

С. А. СМЕРНОВ, Н. А. ГОРШКОВА

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОПРИВОДОВ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОПРИВОДА ПОДЪЁМНО-МАЧТОВОГО УСТРОЙСТВА

*Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярёва*

*Классический подход к проектированию гидроприводов включает в себя сложные расчёты и реальные испытания, что является ресурсоёмким процессом. Сократить затраты на проектирование позволяет внедрение в разработку имитационного моделирования и CAD/CAM/CAE/PDM комплексов автоматизации производственного цикла предприятий. Моделирование позволяет в едином ключе на системной основе использовать методологические достижения теории и практики гидроавтоматики для проектирования гидроустройств, накапливать в упорядоченной форме опыт проектирования и обеспечивать модельное сопровождение жизненного цикла этой продукции. В статье рассматривается современный подход к проектированию гидроприводов. Приведён пример предварительной оценки характеристик гидропривода на примере гидропривода подъёмно-мачтового устройства. На основе требований к подъёмно-мачтовым устройствам выбрана принципиальная и расчётная схемы гидропривода, а также составлена математическая модель. На основе математической модели разработана имитационная модель привода, состоящая из нескольких отдельных частей, связанных между собой. Части представляют собой смешенную структуру из блоков, которые описывают процессы в механических и гидравлических системах. Для визуального отображения создана анимированная 3D модель, которая позволяет наблюдать за ходом и результатами моделирования. В процессе расчётов получены графики зависимости положения каждого звена подъёмно-мачтового устройства от времени, а также давления и расхода на предохранительном клапане. Исходя из результатов моделирования, сделан вывод об адекватности применения моделей для оценки характеристик проектируемого гидропривода в первом приближении. Подобные модели рекомендуется разрабатывать использовать на этапах эскизного и технического проектирования.*

**Ключевые слова:** *подъёмно-мачтовое устройство, математическая модель, имитационная модель.*

### Введение

Применение в боевых действиях современной техники ставит задачу своевременного обнаружения сил противника. Решением является создание комплексов наблюдения, включающих устройства подъёма радиоэлектронной аппаратуры на определённую высоту над корпусом подвижного объекта. Разновидностью таких устройств является подъёмно-мачтовое устройство.

Подъёмно-мачтовое устройство (ПМУ) представляет собой перископический электроили гидроцилиндр, приводимый в действие приводом. На последнем звене цилиндра, которое имеет наименьший диаметр, устанавливается всевозможное радиоэлектронное оборудование (РЭО) и т. п.

В современном проектировании гидроприводов и комплексов, включающих гидроприво-

ды, всё чаще используется моделирование. Модели позволяют частично отойти от реальных экспериментов, распространённых ранее. Кроме того, использование моделей открывает возможности по быстрой оценке характеристик проектируемых объектов и изделий даже при внесении таких крупных изменений как смена типа приводов [1, 3].

Предварительные расчёты подъёмно-мачтового устройства и его привода будут проводиться в соответствии с последовательностью:

1. Разработка принципиальной и расчётной схемы гидропривода;
2. Составление математической модели гидропривода;
3. Построение имитационной модели гидропривода и получение результатов расчётов;
4. Построение трёхмерной модели подъёмно-мачтового устройства.

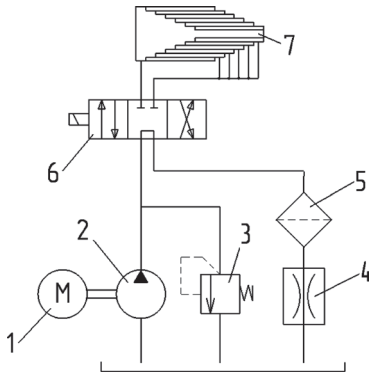


Рис. 1. Гидравлическая принципиальная схема: 1 – двигатель; 2 – нерегулируемый насос; 3 – предохранительный клапан; 4 – нерегулируемый дроссель; 5 – фильтр; 6 – гидрораспределитель; 7 – перископический гидроцилиндр

### Выбор принципиальной схемы гидропривода

Для выбора гидравлической принципиальной схемы необходимо сформулировать требования к ПМУ, управляемому гидроприводом. В общем случае к ПМУ должно обеспечивать подъём и опускание установленного на него оборудования, а также удержание его на определённой высоте.

