

УДК 62-523

## Синтез системы управления двигателями механизмов с параллельной кинематикой при наличии разброса их характеристик

В.Н. Пашченко<sup>1</sup>, Д.А. Акименко<sup>1</sup>, А.В. Скадин<sup>2</sup>,  
А.А. Бошляков<sup>3</sup>, А.А. Романов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> АО «Калугаприбор»

<sup>3</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>4</sup> ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

## Synthesizing a motor control system for the parallel kinematics mechanisms with a spread in their characteristics

V.N. Pashchenko<sup>1</sup>, D.A. Akimenko<sup>1</sup>, A.V. Skadin<sup>2</sup>,  
A.A. Boshlyakov<sup>3</sup>, A.A. Romanov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup> JSC Kalugapribor

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University

<sup>4</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрены вопросы синтеза манипуляционных механизмов параллельной структуры, обладающие преимуществами перед механизмами последовательной структуры. Показано, что такие механизмы имеют несколько взаимосвязанных параллельных кинематических звеньев, что осложняет разработку системы управления. Чтобы управлять манипуляционным механизмом параллельной структуры, являющимся многоканальным объектом, необходимо синтезировать многомерную систему автоматического управления. Показана актуальность синтеза системы робастного управления двигателями постоянного тока с различными показателями. Для практической реализации систем управления на микроконтроллере проведена дискретизация регулятора с целью получения его разностного уравнения, которое позволило синтезировать алгоритм формирования управляющего сигнала, подаваемого на драйвер привода. Разработана структурная схема замкнутой системы управления с учетом дифференцирующего звена для вычисления выходной координаты. В качестве основного требования, накладываемого на разрабатываемые регуляторы, являлось обеспечение заданного времени управления. Результаты моделирования подтвердили эффективность метода критерия минимума энергии ускорения для реализации робастной системы управления.

EDN: QAFGZT, <https://elibrary/qafgzt>

**Ключевые слова:** робастная система управления, ПИД-регулятор, драйвер привода, передаточная функция, эталонный процесс, критерий минимума энергии ускорения

The paper considers the issues of synthesizing the parallel structure manipulation mechanisms being advantageous over the serial structure mechanisms. It shows that such mechanisms have several interconnected parallel kinematic links complicating design and development of a control system. It is necessary to synthesize a multidimensional automatic con-

trol system to control the parallel structure manipulation mechanism, i.e. a multichannel object. The paper demonstrates relevance of synthesizing a robust control system for the DC motors with different parameters. For practical implementation of the control system on a microcontroller, the controller is discretized in order to obtain its difference equation, which makes it possible to synthesize an algorithm for generating a control signal supplied to the actuator driver. A structural diagram of the closed system is developed taking into account a differentiating link for computing the output coordinate. Ensuring the specified control time is the main requirement imposed on the controllers being developed. Simulation results confirm the efficiency of using the minimum energy criterion method in implementing a robust control system.

EDN: QAFGZT, <https://elibrary/qafigzt>

**Keywords:** robust control system, PID controller, actuator driver, transfer function, reference process, minimum acceleration energy criterion

Одной из основных тенденций развития современной робототехники является синтез манипуляционных механизмов параллельной структуры, обладающих повышенной жесткостью, точностью и грузоподъемностью [1–3]. Структура таких механизмов позволяет достичь более высоких скоростей, ускорений и точности перемещения выходного звена, так как ошибка позиционирования не накапливается, а усредняется на каждом приводе [4–7].

Такие механизмы, как правило, применяют для обеспечения пространственных поступательных или вращательных движений выходного звена, в котором размещен рабочий инструмент. Движения указанного типа необходимы при выполнении многих технологических операций, таких как раскрой и лазерная резка листовых материалов, сборка, сварка и др. [8–10].

Вследствие наличия нескольких взаимосвязанных параллельных кинематических цепей кинематическая схема механизмов параллельной структуры несколько сложнее, чем у механизмов последовательной структуры, что осложняет разработку системы управления [11, 12].

Чтобы управлять механизмом параллельной структуры, необходимо синтезировать многомерную систему автоматического управления (САУ), так как этот механизм является многоканальным объектом [12, 13].

