

УДК 519.86

ОБОСНОВАНИЕ АКСИОМ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ  
СТРЕЛЫ ЛЕСНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Евсиков И.Д., Попиков П.И., Камалова Н.С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический  
университет им. Г.Ф. Морозова»

E-mail: [rc@icmail.ru](mailto:rc@icmail.ru)

**Аннотация:** Современные технологии используют несколько критериев эффективности рабочих процессов гидроманипуляторов. Одними из критериев технической эффективности являются энергоемкость и снижение динамической нагруженности рабочих процессов. Себестоимость научных исследований существенно снижается за счет проведения модельных испытаний, которые основаны на известных физико-математических уравнениях. Для формулирования базовых аксиом формальной модели в работе используются уравнения движения стрелы с учетом воздействия сил инерции и податливости гидропривода. В рамках такого подхода можно моделировать, например, зависимость высокочастотных колебаний давления при использовании демпфера в поршневой и в штоковой полостях от времени или рассчитывать величину пикового давления в зависимости от диаметра дросселирующих каналов.

**Ключевые слова:** формализованная модель, уравнение движения, аксиомы формализованной модели, программный комплекс, принципы гомеостатического моделирования.

SUBSTANTIATION OF AXIOMS FOR FORMALIZED MODEL OF FORESTRY  
MANIPULATOR ARROW MOVEMENT

Evsikov I.D, Popikov P.I., Kamalova N.S.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State  
University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»

E-mail: [rc@icmail.ru](mailto:rc@icmail.ru)

**Summary:** Modern technologies use several criteria for the effectiveness of hydraulic manipulator work processes. Energy intensity and a decrease in the dynamic load of work processes are some of the criteria for technical efficiency. The cost of scientific research is significantly reduced due to model tests, that are based on well-known physi-

cal and mathematical equations. The report uses the basic equations of the arrow's motion taking into account the influence of inertia forces and the flexibility of the hydraulic drive to formulate the basic axioms of the formal model. For example, the time dependence for high-frequency pressure fluctuations with using a damper in the piston and rod cavities can be simulated in the framework of this approach. Or the peak pressure can be calculated depending on the diameter of the throttling channels.

**Keywords:** formalized model, equation of motion, axioms of a formal model, software package, principles of homeostatic modeling.

### **Введение**

При современном развитии цифровых технологий процесс принятия решения о способах модернизации технического оборудования немислим без моделирования рабочего процесса. Важной частью такого моделирования является обоснование метода модернизации рабочего процесса или конструкции технической аппаратуры, целью которого является увеличение эффективности работы.

Оценка эффективности технических разработок является сложной проблемой и отличается многоаспектностью, вариативностью и эволюционностью. Такие комплексные задачи следует решать в рамках системного подхода.

В современных технических требованиях обоснование эффективности технической системы является серьезной проблемой [1-2]. В большинстве случаев выделяют три большие группы критериев: функциональность (расширение функциональных возможностей оборудования), реализуемость предлагаемых разработок и рентабельность. Первые две укрупненные группы критериев часто сводятся к энергоемкости, а рентабельность может быть существенно повышена, если на начальном этапе вместо стендовых испытаний проводить вычислительный эксперимент с получением зависимости величины выбранного критерия эффективности от параметров конструкции технической системы или характеристик рабочего процесса, подлежащих модернизации.

#### **Общие принципы формирования гомеостатической модели**

Согласно общим научным подходам стратегия формализованного моделирования состоит из следующих этапов [3, 4]:

- создание описательной модели технической системы (главные элементы, их свойства и основные выполняемые ими операции) для изучения рабочих процессов (вербальное моделирование);
- формирование основных аксиом модели для подсистемы интерпретации

(А) (см. рис. 1), содержащей базовые аксиомы (основополагающие уравнения движения и расхода средств для механических систем), а также базы символьных выражений для реализации математических соотношений;

– определение правил конструирования формальных выражений и правил ввода и вывода основных характеристик рабочего процесса для подсистемы адаптации (П) (см. рис. 1), по которым и будет формироваться принцип оптимизации рабочего процесса или структуры технической системы;

– учитывая влияние условий эксплуатации оборудования, необходимо постоянное развитие модели, в процессе которого должно сохраняться или улучшаться сходство модели с ее практической реализацией (гомоморфное отображение);

– непрерывное проведение модельного эксперимента для сравнения соответствия модели реальному процессу в рамках предложенных условий и поставленной задачи (интерпретация формализованной модели оригиналу).