Исходя из этих требований, составляется гидравлическая принципиальная схема (рис. 1).

Гидропривод, соответствующий данной схеме обеспечивает выполнение поставленных задач и содержит минимально необходимый набор гидравлических элементов [5, 6].

На основе принципиальной гидравлической схемы составляется расчётная схема гидропривода (рис 2). На ней обозначается направление потока рабочей жидкости и расход сжимаемости, возникающий в трубопроводах и полостях гидроцилиндра [2].

### Математическая модель гидропривода

Математическая модель состоит из множества уравнений, однако стоит отметить основные из них, которые являются топологическими [8, 9].

Согласно расчетной схеме на рис. 2, записывается уравнение неразрывности потока для гидролиний.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = 0, \\ Q_H = Q_{кл} + Q_{гц1} + Q_{гц2} + Q_{ф} + Q_{сж1} + \\ + Q_{сж2} + Q_{сж3} + Q_{сж4} + Q_{сжгц1} + Q_{сжгц2}, \end{cases} \quad (1)$$

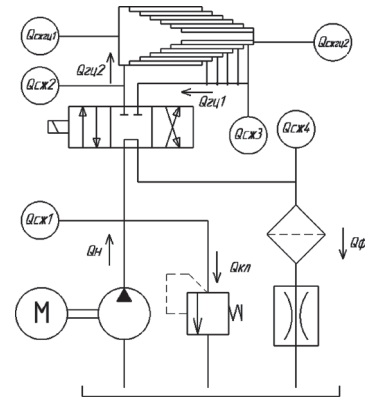


Рис. 2. Расчётная схема гидропривода

где  $Q_H$  – расход насоса;  $Q_{гц1}$  и  $Q_{гц2}$  – расход, идущий на гидроцилиндры;  $Q_{кл}$  – расход через клапан;  $Q_{сж1-4}$  – расход сжимаемости в трубопроводах;  $Q_{сжгц1}$  и  $Q_{сжгц2}$  – расход сжимаемости поршневой и штоковой областях гидроцилиндра соответственно.

Математическая модель источника вращения будет учитывать общее свойство всех электродвигателей, не зависимо от их конструкции, и описываться следующим уравнением:

$$\omega = \omega_0 - Mk, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вала двигателя;  $\omega_0$  – номинальная угловая скорость вала двигателя;  $M$  – крутящий момент сопротивления;  $k$  – коэффициент по моменту.

Поршень в гидроцилиндре движется под действием силы, которую можно определить по уравнению (3).

$$F = pA - (F_{тр} + F_{пр} + F_{ин}), \quad (3)$$

где  $p$  – давление в гидроцилиндре;  $A$  – площадь поршня;  $F_{тр}$  – сила трения;  $F_{пр}$  – сила противодействия;  $F_{ин}$  – сила инерции подвижных частей.

### Имитационная модель гидропривода

Укрупнённые части модели (рис. 3) представлены в виде subsystem [4]. Они имеют входные, выходные и общие порты для соединения в единую модель.

Subsystem элементов гидропривода создана с учётом уравнения (1). Современные гидроприводы имеют множество элементов для получения требуемых характеристик. Имитационная модель элементов гидропривода (рис. 4) учитывает сжимаемость жидкости и потерю давления в трубопроводе [7].