Однако не все методы гарантируют разработку регуляторов, гарантирующих требуемое качество и точность [14]. Достижение этой цели связано с созданием алгоритмов управления движением приводных звеньев манипуляционного механизма с различными показателями, обеспечивающих качественное перемещение и позиционирование объекта манипулирования в трехмерном пространстве [15, 16].

Цель работы — синтез параметрически адаптивного алгоритма управления двигателем постоянного тока (ДПТ).

**Постановка задачи управления.** В качестве объекта управления выступал ДПТ, передаточная функция которого связывает выходную координату (угловую скорость  $\omega$ ) с входной (напряжением  $u$ ) и имеет вид [17]

$$W(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (1)$$

Здесь  $s$  — оператор Лапласа;  $b_0$ ,  $a_1$ ,  $a_0$  — коэффициенты передаточной функции,

$$b_0 = \frac{k_m}{JL}; \quad a_1 = \frac{JR + Lk_{в.т}}{JL}; \quad a_0 = \frac{Rk_{в.т} + k_e k_m}{JL}.$$

где  $k_m$  — электромагнитный коэффициент;  $J$  — момент инерции якоря ДПТ, кг·м<sup>2</sup>;  $L$  — индуктивность якорной цепи, Гн;  $R$  — сопротивление якорной цепи, Ом;  $k_{в.т}$  — коэффициент вязкого трения;  $k_e$  — коэффициент противоЭДС.

Передаточная функция рассматриваемого ДПТ, которую будем использовать как математическую модель объекта управления в задаче синтеза дискретного алгоритма управления, определяется выражением

$$W_{\text{ДПТ}}(s) = \frac{9,399}{s^2 + 19,18s + 103,9}.$$

Задачей является синтез такого алгоритма управления, при котором рассматриваемый ДПТ переходит из произвольного начального состояния  $x_0 = x(0)$  в заданное конечное  $x(\infty) = x^{\text{уст}} = \text{const}$ . При этом управляемый процесс с требуемой точностью должен следовать за эталонным процессом, который задан моделью

$$\ddot{x}_3(t) + \alpha_1 \dot{x}_3(t) + \alpha_0 x_3(t) = \alpha_0 x^{уст}(t),$$

где  $x_3$  — эталонное состояние ДПТ;  $t$  — время;  $\alpha_1$  и  $\alpha_0$  — параметры, числовые значения которых подбирают из условия обеспечения заданного процесса.

Так как передаточная функция ДПТ является функцией второго порядка необходимо добавить интегратор для получения в качестве выхода положение вала.

Эталонный процесс выбирают исходя из требований, накладываемых на синтезируемую САУ. В частности, одним из таких требований может быть обеспечение заданного быстродействия переходного процесса. С учетом времени управления  $t_y = 2,45$  с зададим эталонный процесс

$$W_3(s) = \frac{3,9}{s^2 + 4s + 3,9}.$$

**Определение закона управления.** Для качественного синтеза робастной САУ исследуемого ДПТ рассмотрим управление на основе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и критерия минимума энергии ускорения [18].

Управляющее воздействие ПИД-регулятора описывается выражением

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (2)$$

где  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  — коэффициент пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора соответственно;  $e$  — ошибка регулирования;  $\tau$  — время запаздывания.

В форме преобразования Лапласа уравнение (2) имеет вид

$$U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s). \quad (3)$$

Так как производная ошибки может быть зашумленной, ПИД-регулятор может включать в себя фильтр нижних частот для фильтрации ошибки перед получением производной:

$$U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \frac{s}{1 + sN} \right) E(s), \quad (4)$$

где  $N$  — постоянная времени фильтра.

Варианты дискретизации составляющих закона управления (3) и (4) приведены в табл. 1, где  $T_d$  — период дискретизации.

Так как нет четких требований, какой вариант дискретизации использовать для каждой составляющей ПИД-регулятора, в ходе синтеза дискретного алгоритма управления рассматривали сочетание различных методов дискретизации интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора.

