

Энергетика и электротехника

УДК 62-85; 681.587

Математическая модель системы стабилизации золотникового распределителя с гидравлическим управлением^{*}

Г.К. Аннакулова, С.А. Саидов

Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз

Mathematical model system of stabilization of a spool valve with hydraulic control

G.K. Annakulova, S.A.Saidov

Institute of mechanics and seismic stability of structures named after. M.T. Urazbaev Uzbekistan Academy of Sciences

Предложена математическая модель системы стабилизации распределителя с гидравлическим управлением. Определена функция Ляпунова, обеспечивающая устойчивость системы. Для нахождения оптимальной стабилизирующей функции гидросистемы с помощью метода динамического программирования получено уравнение Беллмана. Установлена оптимальная стабилизирующая функция для гидрораспределителя. На основе предложенной модели стабилизации гидрораспределителя, реализованной в среде MATLAB/Simulink, получены изменения давления в системе, перемещения поршня и золотника гидрораспределителя с учетом и без учета стабилизирующей функции, которая адекватно описывает рабочий процесс гидросистемы.

EDN: VUPNVE, <https://elibrary/vupnve>

Ключевые слова: гидрораспределитель, стабилизация гидрораспределителя, золотник, поршень гидроцилиндра, динамическое программирование

The paper proposes mathematical model of stabilizing a hydraulic distributor with hydraulic control. It determines the Lyapunov function ensuring the system stability. The Bellman equation is obtained to find the optimal stabilizing function for the hydraulic system using the dynamic programming method. The optimal stabilizing function for the hydraulic distributor is established. Based on the proposed hydraulic distributor stabilization model, implemented in the MATLAB/Simulink environment, the paper provides data on alterations in pressure in the system, hydraulic distributor piston and slide valve displacements obtained with and without the stabilizing function, which adequately describes working process of the hydraulic system.

EDN: VUPNVE, <https://elibrary/vupnve>

Keywords: hydraulic distributor, hydraulic distributor stabilization, slide valve, hydraulic cylinder piston, dynamic programming

^{*} Работа выполнена за счет бюджетного финансирования Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан.

В соответствии с мировой тенденцией стабилизация гидросистем и их автоматизация становится приоритетной задачей при проектировании гидропривода [1, 2]. Среди задач оптимального управления важное место занимает стабилизация заданного движения.

В работе [1] сформулирована задача о стабилизации динамических систем для случая асимптотической устойчивости заданного движения. Это задача о построении регулирующих воздействий, которые обеспечивают устойчивое желаемое движение при наилучшем качестве переходного процесса [3, 4]. Задача о стабилизации связана с общей задачей об устойчивости движения, а методы исследования проблем оптимальной стабилизации — с классическими методами теории устойчивости Ляпунова [5].

Для стабилизации динамической или гидравлической системы необходимо решить две задачи: найти стабилизирующее управление $u(x, t) \in U$ и проверить, является ли равновесное состояние $x = 0$ системы асимптотически устойчивым при заданном управлении $u(x, t)$ [6]. Аналитические методы построения систем программного движения составляют основу синтеза динамической системы, движение которой происходит с заданными конструктивно обоснованными кинематическими свойствами, устойчиво и оптимально. Программное движение систем различных конструкций осуществляется приложением к ним дополнительных сил (управляющих моментов), изменением параметров системы в процессе движения или построением специальных управляющих устройств (регуляторов), а также сочетанием этих возможностей.

Работы [7, 8] посвящены методам нелокального синтеза систем стабилизации программных движений объекта. На основе этих методов можно создать автоматизированные подсистемы автоматического проектирования систем стабилизации программных движений нелинейных объектов, в частности гидросистем.

Для многих динамических систем используют две постановки задачи синтеза. В первой оптимальное управление ищут как функцию времени и начального состояния системы, т. е. в виде оптимального программного управления, во второй — в виде некоторой функции от текущего состояния управляемой системы и времени, т. е. в виде управления с обратной связью.

В первой постановке для решения задачи используют принцип максимума Понтрягина [8], во второй — функциональные уравнения Беллмана [9].

В работе [10] приведены основные принципы и приемы математического моделирования гидросистем управления, описаны некоторые средства стабилизации, используемые в гидроавтоматике.

В трудах [11, 12] изложены основы теории и методики расчета динамических характеристик элементов гидропривода (насосов, гидродвигателей, золотников, гидроусилителей).

Цель работы — составление математической модели системы стабилизации распределителя с гидравлическим управлением.