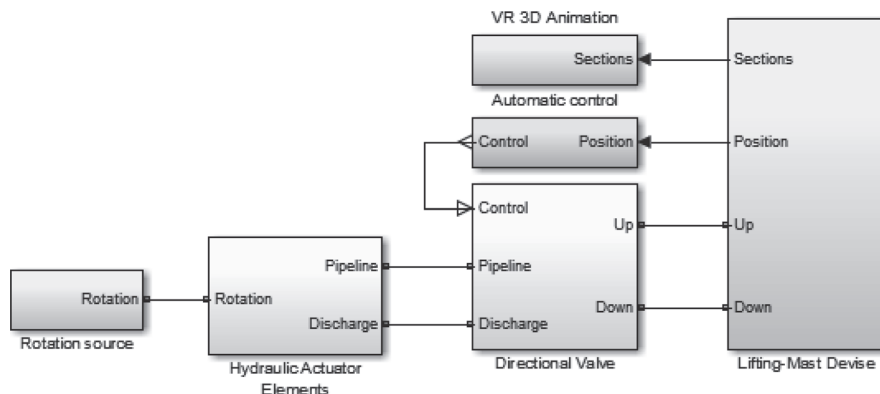


Рис. 3. Имитационная модель гидропривода: *Rotation source* – источник вращения; *Hydraulic Actuator Elements* – элементы гидропривода; *Directional Valve* – гидрораспределитель; *Lifting-Mast Device* – перископический гидроцилиндр; *Automatic control* – система автоматического управления (САУ) с микроконтроллером; *VR 3D-Animation* – трёхмерная модель подъёмно-мачтового устройства

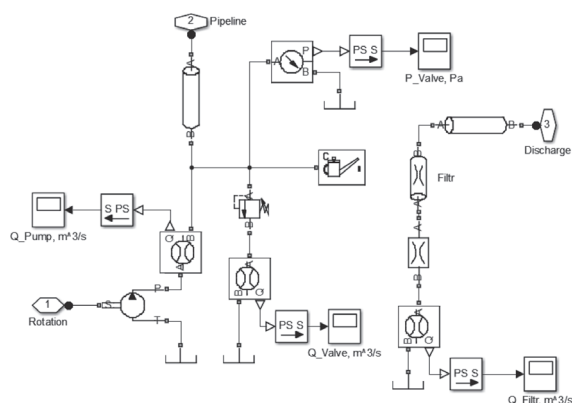


Рис. 4. Субсистема «Hydraulic Actuator Elements»

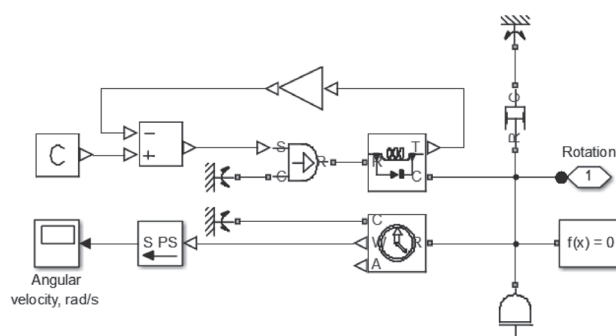


Рис. 5. Субсистема «Rotation source»

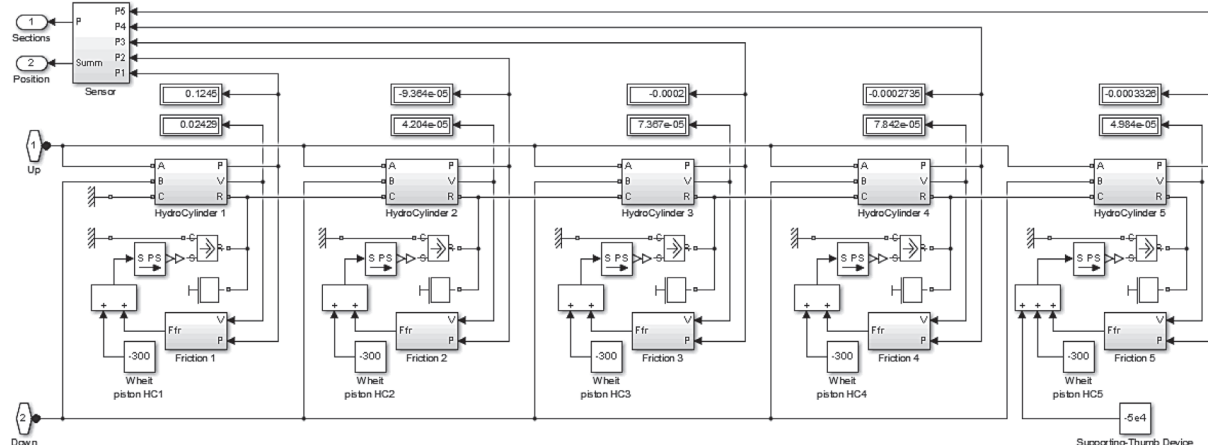


Рис. 6. Субсистема «Lifting-Mast Device»

Для обеспечения вращения насоса используется модель двигателя, учитывающая демпфирование вращательного движения и инерцию движущихся частей. Демпфирование, инерция движущихся частей и сопротивление жидкости в насосе создают крутящий момент сопротивления, направленный противоположно крутящему моменту, создаваемому двигателем.