Лучший результат получен для дискретизации интегральной составляющей методом Тустина, а для дифференциальной — обратным методом Эйлера. Исходя из этого запишем уравнение (3) в  $z$ -области

$$U(z) = \left[ K_p + \frac{K_i T_d (z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d (z-1)}{T_d z} \right] E(z). \quad (5)$$

После алгебраических преобразований получаем

$$U(z) = \left[ \frac{K_p + 0,5K_i T_d + K_d T_d^{-1}}{1 - z^{-1}} + \frac{(-K_p + 0,5K_i T_d - 2K_d T_d^{-1})z^{-1} + K_d T_d^{-1}z^{-2}}{1 - z^{-1}} \right] E(z).$$

Таблица 1

Варианты дискретизации составляющих ПИД-регулятора

Метод дискретизации	Вариант дискретизации составляющей		
	интегральной	дифференциальной	дифференциальной с фильтром низких частот
Прямой	$K_i \frac{T_d}{z-1}$	$K_d \frac{z-1}{T_d}$	$\frac{N(z-1)}{z + NT_d - 1}$
Обратный	$K_i \frac{T_d z}{z-1}$	$K_d \frac{z-1}{T_d z}$	$\frac{N(z-1)}{z(1 + NT_d) - 1}$
Тустина	$K_i \frac{T_d(z+1)}{2(z-1)}$	$K_d \frac{2(z-1)}{T_d(z+1)}$	$\frac{2N(z-1)}{(NT_d + 2)z + NT_d - 2}$

Изменим уравнение (5) следующим образом:

$$U(z)(1 - z^{-1}) = (K_1 + K_2z^{-1} + K_3z^{-2})E(z),$$

где

$$K_1 = K_p + 0,5K_iT_d + K_dT_d^{-1};$$

$$K_2 = -K_p + 0,5K_iT_d - 2K_dT_d^{-1};$$

$$K_3 = K_dT_d^{-1}.$$

Итоговое разностное уравнение ПИД-регулятора имеет вид

$$u[k] = u[k-1] + K_1e[k] + K_2e[k-1] + K_3e[k-2].$$

**Синтез САУ с ПИД-регулятором.** Проведем моделирование работы САУ с ПИД-регулятором для ДПТ с эталонными параметрами. Структурная схема САУ такого регулятора и результаты моделирования приведены на рис. 1. Здесь и далее введены следующие обозначения:  $\varphi$  и  $\varphi^{уст}$  — угол поворота вала ДПТ и его заданное значение; ЭП — эталонный процесс.

Как видно из рис. 1, для эталонных параметров ДПТ ПИД-регулятор обеспечивает требуемое качество САУ.

Для проверки работы ПИД-регулятора с точки зрения адаптивности к изменению параметров исследуемого объекта управления выполним моделирование с измененными параметрами передаточной функции, описывающей ДПТ. Структурная схема и результаты моделирования САУ с ПИД-регулятором для ДПТ с измененными параметрами — с передаточной

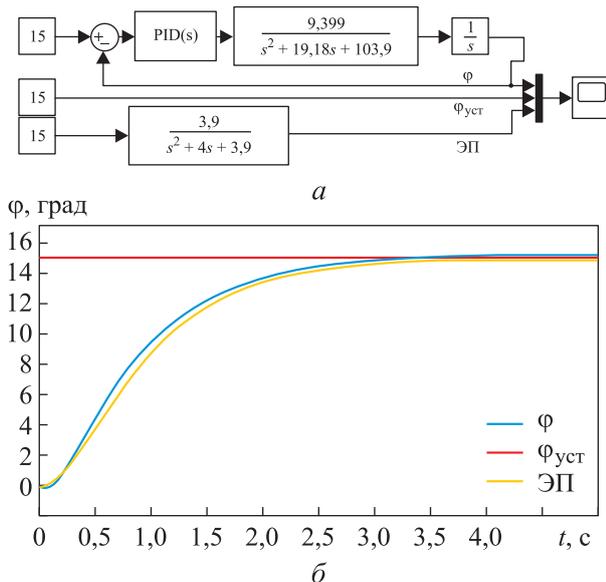


Рис. 1. Структурная схема (а) и результаты моделирования (б) САУ с ПИД-регулятором для ДПТ с эталонными параметрами