Осуществить такую стратегию методами только математического (формального) моделирования невозможно, поэтому для решения задач оценки эффективности вводимой модернизации технической системы потребуется разработка формализованной модели, включающей в себя кроме перечисленных подсистем программный комплекс, собственно осуществляющий вычислительный эксперимент, обязательно содержащий подсистему для взаимодействия с исследователем (см. рис.1).

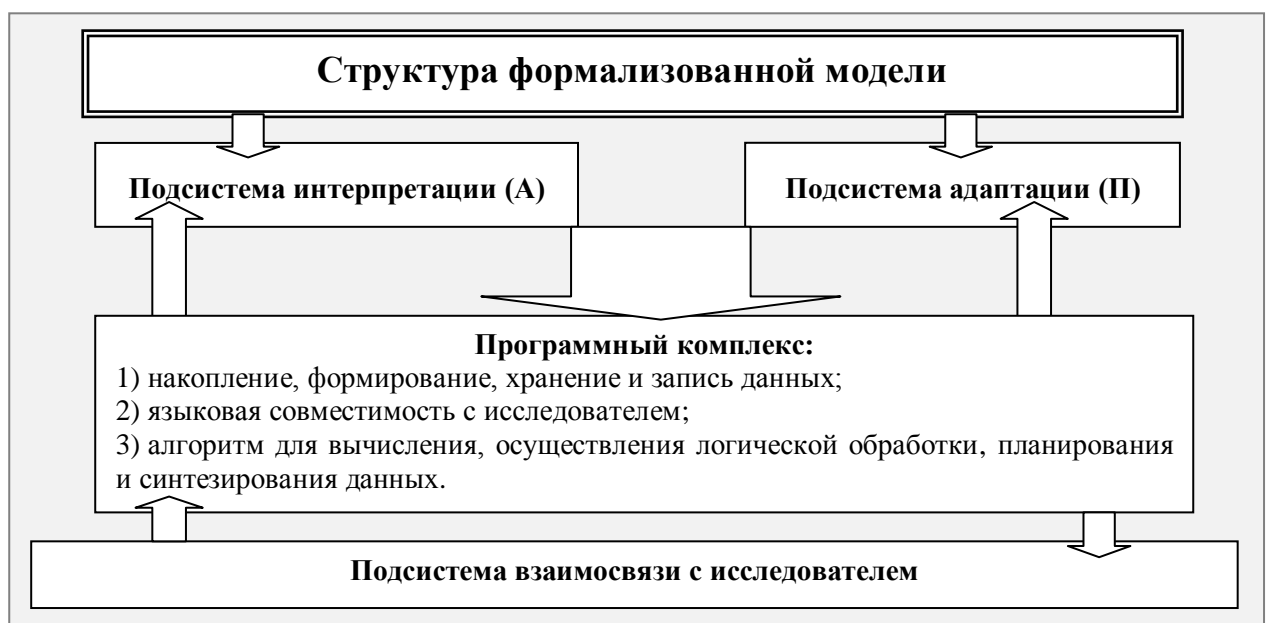


Рисунок 1 – Структура формализованной модели

В настоящей работе предлагается обоснование аксиоматики базовой формализованной модели движения стрелы лесного манипулятора с целью определения оптимального положения гидроцилиндров.

### **Обоснование критерия эффективности**

Аксиоматика модели является важной частью подсистемы интерпретации программного комплекса, поэтому она должна базироваться на фундаментальных законах природы, представлять собой систему математических соотношений, включающих в себя базовые параметры и характеристики системы. Все это должно быть обосновано с учетом внешних условий использования установки. Затем в аксиоматике осуществляется метод моделирования, параметры точности и форма результатов.

В гидросистемах конструкции лесных манипуляторов в последнее время применяют различные демпфирующие устройства [5-7], поэтому динамическая нагруженность [8-10] во многом зависит от податливости гидропривода и от компоновки гидроцилиндров подъема стрелы. Следовательно, в качестве критерия эффективности целесообразно использовать такой показатель, как снижение динамической нагруженности и энергоемкости рабочего процесса механизма подъема стрелы лесного манипулятора. Модернизация же технической системы будет осуществляться путем обоснования выбора соответствующего оптимального положения гидроцилиндров подъема стрелы. Таким образом, в модели в качестве формального параметра критерия эффективности выбираем снижение пикового давления высокочастотных колебаний в гидролинии поршневой и штыковой полости гидроцилиндра.

### **Обоснование аксиоматики модели движения стрелы манипулятора**

Расчетная схема механизма подъема стрелы манипулятора представлена на рисунке 2.