Рассмотрим гидросистему, состоящую из гидроцилиндра, соединенного с гидрораспределителем (рис. 1). Следящий механизм работает следующим образом. Из гидронасоса 2 через напорную линию 7 подается давление p_0 в гидрораспределитель, при движении золотника 9 вправо рабочая жидкость (РЖ) поступает в полость A из напорного патрубка 4, а рабочий поток — в полость D штоковой полости гидроцилиндра 5 по патрубку 8. Из бесштоковой полости C гидроцилиндра в полость B РЖ проходит по патрубку 3 в гидробак 1. Поршень 6 гидроцилиндра перемещается влево. Когда рычаг перемещается влево, поршень перемещается вправо. Под действием управ-

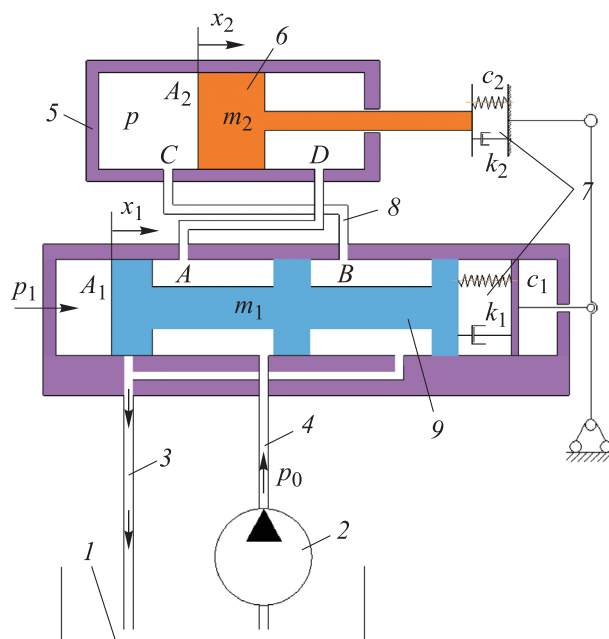


Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемой гидросистемы

ляющего давления p_1 пружины 7 переводят золотник в нейтральное положение, и подача РЖ прекращается.

Движение сервомеханизма описывается следующей системой уравнений [13]:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= p_1 A_1 - k_1 \dot{x}_1 - c_1 (x_1 - x_2); \\ m_2 \ddot{x}_2 &= p A_2 - k_2 \dot{x}_2 - c_2 x_2 - c_1 (x_1 - x_2); \\ k_p \dot{p} &= \dot{x}_2 A_2 - \mu b x_1 \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_1, m_2 и A_1, A_2 — массы и площади поперечного сечения золотника и поршня гидроцилиндра соответственно; x_1 и x_2 — перемещения золотника гидрораспределителя и поршня гидроцилиндра; k_1, k_2 и c_1, c_2 — коэффициенты демпфирования и жесткости пружин гидрораспределителя и гидроцилиндра соответственно; p_1 — давление, управляющее золотником; p и p_0 — давление в гидросистеме и напорной гидролинии; k_p — коэффициент, учитывающий упругие свойства РЖ и трубопроводов; μ — коэффициент динамической вязкости; b — ширина щели золотника, ρ — плотность РЖ.

Структурная схема гидросистемы приведена на рис. 2, где $u_{\text{вх}}$ — управляющее напряжение.

Третье уравнение системы (1) имеет нелинейный член. Линеаризуя второй член в окрестности $x_{01} = 0$, $p = 0$ при постоянных значениях давления в напорной гидролинии, запишем третье уравнение системы (1) как

$$\dot{p} = \frac{A_2}{k_p} x_2 - \frac{k_{Qp}}{k_p} p + \frac{k_3}{k_p} x_1, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} k_3 &= \mu b x_1 \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}}; \\ k_{Qp} &= \mu b x_1 \sqrt{\frac{2}{\rho p_0}}. \end{aligned}$$

С учетом соотношения (2) система уравнений (1) приобретает вид

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \frac{A_1}{m_1} p_1 - \frac{k_1}{m_1} \dot{x}_1 - \frac{c_1}{m_1} x_1 + \frac{c_1}{m_1} x_2; \\ \ddot{x}_2 &= \frac{A_2}{m_2} p - \frac{k_2}{m_2} \dot{x}_2 - \frac{c_1}{m_2} x_1 + \frac{c_1 - c_2}{m_2} x_2; \\ \dot{p} &= \frac{A_2}{k_p} x_2 - \frac{k_{Qp}}{k_p} p + \frac{k_3}{k_p} x_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Введем обозначения

$$x_1 = y_1; \quad \dot{x}_1 = y_2; \quad x_2 = y_3; \quad \dot{x}_2 = y_4; \quad p = y_5. \quad (4)$$