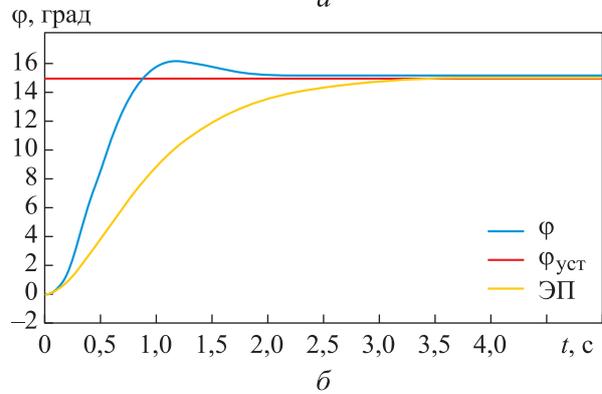
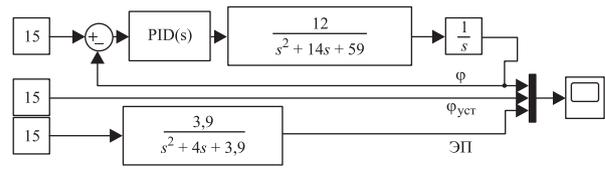


Рис. 2. Структурная схема (а) и результаты моделирования (б) САУ с ПИД-регулятором для ДПТ с передаточной функцией  $W_{ДПТ1}(s)$

функцией  $W_{ДПТ1}(s) = 12/(s^2 + 14s + 59)$  — приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, для ДПТ с измененными параметрами ПИД-регулятор с коэффициентами, не претерпевшими изменения, все еще обеспечивает требуемое качество САУ, но время управления уже меньше заданного. Также появляется перерегулирование, что может негативно сказаться на управлении мехатронной системой, так как ДПТ «перелетает» требуемое положение и вынужден возвращаться в обратном направлении.

Проведем моделирование САУ с ПИД-регулятором, но уже с другими параметрами ДПТ — с передаточной функцией  $W_{ДПТ2}(s) = 12/(s^2 + 36s + 40)$ . Структурная схема и результаты моделирования приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, при таких параметрах ДПТ в системе появляется колебательность, не обеспечивается время управления, и ДПТ будет вынужден несколько раз менять направление вращения.

Анализ результатов моделирования показал, что ПИД-регулятор хоть и является в какой-то мере классическим решением для управления ДПТ, но не применим к системам с большим количеством приводов, так как полученная схема САУ не является робастной, и даже небольшое отклонение параметров может вызвать значительное расхождение с эталонной моделью.

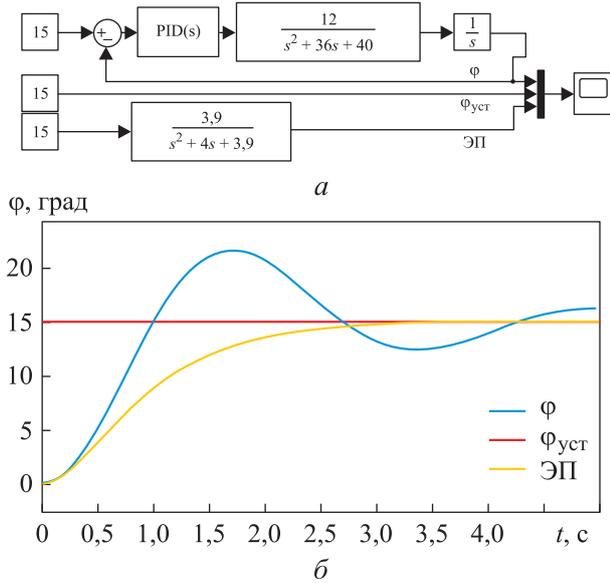


Рис. 3. Структурная схема (а) и результаты моделирования (б) САУ с ПИД-регулятором для ДПТ с передаточной функцией  $W_{ДПТ2}$

Синтез САУ по критерию минимума энергии ускорения [18]. Структуру алгоритма управления и его параметры будем определять из условия минимизации функционала

$$J(u) = \frac{1}{2} [\ddot{x}_3(t) - \ddot{x}(t, u)]^2. \quad (6)$$

Для определения закона управления воспользуемся градиентным методом первого порядка

$$\frac{d}{dt} u(t) = \lambda \frac{d}{du} J(u), \quad (7)$$

где  $\lambda$  — постоянная величина.