Система дифференциальных уравнений для расхода рабочей жидкости в гидроприводе и движения стрелы с учетом воздействия сил инерции и податливости гидропривода имеет вид [9]:

$$\begin{aligned}
 QK_t &= \frac{\pi d^2}{4} b_1 \sin \beta \frac{d\varphi}{dt} + a_y P + K_p \frac{dP}{dt} \\
 (J_c + ml^2) \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= \frac{\pi d^2}{4} P b_1 \sin \beta - g(ml + m_c l_n) \cos \varphi,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $Q$  – номинальная подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  
 $t$  – время, с;

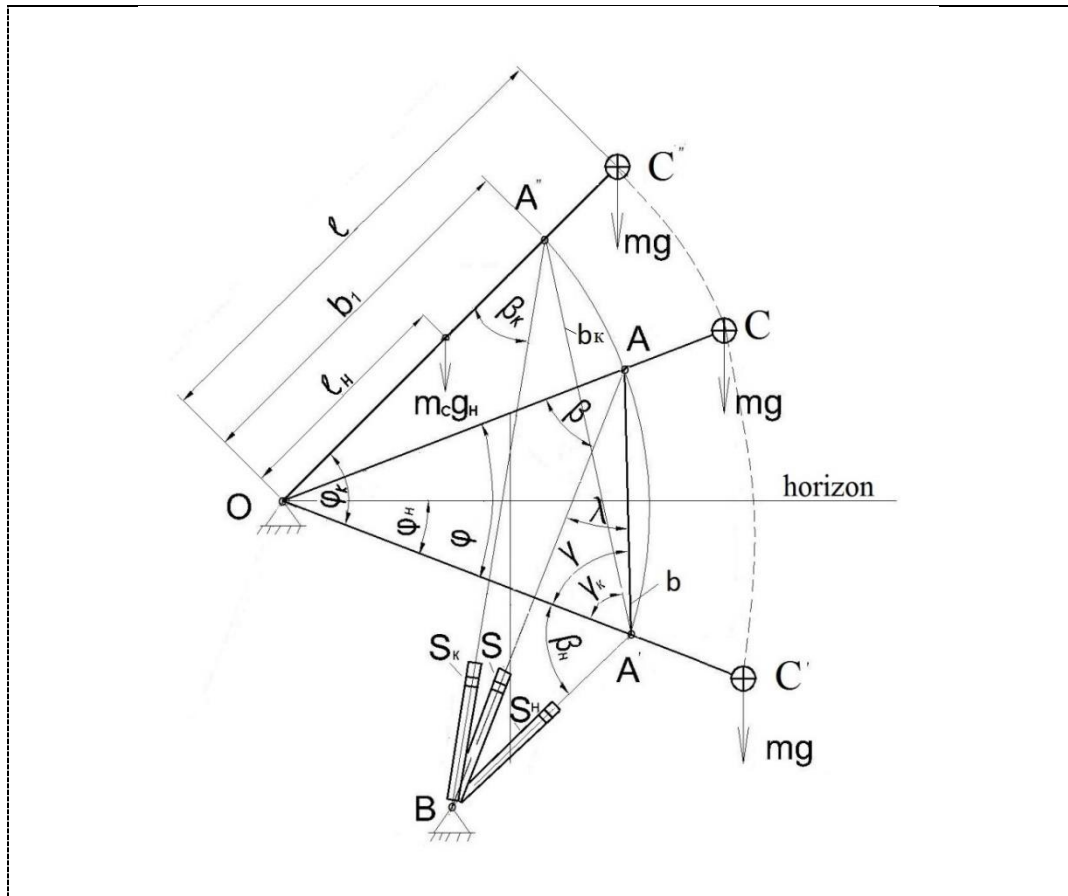


Рисунок 2 – Расчетная схема механизма подъема стрелы манипулятора

- $J_c$  – момент инерции стрелы относительно шарнира  $O$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  
 $m$  – масса пачки сортиментов,  $\text{кг}$ ;  
 $l$  – длина стреловой группы  $OC$ ,  $\text{м}$ ;  
 $g$  – ускорение свободного падения ( $9,8 \text{ м/с}^2$ );  
 $a_y$  – коэффициент, учитывающий утечки жидкости,  $\text{м}^5/\text{Н} \cdot \text{с}$ ;  
 $P$  – текущее значение давления в гидроприводе,  $\text{Па}$ ;  
 $K_p$  – коэффициент податливости гидропривода,  $\text{м}^5/\text{Па}$  (определяется по эмпирической зависимости);  
 $d$  – внутренний диаметр гидроцилиндра,  $\text{м}$ ;  
 $\varphi$  – текущий угол подъема стрелы,  $\text{град}$ ;  
 $m_c$  – масса стреловой группы,  $\text{кг}$ ;  
 $l_n$  – длина отрезка от шарнира  $O$  до центра масс стреловой группы,  $\text{м}$ ;  
 $K_t$  – коэффициент нарастания подачи рабочей жидкости до значения  $Q$ .