Тогда система уравнений (3) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= -\frac{c_1}{m_1} y_1 - \frac{k_1}{m_1} y_2 + \frac{c_1}{m_1} y_3 + \frac{A_1}{m_1} y_5; \\ \dot{y}_3 &= y_4; \\ \dot{y}_4 &= -\frac{c_1}{m_2} y_1 - \frac{k_2}{m_2} y_2 + \frac{c_1 - c_2}{m_2} y_3 + \frac{A_2}{m_2} y_5; \\ \dot{y}_5 &= \frac{A_2}{k_p} y_3 - \frac{k_{Qp}}{k_p} y_5 + \frac{k_3}{k_p} y_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Приравнявая к нулю правую часть системы уравнений (4), находим стационарные решения

$$\begin{aligned} y_2 &= 0; \quad -\frac{c_1}{m_1} y_1 - \frac{k_1}{m_1} y_2 + \frac{c_1}{m_1} y_3 + \frac{A_1}{m_1} y_5 = 0; \\ y_4 &= 0; \quad -\frac{c_1}{m_2} y_1 - \frac{k_2}{m_2} y_2 + \frac{c_1 - c_2}{m_2} y_3 + \frac{A_2}{m_2} y_5 = 0; \\ \frac{A_2}{k_p} y_3 - \frac{k_{Qp}}{k_p} y_5 + \frac{k_3}{k_p} y_1 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решая систему уравнений (6), получаем

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{c_2 k_3 x_1 (k_{Qp} c_2 - A_1 A_2)}{A_2 [A_2 (A_1 - A_2) + k_{Qp} c_2]}; \quad y_2 = 0; \\ y_3 &= \frac{c_2 k_{Qp} x_1 k_3}{A_2 [A_2 (A_1 - A_2) + k_{Qp} c_2]}; \quad y_4 = 0; \\ y_5 &= \frac{c_2 k_{Qp} x_1 k_3}{A_2 [A_2 (A_1 - A_2) + k_{Qp} c_2]}. \end{aligned} \quad (7)$$

При этом должно выполняться условие

$$A_2 (A_1 - A_2) + k_{Qp} c_2 > 0.$$

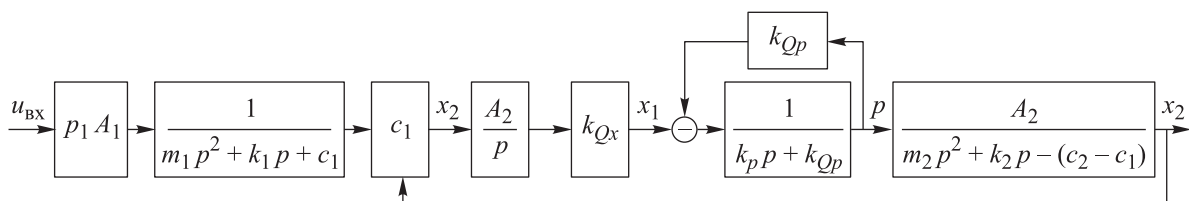


Рис. 2. Структурная схема гидросистемы

Из системы уравнений (5) путем преобразования по формулам

$$y_1 = y_{01} + z_1; \quad y_2 = y_{02} + z_2; \quad y_3 = y_{03} + z_3; \\ y_4 = y_{04} + z_4; \quad y_5 = y_{05} + z_5$$

определяем уравнения возмущенного движения системы

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2; \\ \dot{z}_2 &= a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + a_{23}z_3 + a_{25}z_5; \\ \dot{z}_3 &= z_4; \\ \dot{z}_4 &= a_{41}z_1 + a_{42}z_2 + a_{43}z_3 + a_{45}z_5; \\ \dot{z}_5 &= a_{53}z_3 + a_{55}z_5, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{13} = a_{14} = a_{15} = 0; \quad a_{12} = 1; \quad a_{21} = -\frac{c_1}{m_1}; \\ a_{22} = -\frac{k_1}{m_1}; \quad a_{23} = \frac{c_1}{m_1}; \quad a_{24} = 0; \quad a_{25} = -\frac{A_1}{m_1}; \\ a_{31} = a_{32} = a_{33} = a_{35} = 0; \quad a_{34} = 1; \quad a_{41} = -\frac{c_1}{m_2}; \\ a_{42} = -\frac{k_2}{m_2}; \quad a_{43} = \frac{c_1 - c_2}{m_2}; \quad a_{44} = 0; \quad a_{45} = \frac{A_2}{m_2}; \\ a_{51} = 0; \quad a_{52} = 0; \quad a_{53} = \frac{A_2}{k_p}; \quad a_{54} = 0; \quad a_{55} = \frac{k_{QP}}{k_p}. \end{aligned}$$

Рассмотрим вопрос об устойчивости нулевого решения системы уравнений (8). Для определения характеристического уравнения составим определитель системы (8)

$$P_\lambda = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 1 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 0 & a_{45} \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} \end{vmatrix} = 0.$$

Определители имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta_1 = 1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{21} = \frac{c_1}{m_1} > 0; \\ \Delta_3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0; \\ \Delta_4 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{43} & 0 \end{vmatrix} = \\ = a_{23}a_{41} - a_{21}a_{43} = \frac{c_1c_2}{m_1m_2} > 0; \\ \Delta_5 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 0 & a_{45} \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & 0 \end{vmatrix} > 0. \end{aligned} \quad (9)$$

При соблюдении условий (9) выполняются условия корней характеристического уравнения (8), которые имеют отрицательные вещественные части, и нулевое решение системы (5) асимптотически устойчиво.