Запишем передаточную функцию ДПТ (1) в виде дифференциальных уравнений

$$\ddot{x}(t) + a_1 \dot{x}(t) + a_0 x(t) = b_0 u(t); \quad (8)$$

$$\ddot{x}(t, u) = b_0 u(t) - a_0 x(t) - a_1 \dot{x}(t). \quad (9)$$

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения (17)

Метод	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$c_0$	$c_1$	$c_2$
Эйлера (обратный)	0	-1	0	0	$K\alpha_0 T_d$	$-\frac{K}{T_d}$	$-\frac{K(-T_d \alpha_1 - 2)}{T_d}$	$-\frac{K(T_d^2 \alpha_0 + T_d \alpha_1 + 1)}{T_d}$
Тустина	-1	0	$\frac{1}{2} \alpha_0 T_d K$	$\alpha_0 T_d K$	$\frac{1}{2} \alpha_0 T_d K$	$\frac{(T_d^2 \alpha_0 - 2T_d \alpha_1 + 4)K}{2T_d}$	$-\frac{(2T_d^2 \alpha_0 - 8)K}{2T_d}$	$-\frac{(T_d^2 \alpha_0 + 2T_d \alpha_1 + 4)K}{2T_d}$

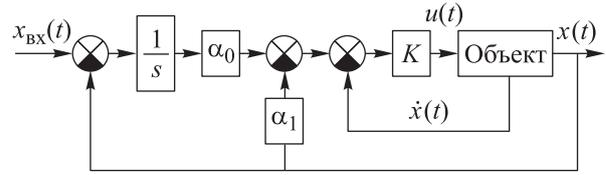


Рис. 4. Структурная схема замкнутой САУ, построенная по критерию минимума энергии ускорения

Найдем производную функционала (6) по управлению  $u$  с учетом уравнения (9):

$$\begin{aligned} \frac{d}{du} J(u) &= \frac{d}{du} \left\{ \frac{1}{2} [\ddot{x}_3(t) - \ddot{x}(t, u)]^2 \right\} = \\ &= \frac{d}{du} \left\{ \frac{1}{2} [\ddot{x}_3(t) - b_0 u(t) - a_0 x(t) - a_1 \dot{x}(t)]^2 \right\} = \\ &= -b_0 [\ddot{x}_3(t) - b_0 u(t) - a_0 x(t) - a_1 \dot{x}(t)] = \\ &= -b_0 [\ddot{x}_3(t) - \ddot{x}(t)]. \end{aligned}$$

Тогда уравнение (7) принимает вид

$$\frac{d}{dt} u(t) = -\lambda b_0 [\ddot{x}_3(t) - \ddot{x}(t)] = K [\ddot{x}_3(t) - \ddot{x}(t)], \quad (10)$$

где  $K = -\lambda b_0$ .

Из уравнения (8) имеем

$$\ddot{x}_3(t) = \alpha_0 [x_{вх}(t) - x_3(t)] - \alpha_1 \dot{x}_3(t), \quad (11)$$

где  $x_{вх}$  — входной сигнал.

Заменяя в выражении (11)  $x_3(t)$  на  $x(t)$  и подставляя его в уравнение (10), получаем дифференциальный закон управления

$$\frac{d}{du} u(t) = K \{ \alpha_0 [x_{вх}(t) - x(t)] - \alpha_1 \dot{x}(t) - \ddot{x}(t) \}. \quad (12)$$

Интегрируя выражение (12) с учетом нулевых начальных условий, получаем

$$u(t) = K \left\{ \alpha_0 \int_0^t [x_{вх}(t) - x(t)] dt - \alpha_1 x(t) - \dot{x}(t) \right\}. \quad (13)$$

Структурная схема замкнутой САУ, построенная по критерию минимума энергии ускорения, приведена на рис. 4 [18].

