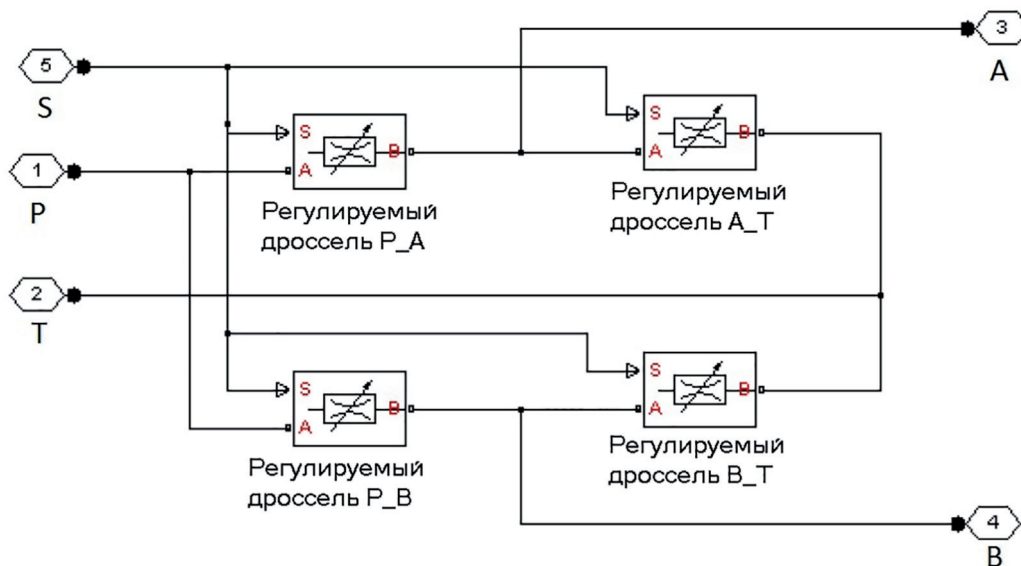


Рис. 4. Блок-схема золотникового гидрораспределителя

ет собой блок для изменения положения запорно-регулирующего элемента. Параметры могут быть взяты из каталогов или технических паспортов различных моделей. Основными параметрами блока являются: ход, время включения и время отключения. У этого блока есть два сигнальных входа *A* и *B*, соединенные с генерируемым элементарным сигналом. Он конфигурирует материальный входной сигнал, который может быть подведен к порту управления гидрораспределителя. При этом блок позиционного привода представлен как идеальный преобразователь, где выход не зависит от нагрузки. Входной сигнал, приложенный к порту *A*, заставляет двигаться исполнительный механизм привода (золотник) в положительном направлении, а чтобы переместить его в отрицательном направлении, необходимо подать входной сигнал к порту *B*. При этом перемещение осуществляется только при положительных сигналах в портах *A* и *B*. График смоделированного сигнала представлен на рис. 5.

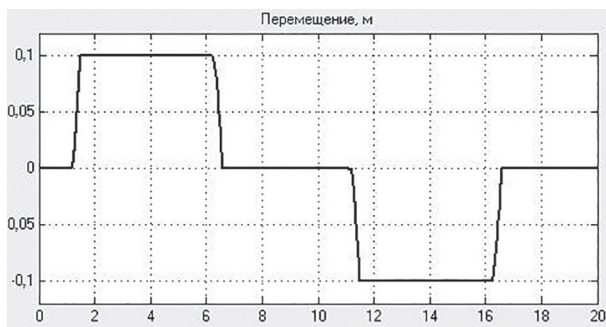


Рис. 5. Сигнал управления золотником гидрораспределителя

Блок привода золотника гидрораспределителя приводится в действие, когда величина входного сигнала пересекает порог 50 % номинального входного сигнала, который являет-

ся одним из параметров блока. Перемещение разделено по времени на три фазы: задержка, перемещение при постоянном ускорении и перемещение при постоянной скорости. Перемещение прекращается, когда истекает время включения выключателя. В этот момент золотник гидрораспределителя достигает заданной величины хода. Чтобы вернуть золотник в начальное положение, управляющий сигнал должен быть отключен. Обратное перемещение золотника гидрораспределителя также состоит из трех фаз: задержка, перемещение при постоянном ускорении и перемещение с постоянной скоростью.