Модель двигателя (рис. 5) создана на основе уравнения (2).

Имитационная модель перископического гидроцилиндра (рис. 6) состоит из пяти моделей гидроцилиндров и создана с учётом уравнения (3). Каждая модель представляет собой пару цилиндр-шток, шток гидроцилиндра большего радиуса является корпусом сле-

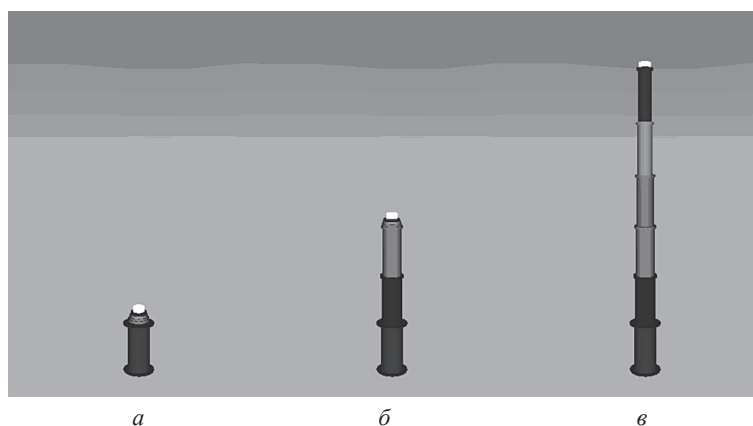


Рис. 7. 3D модели подъёмно-мачтового устройства: *а* – полностью свёрнутое ПМУ; *б* – ПМУ с двумя развёрнутыми звеньями; *в* – полностью развёрнутое ПМУ

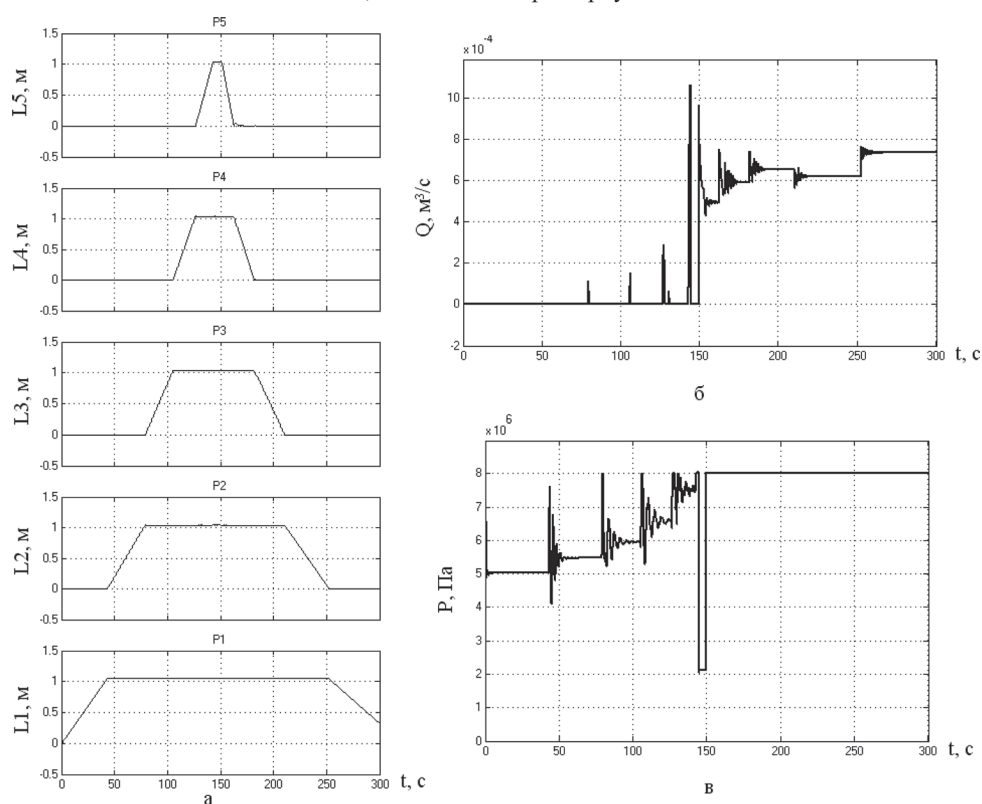


Рис. 8. Графики: *а* – положение каждого звена перископического гидроцилиндра; *б* – расход на клапане; *в* – давление на клапане

дующего за ним гидроцилиндра меньшего радиуса.