Запишем функцию Ляпунова как

$$V = \frac{1}{2}(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2 + z_5^2).$$

В силу системы (8) определяем производную функции Ляпунова

$$\frac{dV}{dt} = z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 + z_3\dot{z}_3 + z_4\dot{z}_4 + z_5\dot{z}_5.$$

В соответствии с системой уравнений (8) имеем

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \left(1 - \frac{c_1}{m_1}\right)z_1z_2 - \frac{k_1}{m_1}z_2^2 + \frac{c_1}{m_1}z_2z_3 \\ & + \frac{A_1}{m_1}z_2z_5 + \left(1 + \frac{c_1 - c_2}{m_2}\right)z_3z_4 + \frac{A_2}{k_p}z_3z_5 + \\ & + \frac{A_2}{m_1}z_4z_5 - \frac{c_1}{m_2}z_1z_4 - \frac{k_2}{m_2}z_2z_4 - \frac{k_{QP}}{k_p}z_5^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Как видно из соотношения (10), условие

$$\frac{dV}{dt} < 0 \quad (11)$$

обеспечивается совместно с условиями Рауса — Гурвица (9).

Заметим, что при соблюдении условий (9) и (11) функция V везде положительна, а следовательно, по теореме Ляпунова возмущенное движение устойчиво.

Рассмотрим стабилизацию системы уравнений (8)

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2; \\ \dot{z}_2 &= -\frac{c_1}{m_1}z_1 - \frac{k_1}{m_1}z_2 + \frac{c_1}{m_1}z_3 + \frac{A_1}{m_1}z_5 + u; \\ \dot{z}_3 &= z_4; \\ \dot{z}_4 &= -\frac{c_1}{m_2}z_1 - \frac{k_2}{m_2}z_2 + \frac{c_1 - c_2}{m_2}z_3 + \frac{A_2}{m_2}z_5; \\ \dot{z}_5 &= \frac{A_2}{k_p}z_3 - \frac{k_{QP}}{k_p}z_5. \end{aligned} \quad (12)$$

Согласно соотношениям (7), в качестве заданной конечной точки

$$Z_* \left(\frac{c_2k_3x_1(k_{QP}c_2 - A_1A_2)}{Zn}, 0, \frac{c_2k_{QP}x_1k_3}{Zn}, 0, \frac{c_2k_{QP}x_1k_3}{Zn} \right),$$

где $Zn = A_2[A_2(A_1 - A_2) + k_{QP}c_2]$, принимаем начало координат, т. е. полагаем $Z_* = 0$.

Качество процесса управления будем оценивать функционалом [6]

$$I = \int_0^T (z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2 + z_5^2 + u^2) dt. \quad (13)$$

Определим оптимальное управление $u = u(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$, которое обеспечит перевод фазовой точки из произвольного начального состояния в начало координат так, чтобы на траекториях функционал (13) принимал наименьшее значение.

Согласно системе уравнений (8), функциональное уравнение Беллмана можно представить как [7, 9]

$$\begin{aligned} 0 = \min_u \left\{ z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2 + z_5^2 + u^2 + \frac{\partial s}{\partial z_1} z_2 + \right. \\ \left. + \frac{\partial s}{\partial z_2} \left[-\frac{c_1}{m_1} z_1 - \frac{k_1}{m_1} z_2 + \frac{c_1}{m_1} z_3 + \frac{A_1}{m_1} z_5 + u \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial s}{\partial z_3} z_4 + \frac{\partial s}{\partial z_4} \left[-\frac{c_1}{m_2} z_1 - \frac{k_2}{m_2} z_2 + \frac{c_1 - c_2}{m_2} z_3 + \frac{A_2}{m_2} z_5 \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial s}{\partial z_5} \left[\frac{A_2}{k_p} z_3 - \frac{k_{qp}}{k_p} z_5 \right] \right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

где $s = s(z)$ — неизвестная функция, подлежащая определению.

Для нахождения минимума функционала (13), продифференцируем правую часть уравнения (14) по u

$$2u + \frac{\partial s}{\partial z_2} = 0. \quad (15)$$

Из соотношения (15) получаем

$$u = -\frac{1}{2} \frac{\partial s}{\partial z_2}. \quad (16)$$

С учетом выражения (16) система уравнений Беллмана (14) принимает вид

$$\begin{aligned} z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2 + z_5^2 + u^2 + \frac{\partial s}{\partial z_1} z_2 + \\ + \frac{\partial s}{\partial z_2} \left(-\frac{c_1}{m_1} z_1 - \frac{k_1}{m_1} z_2 + \frac{c_1}{m_1} z_3 + \frac{A_1}{m_1} z_5 - \frac{1}{2} \frac{\partial s}{\partial z_2} \right) + \\ + \frac{\partial s}{\partial z_3} z_4 + \frac{\partial s}{\partial z_4} \left[-\frac{c_1}{m_2} z_1 - \frac{k_2}{m_2} z_2 + \frac{c_1 - c_2}{m_2} z_3 + \frac{A_2}{m_2} z_5 \right] + \\ + \frac{\partial s}{\partial z_5} \left(\frac{A_2}{k_p} z_3 - \frac{k_{qp}}{k_p} z_5 \right) = 0. \quad (17) \end{aligned}$$