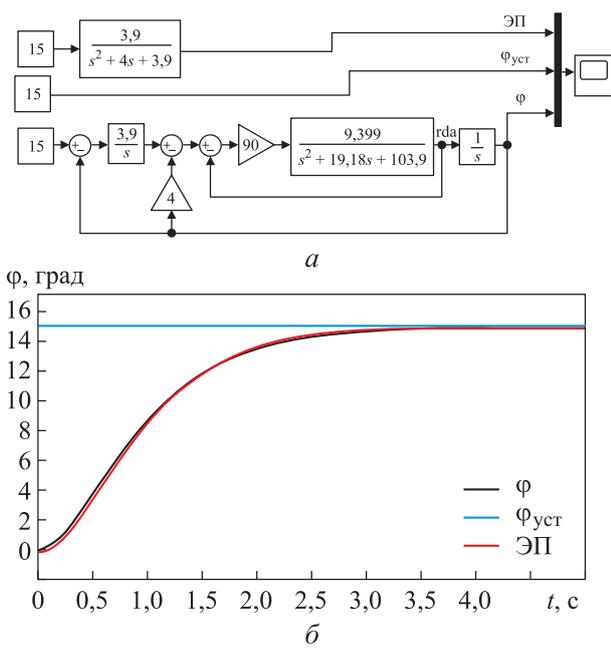


Рис. 5. Структурная схема (а) и результаты моделирования (б) САУ с регулятором, синтезированным по критерию минимума энергии ускорения, для ДПТ с эталонными параметрами

В выражении (13) неизвестным остается коэффициент  $K$ . Как отмечено в работе [18], с его увеличением динамические характеристики

полученной замкнутой САУ будут стремиться к характеристикам эталонной модели.

Для однозначного определения коэффициента  $K$  можно воспользоваться требованием выполнения условия

$$\left[ \int_0^{5t_y} [h(t, K) - h_э(t)]^2 dt \right]^{1/2} \leq \epsilon_{\text{доп}},$$

где  $h$  и  $h_э$  — переходные характеристики полученной замкнутой САУ и эталонной модели соответственно;  $\epsilon_{\text{доп}}$  — допустимая ошибка.

Для дискретизации алгоритма управления запишем уравнение его сигнала в форме преобразования Лапласа

$$U(s) = K \left\{ \frac{\alpha_0}{s} [X_{\text{вх}}(s) - X(s)] - (s + \alpha_1) X(s) \right\} = \frac{K\alpha_0}{s} X_{\text{вх}}(s) - K \left[ (s + \alpha_1) + \frac{\alpha_0}{s} \right] X(s).$$

После приведения к общему знаменателю получаем

$$sU(s) = K\alpha_0 X_{\text{вх}}(s) - K(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) X(s). \quad (14)$$

После выполнения дискретизации одним из доступных методов уравнение сигнала (14) приобретает следующий вид:

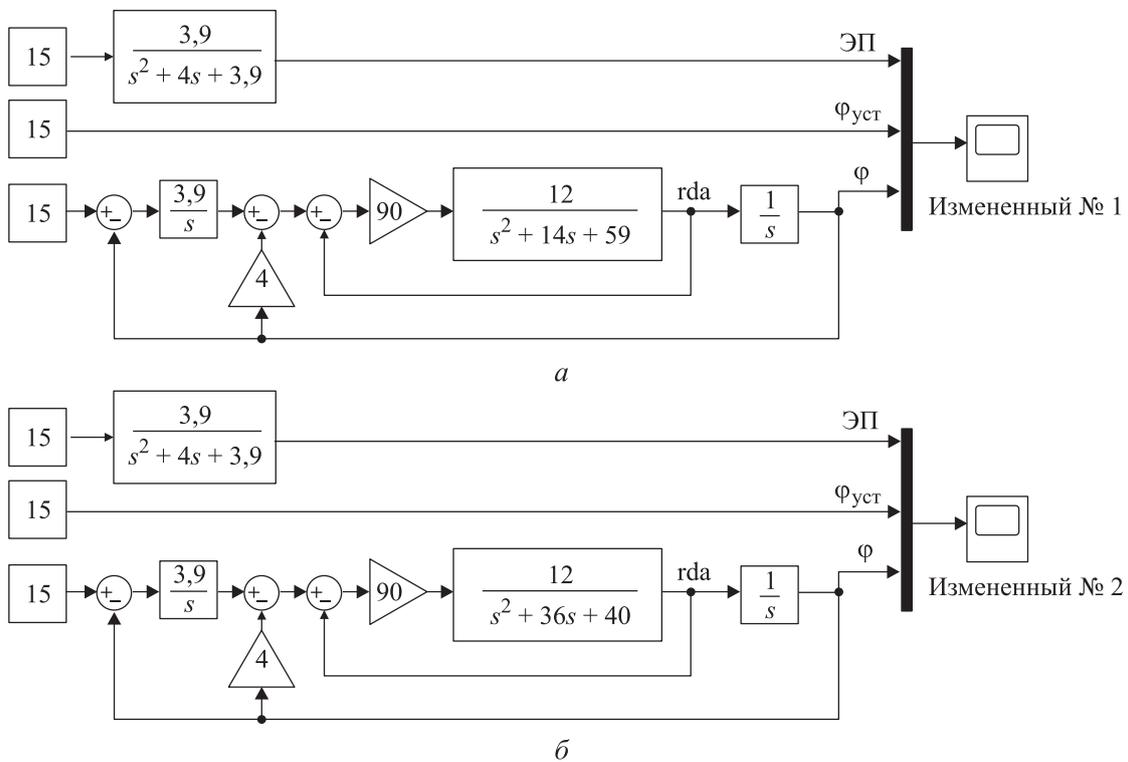


Рис. 6. Структурные схемы САУ с регулятором, синтезированным по критерию минимума энергии ускорения, для ДПТ с передаточными функциями  $W_{\text{ДПТ1}}$  (а) и  $W_{\text{ДПТ2}}$  (б)

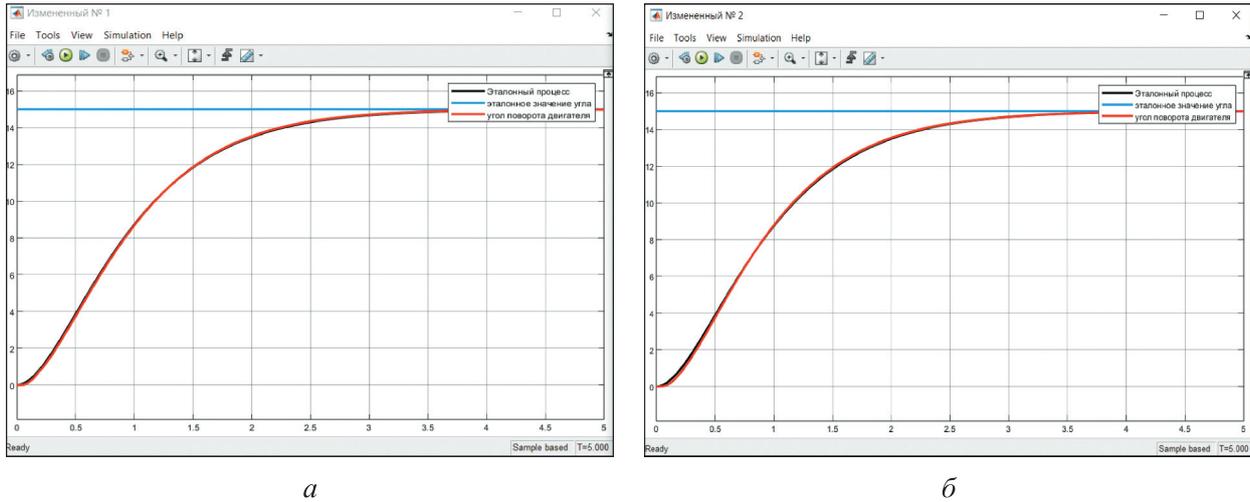


Рис. 7. Результаты моделирования САУ с регулятором, синтезированным по критерию минимума энергии ускорения, для ДПТ с передаточными функциями  $W_{ДПТ1}$  (а) и  $W_{ДПТ2}$  (б)

$$(z^2 + a_1z + a_0)U(z) = (b_2z^2 + b_1z + b_0)X_{вх}(z) + (c_2z^2 + c_1z + c_0)X(z). \quad (15)$$