Основными исходными данными гидропривода для расчёта модели являются: номинальная скорость вращения вала двигателя 230 рад/с; коэффициент обратной связи по моменту для двигателя 1,2; рабочий объём насоса  $5 \cdot 10^{-6}$  м³/с; диаметры ступеней гидроцилиндра 0,22 м, 0,2 м, 0,17 м, 0,15 м, 0,13 м; ход всех ступеней гидроцилиндра 1 м; площадь сечения открытого канала гидрораспределителя  $1,2 \cdot 10^{-2}$  м²; давление, при котором клапан полностью открыт

$8 \cdot 10^6$  Па; площадь сечения дросселя  $1 \cdot 10^{-4}$  м²; трение в гидроцилиндре от 3200 Н до 4000 Н; внешняя нагрузка 500 кг.

### Результаты моделирования

Результатом моделирования являются анимированная 3D-модель, созданная subsystemой «VR 3D-Animation» (рис. 7), графики положения звеньев перископического цилиндра для развёртывания/свёртывания (рис. 8, *а*), график расхода (рис. 8, *б*) и давления (рис. 8, *в*) на предохранительном клапане.

### Заключение

В работе была представлена методика проектирования гидроприводов на примере гидропривода ПМУ. Разработана принципиальная и расчётная схемы гидропривода ПМУ, составлена математическая модель гидропривода, построена имитационная модель гидропривода и трёхмерная модель перископического цилиндра.

Исходя из результатов моделирования, можно сказать, что модели гидроприводов дают возможность получить объективные данные о реальных приводах. Данную методику рекомендуется применять для проектирования гидроприводов на этапе эскизного и технического проекта для предварительной оценки характеристик привода.

### Литература

1. **Архипова О. А. Даршт Я. А. Моисеенко В. Б.** Практикум моделирования гибридных систем (учебное пособие по курсу: «Компьютерные технологии в машиностроении»). – Ковров: КГТА, 2015. – 61 с.
2. **Даршт, Я. А.** Гидроприводы станков: методические указания к выполнению курсовой работы / Я. А. Даршт, А. М. Филиппов, И. Н. Холкин. – Ковров: КГТА, 2010. – 36 с.
3. **Даршт, Я. А.** Моделирование движения механических элементов гидропневмоустройств: учеб. пособие / Я. А. Даршт, А. Н. Кочнев, С. А. Смирнов. – Ковров: ФГБОУ ВО «КГТА им. Дегтярева», 2017. – 80 с.
4. **Дьяконов В. П.** Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Основы применения. Серия: Библиотека профессионала. – М.: Солон-Пресс, 2008. – 800 с. – ISBN 978-5-91359-042-8
5. **Задачник** по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводу; под ред. Б. Б. Некрасова. – М.: Высш. шк., 1989.
6. **Коваль П. В.** Гидравлика и гидропривод горных машин: Учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы». – М.: Машиностроение, 1979. – 319 с, ил.
7. **White, F. M.** Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, 1991.
8. **D. Dott. Ing.** Alvin Anthony Modeling and Analysis of Hydraulic Load Sensing Strategies in Off Highway Equipment, 2004.
9. **I. J. Karassic, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald,** Pump Handbook, Third edition, McGraw-Hill, NY, 2001.