Решение уравнения (17) будем искать в виде квадратичной формы

$$s(z) = a_1 z_1^2 + a_2 z_2^2 + a_3 z_3^2 + a_4 z_4^2 + a_5 z_5^2.$$

Частные производные функции $s(z)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial z_1} = 2a_1 z_1, \quad \frac{\partial s}{\partial z_2} = 2a_2 z_2, \\ \frac{\partial s}{\partial z_3} = 2a_3 z_3, \quad a_4 = 0, \quad \frac{\partial s}{\partial z_5} = 2a_5 z_5. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя соотношения (18) и (16) в формулу (17) и упрощая, получаем систему уравнений для определения коэффициентов $a_1, a_2, \dots, a_5$

$$\begin{aligned} a_1 - c_2 \frac{c_1}{m_1} = 0; \quad a_2^2 + 2a_2 \frac{k_1}{m_1} - 1 = 0; \\ a_3 = 0; \quad a_4 = 0; \quad 1 + 2a_5 \frac{A_2}{k_p} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Система уравнений (19) имеет два вещественных решения

$$\begin{aligned} a_1 = -\frac{c_1}{m_1} \frac{k_1 + \sqrt{k_1^2 + m_1^2}}{m_1}; \\ a_2 = -\frac{k_1}{m_1} + \frac{\sqrt{k_1^2 + m_1^2}}{m_1}; \quad a_5 = \frac{k_p}{2A_2} \end{aligned} \quad (20)$$

и

$$\begin{aligned} a_1 = \frac{c_1}{m_1} \frac{-(k_1 + \sqrt{k_1^2 + m_1^2})}{m_1}; \\ a_2 = -\left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{\sqrt{k_1^2 + m_1^2}}{m_1} \right); \quad a_5 = \frac{k_p}{2A_2}. \end{aligned} \quad (21)$$

В соответствии с выражением (16) решения (20) и (21) приводят к синтезирующей функции

$$u = \frac{k_1 - \sqrt{k_1^2 + m_1^2}}{2m_1}. \quad (22)$$

В результате имеем линейную функцию, обеспечивающую стабилизацию системы, т.е. оптимальная синтезирующая функция задана соотношением (22).

Структурная схема оптимальной гидросистемы приведена на рис. 3.

Существует много графических сред визуального моделирования, в том числе MathWorks Inc. Можно выделить программу Simulink на базе пакета программ MATLAB, используемую для построения структурных схем динамических систем [14–16].

Модели гидросистемы, разработанные на основе дифференциальных уравнений (12) и построенные в среде Simulink с учетом и без учета стабилизирующей функции u приведены на рис. 4, а и б, где x'_2 — скорость перемещения поршня.