Теперь рассмотрим моделирование силового механизма гидросистемы. При моделировании объемного гидропривода силовым механизмом примем гидроцилиндр двухстороннего действия. В имитационной модели необходимо учитывать сжимаемость жидкости, трение между подвижными частями в гидроцилиндре, а также удар поршня об упор при достижении крайних положений штока. Блок гидроцилиндров берется в разделе Hydraulic Cylinders.

Модель блока гидроцилиндра двухстороннего действия основана на следующих допущениях: отсутствуют утечки жидкости; нагрузка на штоке гидроцилиндра, например инерция, сцепление, жесткость и так далее, пренебрежимо малы. В случае необходимости можно легко учесть их, подсоединяя соответствующий конструктивный блок, как, например, показано на рис. 6. Так, в модель гидроцилиндра добавлен жесткий стоп, представляющий собой блоки колебательного звена и демпфера, которые вступают в работу, когда поршень гидроцилиндра доходит до одного из крайних положений. Кроме того, для моделирования трения между подвижными частями в гидравлическом цилиндре воспользуемся блоком

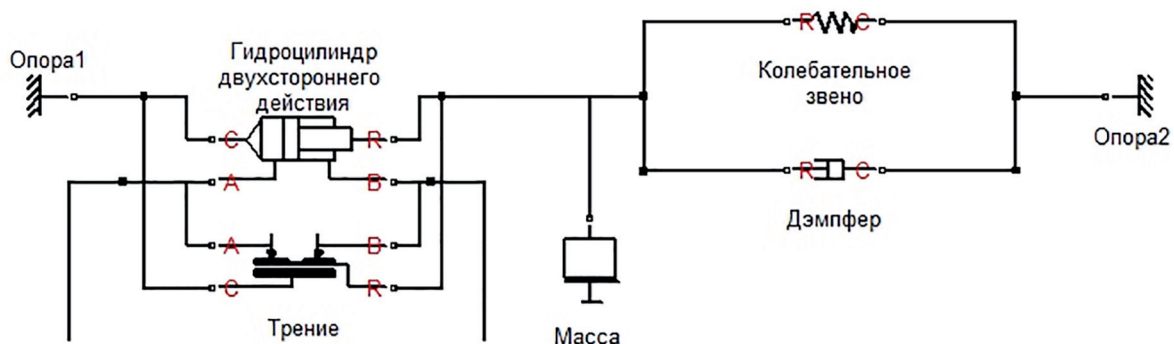


Рис. 6. Моделирование исполнительного механизма (силовой гидроцилиндр)

трения в гидроцилиндре. Этот блок предназначен для использования в комбинации с цилиндрами одностороннего или двухстороннего действия. Он определяется следующими уравнениями [14]:

$$F = F_C [1 + (K_{brk} - 1) \exp(-c_v |v|)] \text{sign}(v) + f_{vfr} v, \\ F_C = F_{pr} + f_{cfr} (p_A - p_B),$$

где  $F_C$  – сила трения Кулона;  $F_{pr}$  – предварительная нагрузка;  $f_{cfr}$  – коэффициент трения Кулона;  $p_A, p_B$  – давления в поршневой и штоковой полостях цилиндра;  $K_{brk}$  – отрывной коэффициент;  $c_v$  – коэффициент;  $v$  – относительная скорость;  $f_{vfr}$  – коэффициент вязкого трения.

Блок трения содержит два механических порта  $R$  и  $C$ , которые связаны со штоком и гильзой силового гидроцилиндра, соответственно, а также два порта  $A$  и  $B$ , соединенных с поршневой и штоковой полостями гидроцилиндра, как показано на рис. 6. Сила трения  $F$  всегда направлена противоположно движению поршня.

В среде MATLAB Simulink гидроцилиндр, как и в реальном механизме, необходимо закрепить и нагрузить массой, которую он будет перемещать. Это осуществляется вводом в модель блока «Масса», который симулирует

нагрузку массой 50 кг. Все необходимые элементы для этого можно найти в разделе Foundation Library/Mechanical. Абсолютно жесткое крепление гидроцилиндра создаем блоком Опора («земля»), который соединим с портом  $C$  гидроцилиндра. К штоку подключим массу и демпфер путем соединения их блоков с портом  $R$  гидроцилиндра. Схема модели силового гидроцилиндра представлена на рис. 6.