### References

1. **Arhipova O. A. Darsht Ja. A. Moiseenko V. B.** Praktikum modelirovanija gibridnyh sistem (uchebnoe posobie po kursu: «Komp'yuternye tehnologii v mashinostroenii»). – Kovrov: KGTA, 2015. – 61 s.
2. **Darsht, Ja. A.** Gidropriyvody stankov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniju kursovoj raboty / Ja. A. Darsht, A. M. Filippov, I. N. Holkin. – Kovrov: KGTA, 2010. – 36 s.
3. **Darsht, Ja. A.** Modelirovanie dvizheniya mehanicheskikh jelementov gidropnevmooustrojstv: ucheb. posobie / Ja. A. Darsht, A. N. Kochnev, S. A. Smirnov. – Kovrov: FGBOU VO «KGTA im. Degtjareva», 2017. – 80 s.
4. **D'jakonov V. P.** Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Osnovy primeneniya. Seriya: Biblioteka professionala. – M.: Solon-Press, 2008. – 800 s. – ISBN 978-5-91359-042-8.
5. **Zadachnik** po gidravlike, gidravlicheskim mashinam i gidropriyvodu; pod red. B. B. Nekrasova. – M.: Vyssh. shk., 1989.
6. **Koval' P. V.** Gidravlika i gidropriyvod gornyh mashin: Uchebnik dlja vuzov po special'nosti «Gornye mashiny i komplekсы». – M.: Mashinostroenie, 1979. – 319 s, il.
7. **White, F. M.,** Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, 1991.
8. **D. Dott. Ing.** Alvin Anthony Modeling and Analysis of Hydraulic Load Sensing Strategies in Off Highway Equipment, 2004.
9. **I. J. Karassic, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald,** Pump Handbook, Third edition, McGraw-Hill, NY, 2001.

Поступила  
11.07.2017

После доработки  
09.11.2017

Принята к печати  
15.12.2017

*Smirnov S. A., Gorshkova N. A.*

## THE METHOD OF DESIGNING HYDRAULIC DRIVES ON THE EXAMPLE OF A HYDRAULIC DRIVE OF A LIFTING-MAST DEVICE

*The Kovrov State Technological Academy named after V. A. Degtyarev*

*The classical approach to the design of hydraulic drives includes complex calculations and real tests, which is a resource-consuming process. Reduce the cost of design allows the introduction of the development of simulation modeling and CAD / CAM / CAE / PDM automation complexes of the production cycle of enterprises. Modeling allows us to use systematic basis methodological achievements of the theory and practice of hydroautomatics for the design of hydraulic devices to accumulate in the orderly form design experience and provide model support for the life cycle of these products. The article deals with the modern approach to the design of hydraulic drives. A type of a preliminary evaluation of hydraulic drive characteris-*

tics is given in the example of a hydrodrive of a lifting and mast device. The principle and design schemes of the hydraulic drive are chosen, and a mathematical model is compiled on the basis of the requirements for hoisting and mast devices. A simulation model of the drive is developed on the basis of the mathematical model, consisting of several separate parts connected together. Parts represent a mixed structure of blocks that describe processes in mechanical and hydraulic systems. For visual display an animated 3D model has been created that allows you to observe the progress and results of the simulation. During the calculations, the position dependence graphs of the each link of the lifting and mast device on time, as well as pressure and flow on the safety valve were obtained. Conclusion, based on the results of modeling, was made about the adequacy of the application of models for estimating the characteristics of the projected hydraulic drive in the first approximation. It is recommended to develop such models at the stages of outline and technical design.

**Keywords:** lifting-mast device, mathematical model, simulation model.



**Смирнов Сергей Андреевич** – аспирант ФГБОУ ВО «КГТА им. В. А. Дегтярёва». Инженер-конструктор ОАО «СКБ ПА». Научные интересы в области систем автоматического проектирования, систем автоматического конструирования и имитационного моделирования.

**Smirnov Sergey Andreevich** – postgraduate student, KSTA. Design Engineer of «СКБ ПА». Scientific interests in the field of CAD, CAE and simulation modeling.

**Горшкова Наталия Алексеевна** – магистрант кафедры «Гидропневмоавтоматика и гидропривод», ФГБОУ ВО «КГТА им. В. А. Дегтярёва». Инженер-программист ОАО «СКБ ПА». Научные интересы – программирование систем и комплексов, математическое моделирование.

**Gorshkova Natalia Alekseevna** – student of the Master's degree courses of the chair «Hydropneumatic Automatics and Hydraulic Drive», KSTA. Software Engineer of «СКБ ПА». Scientific interests – programming systems and complexes, mathematical modeling.