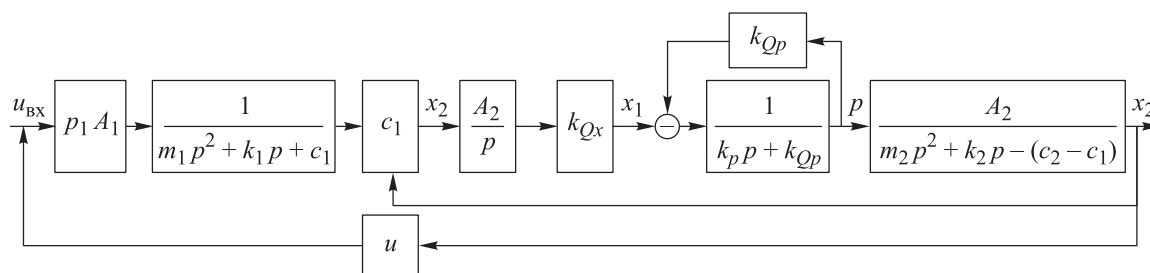


Рис. 3. Структурная схема оптимальной гидросистемы

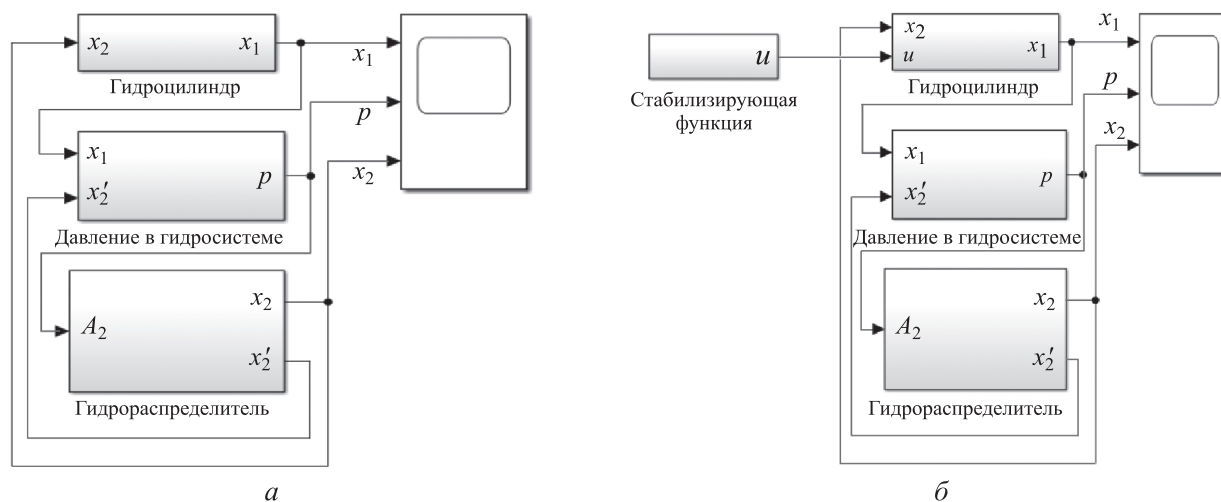
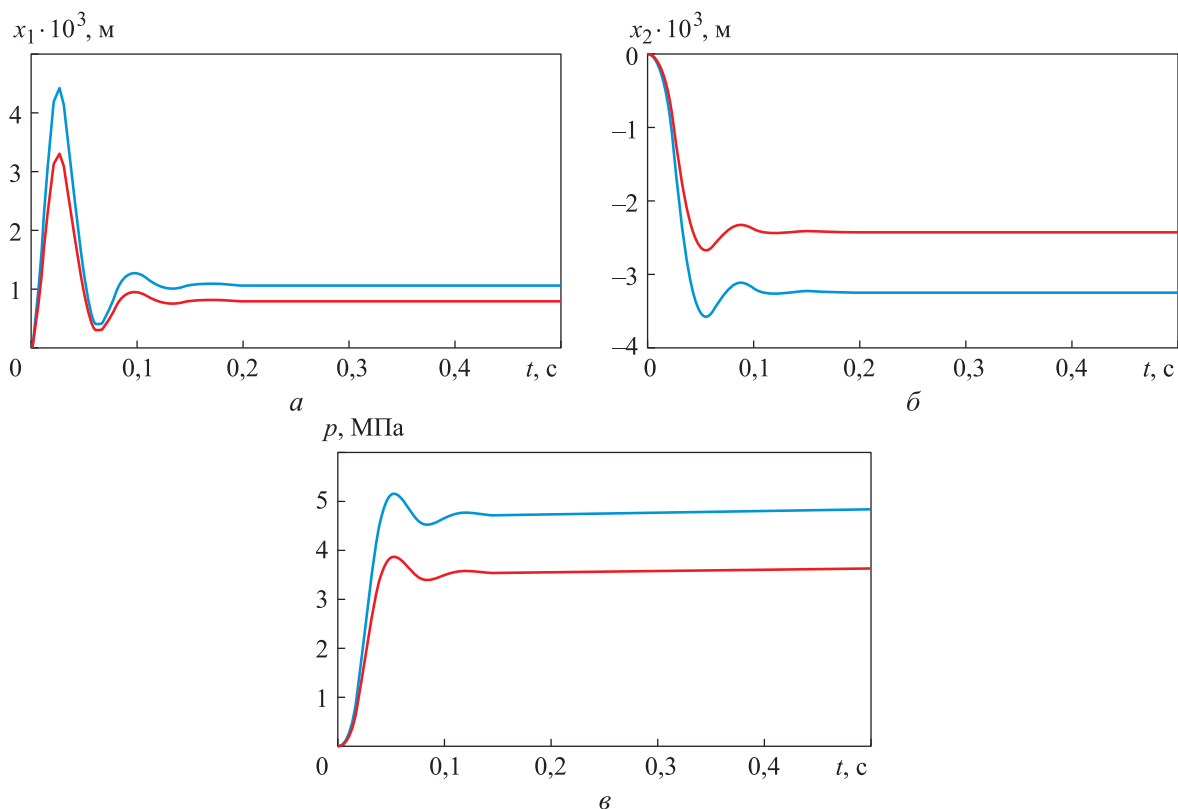


Рис. 4. Модели гидросистемы с учетом (а) и без учета (б) стабилизирующей функции

Рис. 5. Зависимости перемещений золотника x_1 (а), поршня x_2 (б) и давления в гидросистеме p (в) от времени t с учетом (—) и без учета (—) стабилизирующей функции при $k_1 = 150$ Н·м/с, $k_2 = 300$ Н·м/с, $c_1 = 18\,400$ Н·м и $c_2 = 24\,420$ Н·м

На основе предложенной модели выполнено моделирование при полном открытии щели гидрораспределителя в течение 0,5 с. Результаты моделирования в виде зависимостей перемещений золотника x_1 , поршня x_2 и давления в гидросистеме p от времени t при различных коэффициентах демпфирования и жесткостей пружин гидрораспределителя и гидроцилиндра приведены на рис. 5, а–в.