В итоге структурная схема рассматриваемого гидропривода будет выглядеть, как показано на рис. 7. В ней присутствует следующее.

Свойства рабочей жидкости, циркулирующей в рассматриваемой гидросистеме, представлены уравнениями, определяющими функционирование большинства блоков схемы, моделирующих гидравлические аппараты. К ним относятся такие показатели, как кинематический коэффициент вязкости, плотность, модуль объемной упругости жидкости, относительное содержание нерастворенного газа. Для задания свойств рабочей жидкости к каждому обособленному гидравлическому контуру на схеме моделирования должен быть подсоединен один из блоков, моделирующих свойства гидравлических жидкостей. Блок свойств гидравлических жидкостей находит-

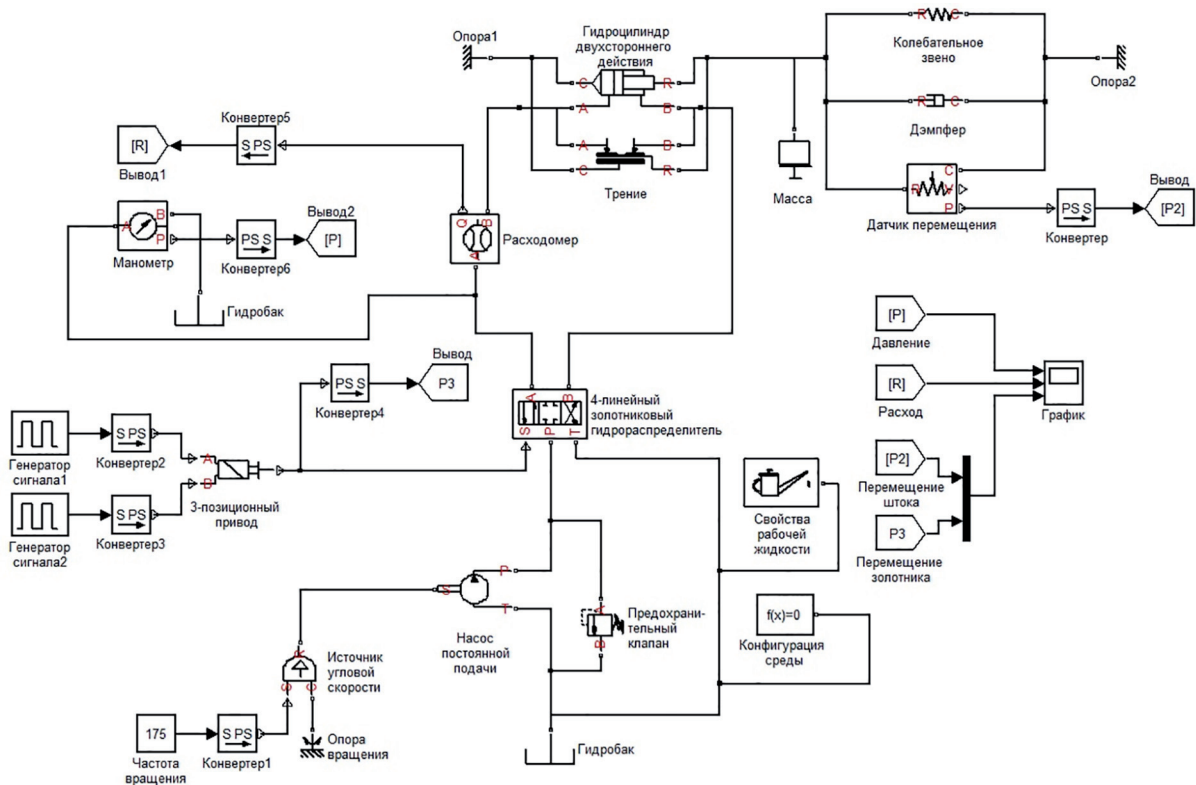


Рис. 7. Общая структурная модель гидравлической системы с датчиками

ся в разделе Hydraulic библиотеки Foundation Library и позволяет через диалоговое окно непосредственно вводить основные параметры и характеристики рабочей жидкости [3, 12, 14]. Блок типовых гидравлических жидкостей располагается в той же библиотеке Simulink и через диалоговое окно позволяет выбрать марки рабочей жидкости, которые представлены в базе данных вычислительной системы, а также установить рабочую температуру жидкости и относительное содержание нерастворенного газа. При этом значения кинематического коэффициента вязкости, плотности и модуля объемной упругости жидкости устанавливаются автоматически и отображаются в соответствующих полях диалогового окна в качестве справочной информации [14].

В имитационной модели каждый блок, определяющий работу любого гидравлического механизма, должен быть соединен в любом месте с блоком «Конфигурация среды» из библиотеки Utilities. Блок «Конфигурация среды» определяет настройки параметров решателя для моделирования блочной диаграммы SimHydraulics.

Для контроля результатов расчета выведем на один график сигналы о перемещении золотника гидрораспределителя и штока силового гидроцилиндра. Кроме того, важно следить, как изменяется расход рабочей жидкости через золотник гидрораспределителя и давление в рабочей полости силового гидроцилиндра.