$$K_p = \frac{10^{-5}}{7,28P + 106}, \text{ м}^5 / \text{Па}.$$

Положение гидроцилиндра будет влиять на расстояние  $b_1$  и критическое значение угла  $\beta_k$ . В результате решения уравнений с применением модифицированного метода Эйлера были получены выражения для определения значения давления рабочей жидкости и угла подъема стрелы при последовательных итерациях  $h = \Delta t$  [10]. Таким образом, эти соотношения являются базовыми аксиомами, которые могут быть изменены вследствие изменения положения цилиндра (параметр  $b_1$ ). При этом результатом модельного эксперимента должна стать зависимость величины пикового давления  $P_{\max}$  от положения гидроцилиндра, по которой можно определить величину, например, относительного снижения или просто его минимальное значение.

В заключении хотелось бы отметить, что аксиоматика механической модели системы должна базироваться на фундаментальных законах движения и массопереноса рабочей жидкости (уравнение расхода) в гидроцилиндре. При этом постоянное развитие происходит при перемене положения цилиндра, представленного определенным символом. Кроме того, в подсистеме адаптации будет определяться известным методом зависимость давления в гидроцилиндре от времени, а программный комплекс сможет представить зависимость пикового значения давления от положения гидроцилиндра, минимальное значение которого и определит оптимальное изменение конструкции манипулятора.

Таким образом, формализованная модель позволяет без проведения стендовых испытаний обосновать конструкторские изменения механической системы с достаточной достоверностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Колычев, С. А. Стратификация задачи предсказания угрозы лесных пожаров методами системного анализа / С. А. Колычев // Физико-математическое моделирование систем : материалы 19 Международного семинара, 24 ноября 2017 г. / Воронежский государственный технический университет. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 137-140.

2 Колычев, С. А. Механизм обоснования инвестиционной стратегии на основе прогноза динамики рынка лёгких самолётов / С. А. Колычев // Управление экономическими системами : электронный научный журнал. – 2017. – № 12 (106). – С. 31.

3 Евсиков, Ф. Д. Применение формализованного моделирования сложных систем к прогнозированию пожаров / Ф. Д. Евсиков, Н. С. Камалова, В. И.

Лисицын // Развитие идей Г. Ф. Морозова при переходе к устойчивому лесопроизводству : материалы международной научно-технической юбилейной конференции, 20-21 апреля 2017 года / редкол. : М. В. Драпалюк (пред.), С. М. Матвеев (отв. ред.), М. В. Анисимов (отв. секретарь), С. Ю. Крохотина ; Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова. – Воронеж, 2017. – С. 27-30.

4 Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин / П. И. Попиков, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова, В. С. Полянин // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2015. – № 2, ч. 2 (13-2). – С. 296-300.

5 Нагруженность валочно-пакетирующей машины в режиме торможения при подъеме дерева стрелой / В. А. Александров, Н. Р. Гасымов, Р. С. Тимохов, Г. Ш. Гасымов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 2 (часть 2) – С. 205-210.

6 Posmetev, V. I. Investigation of the energy-saving hydraulic drive of a multifunctional automobile with a subsystem of accumulation of compressed air energy / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 441. – 012041. – doi : 10.1088/1757-899X/441/1/012041

7 Посметьев, В. И. Перспективная конструкция гидропривода с механизмами рекуперации энергии в лесовозном автомобиле с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 3, № 3 (25). – С. 4-12.

8 Афоничев, Д. Н. Повышение ремонтной технологичности манипуляторов сельскохозяйственного назначения / Д. Н. Афоничев, В. В. Василенко, Е. В. Кондрашова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3 (42). – С. 109-112.

9 Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование : монография / И. М. Бартенев, З. К. Емтыль, А. П. Татаренко, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров ; под ред. И. М. Бартенева. – Москва : ФЛИНТА, Наука, 2011. – 408 с.

10 Несмиянов, И. А. Динамика гидропривода погрузочного манипулятора с упругодемпфирующими связями в гидросистеме / И. А. Несмиянов, В. П. Хавронин // Современная техника и технологии. – 2016. – № 3. – URL: <http://technology.snauka.ru/2016/03/9614>.