Выводы

1. Разработана математическая модель системы стабилизации гидрораспределителя. Определена функция Ляпунова, обеспечивающая устойчивость системы.
2. Для определения оптимальной стабилизирующей функции гидросистемы методом дина-

мического программирования получено уравнение Беллмана.

3. Установлена оптимальная стабилизирующая функция для гидрораспределителя, которую можно использовать для выбора корректирующих устройств (регуляторов) при проектировании и диагностировании гидросистем.

4. На основе предложенной модели системы стабилизации гидрораспределителя, реализованной в среде MATLAB/Simulink, определены изменения давления в гидросистеме, перемещений поршня гидроцилиндра и золотника гидрораспределителя с учетом и без учета стабилизирующей функции, которая адекватно описывает рабочий процесс гидросистемы.

Литература

- [1] Малкин И.Г. *Теория устойчивости движения*. Москва, Наука, 1966. 530 с.
- [2] Щербаков В.С., Жданов А.В., Меньков В.В. Структура и алгоритм системы автоматизированного проектирования гидропривода рулевого управления. *Вестник СибАДИ*, 2008, № 3, с. 89–92.
- [3] Аннакулова Г.К., Лебедев О.В. *Динамические режимы и хаотические движения элементов приводов машин*. Ташкент, ИМ и СС АН РУз, 2010. 141 с.
- [4] Ляпунов А.М. *Избранные труды. Работы по теории устойчивости*. Москва, Наука, 2007. 572 с.
- [5] Кунцевич В.М. *Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова*. Москва, Наука, 1977. 400 с.
- [6] Пятницкий Е.С. Автоматизированные подсистемы анализа и синтеза нелинейных систем управления движением. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 1990, № 5, с. 74–81.
- [7] Пятницкий Е.С. Синтез систем стабилизации программных движений нелинейных объектов управления. *Автоматика и телемеханика*, 1993, № 7, с. 19–37.
- [8] Пупков К.А., Егупов Н.Д., ред. *Методы классической и современной теории автоматического управления*. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 744 с.
- [9] Bellman R.E., Glickberg, Gross O.A. *Some aspects of the mathematical theory of control processes*. Rand Corp., 1958. 244 p.
- [10] Льюис Э., Стерн Х. *Гидравлические системы управления*. Москва, Мир, 1966. 203 с.
- [11] Гамынин Н.С. *Основы следящего гидравлического привода*. Москва, Оборонгиз, 1962. 293 с.
- [12] Гамынин Н.С. *Гидравлический привод систем управления*. Москва, Машиностроение, 1972. 376 с.
- [13] Пугатин Д.Р., Зедгенизов В.Г. Математическая модель золотникового гидрораспределителя с гидравлическим управлением. *Авиамашиностроение и транспорт Сибири. Сб. ст. XV Всерос. науч.-техн. конф.* Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2021, с. 185–189.
- [14] Васильев В.В., Симак Л.А., Рыбникова А.М. *Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/Simulink*. Киев, НАН Украины, 2008. 91 с.
- [15] Руппель А.А., Сагандыков А.А., Корытов М.С. *Моделирование гидравлических систем в Matlab*. Омск, СибАДИ, 2009. 171 с.

- [16] Даршт Я.А. Имитационные модели гидроаппаратов. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 3, с. 28–30.