Для того чтобы не загромождать структурную схему, воспользуемся блоками Goto и From из раздела библиотеки Simulink – Signal Routing.

Для вывода показаний давления в поршневой полости гидроцилиндра возьмем датчик давления (манометр) и подсоединим его к линии подачи жидкости в поршневую полость гидроцилиндра *A*, а другой конец подсоединим к блоку гидробака. Затем сигнал отправляем через конвертер, настроенный на МПа на блок Goto.

Подобным образом обстоит дело и с датчиком перемещения, который регистрирует движение штока гидроцилиндра. Одним концом присоединяем его к штоку *R*, а другим – к блоку «Опора». Конвертер настраиваем на метры.

Датчик расхода рабочей жидкости необходимо встроить в линию подачи жидкости в поршневую полость гидроцилиндра *A*, таким образом, чтобы весь расход жидкости проходил через него [13].

## Результаты исследования и их обсуждение

Проведя расчет и проанализировав полученные из рис. 8 графики, можно увидеть, что имитационная модель работает адекватно. Так, из графиков видно, что при открытии и перемещении золотника гидрораспределителя вправо (позиция золотника находится в положительной зоне графика перемещения), давление и расход рабочей жидкости резко возрастают, и шток гидроцилиндра начинает перемещаться. При выдвигании штока на 0,4 м, давление изменяется в диапазоне 0...0,9 МПа. При этом в начальный момент времени расход жидкости постоянен и составляет 0,875 л/с (определяется подачей насоса). При достижении штоком крайнего положения и наезде на жесткий стоп, давление возрастет до максимального значения 5,06 МПа, что обусловлено установкой предохранительного клапана в системе, а расход, соответственно, падает до нуля. Шток гидроцилиндра останавливается. При этом наблюдается переходный режим, выражающийся в небольших колебаниях позиции штока гидроцилиндра, величины давления и расхода рабочей жидкости, которые быстро затухают.

При перемещении золотника влево (позиция золотника находится в отрицательной

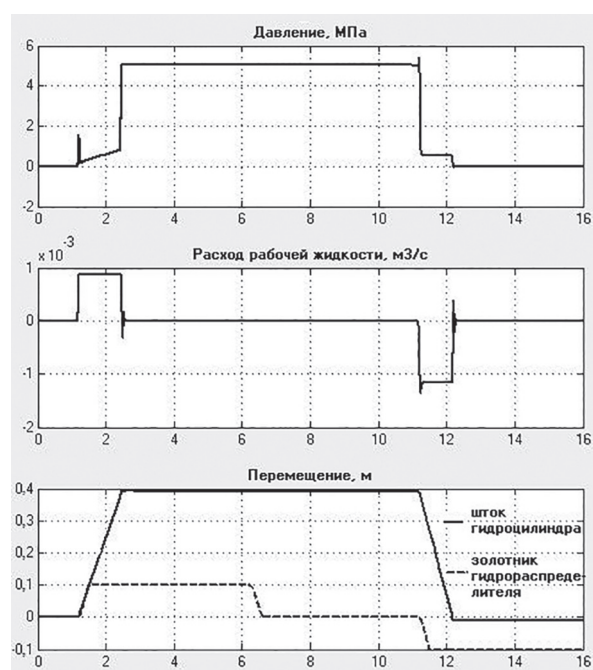


Рис. 8. Графики изменения давления, расхода рабочей жидкости и перемещений штока гидроцилиндра и золотника гидрораспределителя

зоне графика перемещения) давление резко убывает и шток гидроцилиндра начинает обратное движение. При этом расход рабочей жидкости в период времени 11...12,5 с постоянен и составляет –1,15 л/с, а величина давления находится в диапазоне 0,50...0,55 МПа. Отрицательное значение расхода говорит о том, что направление движения рабочей жидкости изменилось на обратное, то есть жидкость из полости гидроцилиндра идет на слив. Разница величин расхода рабочей жидкости при выдвигании и уборке штока объясняется различием площадей поршня в штоковой и бесштоковой полостях гидроцилиндра. При уборке штока скорость поршня определяется расходом, поступающим от насоса, а контролируемый расход – это расход, вытесняемый из бесштоковой полости, то есть контролируемый расход жидкости увеличивается. В момент остановки штока также наблюдаются колебания позиции штока гидроцилиндра, давления и расхода жидкости, которые быстро затухают.

### Выводы

На основе разработанной модели объемного гидропривода были построены графики изменения давления, расхода жидкости, перемещения штока гидроцилиндра и золотника гидрораспределителя, проведен анализ переходных режимов гидросистемы, определены диапазоны варьирования выбранных факторов.

Таким образом, разработана имитационная модель объемного гидропривода на базе стандартных библиотек вычислительной системы MATLAB Simulink, в которой были учтены: изменение модуля упругости жидкости в зависимости от давления в гидросистеме, параметры рабочей жидкости, жесткий стоп при достижении крайних положений штоком гидроцилиндра, трение между подвижными частями в силовом гидроцилиндре. Программа позволяет моделировать управляющие сигналы, подаваемые на блок управления приводом, имитировать нагрузку, действующую на шток гидроцилиндра, проводить демонстрацию в виде графиков и осциллограмм, упрощает анализ переходных процессов в гидросистеме, а также позволяет подбирать рациональные конструктивные параметры составляющих элементов объемного гидропривода на этапе проектирования. Кроме того, разработанная модель может служить базой для моделирования более сложных по составу и функцио-

нированию гидросистем путем добавления дополнительных блоков SimHydraulics и других библиотек Simulink MATLAB.

### Литература

1. Гойдо М.Е. Проектирование объемных гидроприводов. М.: Машиностроение, 2009. 304 с.
2. Xiang Gao, Yiyong Yang, Xun Zhao, Chenfeng Li. Non-linear dynamic modelling of a switching valve driven by pulse width modulation in the hydraulic braking system of a vehicle // Proceedings of the institution of mechanical engineers part d-journal of automobile engineering. 2017. Vol. 231 issue 11. P. 1511–1529.
3. Даршт Я.А. Имитационные модели гидроаппаратов // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 3. С. 28–30.
4. Пятаев М.В. Моделирование параметров турбулизатора пневматического распределителя семян // АПК России. 2013. Т. 65. С. 55–55.
5. Попов А.Ю. Распределение воздушного потока в зоне сбрасывания лишних семян высевающего аппарата избыточного давления // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 2. С. 31–34.
6. Попов А.Ю. Исследование высевающего аппарата избыточного давления с принудительной герметизацией семенной камеры // Научный журнал КубГАУ № 68(04). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/34.pdf> (дата обращения 11.01.2018).
7. Попов А.Ю. Подача семян кукурузы пневматическим высевающим аппаратом избыточного давления // Вестник аграрной науки Дона. 2009. № 2. С. 48–53.
8. Попов А.Ю. Совершенствование конструкции пневматического высевающего аппарата избыточного давления // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2009. № 4. С. 76–79.
9. Попов А.Ю. Элементы теории пневматического высевающего аппарата избыточного давления // Вестник аграрной науки Дона. 2009. № 1. С. 22–28.
10. Анисимов А.В., Лиходед К.А. Программный комплекс моделирования гидроприводов различного назначения «Hydrocad» // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № 4. С. 21–27.
11. Даршт, Я.А., Куванов К.Е., Пузанов А.В., Холкин И.Н. Flow-3d в проектировании машиностроительной гидравлики // САПР и Графика. 2000. № 8. С. 50–55.