References

- [1] Malkin I.G. *Teoriya ustoychivosti dvizheniya* [Theory of motion stability]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 530 p. (In Russ.).
- [2] Shcherbakov V.S., Zhdanov A.V., Menkov V.V. Structure and algorithm of automated designing system of steering hydrodrive mechanism. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2008, no. 3, pp. 89–92. (In Russ.).
- [3] Annakulova G.K., Lebedev O.V. *Dinamicheskie rezhimy i khaoticheskie dvizheniya elementov privodov mashin* [Dynamic modes and chaotic motions of machine drive elements]. Tashkent, IM i SS AN RUz Publ., 2010. 141 p. (In Russ.).
- [4] Lyapunov A.M. *Izbrannye trudy. Raboty po teorii ustoychivosti* [Selected works. Works on the theory of stability]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 572 p. (In Russ.).
- [5] Kuntsevich V.M. *Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya s pomoshchyu funktsiy Lyapunova* [Synthesis of automatic control systems using Lyapunov functions]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 400 p. (In Russ.).
- [6] Pyatnitskiy E.S. Automated subsystems of analysis and synthesis of nonlinear motion control systems. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 1990, no. 5, pp. 74–81. (In Russ.).
- [7] Pyatnitskiy E.S. Design of systems for the stabilization of programmed motions of nonlinear control plants. *Avtomatika i telemekhanika*. 1993, no. 7, pp. 19–37. (In Russ.). (Eng. version: *Autom. Remote Control*, 1993, vol. 54, no. 7, pp. 1046–1062.)
- [8] Pupkov K.A., Egupov N.D., red. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 4: Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 744 p. (In Russ.).
- [9] Bellman R.E., Glickberg, Gross O.A. *Some aspects of the mathematical theory of control processes*. Rand Corp., 1958. 244 p.
- [10] Lewis E.E., Stern H. *Design of hydraulic control systems*. McGraw-Hill, 1962. 360 p. (Russ. ed.: *Gidravlicheskie sistemy upravleniya*. Moscow, Mir Publ., 1966. 203 p.)
- [11] Gamynin N.S. *Osnovy sledyashchego gidravlicheskogo privoda* [Fundamentals of tracking hydraulic drive]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 293 p. (In Russ.).
- [12] Gamynin N.S. *Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya* [Hydraulic drive of control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 376 p. (In Russ.).
- [13] Pugatin D.R., Zedgenizov V.G. [Mathematical model of a spool hydraulic distributor with hydraulic control]. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri. Sb. st. XV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Aviation Machine Building and Transport of Siberia. Proc. XV Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU Publ., 2021, pp. 185–189. (In Russ.).
- [14] Vasilyev V.V., Simak L.A., Rybnikova A.M. *Matematicheskoe i kompyuternoe modelirovanie protsessov i sistem v srede MATLAB/Simulink* [Mathematical and computer modeling of processes and systems in MATLAB/Simulink environment]. Kiev, NAN Ukrainy Publ., 2008. 91 p. (In Russ.).
- [15] Ruppel A.A., Sagandykov A.A., Korytov M.S. *Modelirovanie gidravlicheskikh sistem v MATLAB* [Modeling of hydraulic systems in MATLAB]. Omsk, SibADI Publ., 2009. 171 p. (In Russ.).
- [16] Darst Ya.A. Simulation models of hydraulic apparatuses. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2005, no. 3, pp. 28–30. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.02.2025

Информация об авторах

АННАКУЛОВА Гулсара Кучкаровна — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Механика жидкости, газа и систем приводов». Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз (100125, Ташкент, Республика Узбекистан, ул. Дурмон Йули, д. 40, e-mail: annaqulova_g@mail.ru).

САИДОВ Сарвар Абдижалилович — младший научный сотрудник лаборатории «Механика жидкости, газа и систем приводов». Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз (100125, Ташкент, Республика Узбекистан, ул. Дурмон Йули, д. 40, e-mail: sarvar_said@mail.ru).

Information about the authors

ANNAKULOVA Gulsara Kuchkarovna — Candidate of Science (Phys.-Math), Leading Researcher, Laboratory of Mechanics of Fluids, Gas and Drive Systems. Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (100125, Tashkent, Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli St., Bldg. 40, e-mail: annaqulova_g@mail.ru).

SAIDOV Sarvar Abdizhalilovich — Junior Researcher, Laboratory of Mechanics of Fluids, Gas and Drive Systems. Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (100125, Tashkent, Republic of Uzbekistan, Durmon Yuli St., Bldg. 40, e-mail: sarvar_said@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аннакулова Г.К., Саидов С.А. Математическая модель системы стабилизации золотникового распределителя с гидравлическим управлением. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 75–83.

Please cite this article in English as:

Annakulova G.K., Saidov S.A. Mathematical model system of stabilization of a spool valve with hydraulic control. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 7, pp. 75–83.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие В.С. Окунева «Спонтанные превращения элементарных частиц и атомных ядер»

Приведены основные понятия и определения, необходимые для объяснения явления радиоактивности, виды спонтанных превращений элементарных частиц и атомных ядер. Рассмотрены превращения посредством разных фундаментальных взаимодействий, редкие распады, их особенности. Изложены некоторые положения Новой физики за пределами Стандартной модели. Выявлены конкурирующие процессы распадов атомных ядер, зависимости вида распада от устойчивости ядра. Особое внимание уделено распадам стабильных ядер. Исследованы возможности влияния на скорость радиоактивных распадов, явление ударной радиоактивности. Рассмотрены механизмы воздействия радиации на человеческий организм и возможности использования радиоактивности. Представлены все виды радиоактивности, а также сходные явления, не подпадающие под определение радиоактивности и радиоактивного распада.

Для бакалавров направления подготовки 16.03.01 «Техническая физика». Пособие составляет часть курса по выбору «Фундаментальные основы и приложения ядерной физики низких энергий». Может быть полезно студентам, изучающим курс общей физики и ядерной физики, а также специалистам, занимающимся ядерной физикой.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>