12. Юсупов Р.Х., Воронин Е.А., Юсупов В.Р., Котов Е.А., Овчинников Н.А. Моделирование динамики движения мобильного робота // Вестник ФГБОУ ВПО МГАУ. 2012. № 2 (53). С. 36–41.
13. Попов А.Ю. Динамическое моделирование гидравлических систем в программном комплексе Simulink // Совершенствование технических средств в растениеводстве: Межвузовский сборник научных трудов. Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2013. С. 47–55.
14. Руппель А.А., Сагандыков А.А., Коротков М.С. Моделирование гидравлических систем в MATLAB. Омск: СибАДИ, 2009. 172 с.
1. Gojdo M.E. Proektirovanie ob'emnyh gidroprivodov [Design of volumetric hydraulic drives]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 304 p.
2. Xiang Gao, Yiyong Yang, Xun Zhao, Chenfeng Li. Non-linear dynamic modelling of a switching valve driven by pulse width modulation in the hydraulic braking system of a vehicle. Proceedings of the institution of mechanical engineers part d-journal of automobile engineering. 2017. Vol. 231 issue 11. P. 1511–1529.
3. Darsht YA.A. Simulation models of hydraulic devices. Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii. 2005. No 3, pp. 28–30 (in Russ.).
4. Pyataev M.V. Modeling of parameters of a turbulator of a pneumatic seed distributor. APK Rossii. 2013. Vol. 65, pp. 55–55 (in Russ.).
5. Popov A.YU. The distribution of air flow in the drop zone of excess seeds of the sowing device of excess pressure. Traktory i sel'hozmashiny. 2016. No 2, pp. 31–34 (in Russ.).
6. Popov A.YU. Issledovanie vysevyayushchego apparata izbytochnogo davleniya s prinuditel'noj germetizacijей semennoj kamery. Nauchnyj zhurnal KubGAU No 68(04) (in Russ.). URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/34.pdf> (data obrashcheniya 11.01.2018).
7. Popov A.YU. Feeding of corn seeds with pneumatic sowing device of excess pressure. Vestnik agrarnoj nauki Dona. 2009. No 2, pp. 48–53 (in Russ.).
8. Popov A.YU. Improving the design of the pneumatic sowing device of excess pressure. Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. 2009. No 4, pp. 76–79 (in Russ.).
9. Popov A.YU. The elements of the theory of pneumatic sowing device of excess pressure. Vestnik agrarnoj nauki Dona. 2009. No 1, pp. 22–28 (in Russ.).
10. Anisimov A.V., Lihoded K.A. The program complex for modeling hydraulic drives of various purposes «Hydrocad». Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2010. No 4, pp. 21–27 (in Russ.).
11. Darsht, YA.A., Kuvanov K.E., Puzanov A.V., Holkin I.N. Flow-3d in the design of machine-building hydraulics. SAPR i Grafika. 2000. No 8, pp. 50–55 (in Russ.).
12. YUusupov R.H., Voronin E.A., YUusupov V.R., Kotov E.A., Ovchinnikov N.A. Modeling the movement dynamics of a mobile robot. Vestnik FGBOU VPO MGAU. 2012. No 2(53), pp. 36–41 (in Russ.).
13. Popov A.YU. Dynamic modeling of hydraulic systems in the Simulink software complex. Sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv v rastenievodstve: Mezhhuzovskij sbornik nauchnyh trudov [Perfection of technical facilities in the plant growing: Interuniversity collection of scientific works]. Zernograd: FGBOU VPO ACHGAA, 2013, pp. 47–55 (in Russ.).
14. Ruppel' A.A., Sagandykov A.A., Korytov M.S. Modelirovanie gidravlicheskih sistem v MATLAB [Modeling of hydraulic systems in MATLAB]. Омск: СибАДИ Publ., 2009. 172 p.

## References