После преобразований уравнения (15) имеем

$$U(z) + a_1z^{-1}U(z) + a_0z^{-2}U(z) = b_2X_{вх}(z) + b_1z^{-1}X_{вх}(z) + b_0z^{-2}X_{вх}(z) + c_2X(z) + c_1z^{-1}X(z) + c_0z^{-2}X(z). \quad (16)$$

Исходя из выражения (16), запишем разностное уравнение ПИД-регулятора

$$u[k] = b_2x_{вх}[k] + b_1x_{вх}[k-1] + b_0x_{вх}[k-2] + c_2x[k] + c_1x[k-1] + c_0x[k-2] - a_1u[k-1] - a_0u[k-2]. \quad (17)$$

Значения коэффициентов уравнения (17), полученные путем дискретизации обратным методом Эйлера и методом Тустина, приведены в табл. 2.

Итоговые параметры регулятора:  $a_0 = 3,9$ ,  $a_1 = 4$ ,  $K = 90$ . Период дискретизации  $T_d = 0,04$  с.

Проведем моделирование с аналогичными параметрами для такого метода управления. Структурная схема и результаты моделирования САУ с регулятором, синтезированным по критерию минимума энергии ускорения, для ДПТ с эталонными параметрами приведены на рис. 5, а и б.

Как видно из рис. 5, при эталонных параметрах ДПТ с регулятором на основе критерия минимума энергии ускорения обеспечивает требуемое качество САУ.

Составим структурные схемы и проведем моделирование САУ с регулятором, синтезированным по критерию минимума энергии уско-

рения, для ДПТ с измененными параметрами — с передаточными функциями  $W_{ДПТ1}$  и  $W_{ДПТ2}$ . Полученные структурные схемы приведены на рис. 6, а результаты моделирования — на рис. 7.

Как видно из рис. 7, метод критерия минимума энергии ускорения позволил получить робастную САУ, способную корректировать работу ДПТ при отклонении его параметров от эталонных. Однако такой метод требует выбора достаточно большого коэффициента усиления для погашения статической ошибки.

## Выводы

1. Рассмотрен процесс синтеза САУ для управления ДПТ. Чтобы реализовать САУ на микроконтроллере, проведена дискретизация ПИД-регулятора с целью получения его разностного уравнения, которое позволило синтезировать алгоритм формирования управляющего сигнала, подаваемого на драйвер привода.

2. Предложенные методы управления дают достаточную точность в приближении к эталонной работе ДПТ. Однако следует учитывать, что при использовании ПИД-регулятора необходимо подбирать коэффициенты для каждого нового ДПТ, так как расхождения в параметрах могут вызвать отклонение от эталонной траектории и неудовлетворительное качество управления приводом. Метод критерия минимума энергии ускорения является более сложным и имеет ограничения, накладываемые на период дискретизации вследствие устойчивости САУ. К достоинствам этого метода относится возможность создавать робастную САУ, способ-

ную корректировать свои параметры при изменении параметров объекта управления.

3. Рассмотренные методы управления удовлетворяют заданным требованиям и могут

быть использованы для решения задачи траекторного управления манипуляционными механизмами.

## Литература

- [1] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике. *Доклады академии наук*, 2014, т. 459, № 4, с. 428–431, doi: <https://doi.org/10.7868/S086956521434009X>
- [2] Глазунов В.А., Колископ А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 95 с.
- [3] Пащенко В.Н., Романов А.В., Орехов С.Ю. и др. Решение задачи прохождения механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы по заданной траектории с учетом нагрузки, создаваемой рабочим органом механизма. *Сборник XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (Микмус-2021) Труды конференции*, Москва 2021, с. 582–89.
- [4] Глазунов В.А., Чунихин А.Ю. Развитие исследований механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 3, с. 37–43.
- [5] Pashchenko V.N., Pashchenko V.V., Lachikhin A. et al. Positioning error calculation of the relative manipulation mechanism output link. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. *Springer*, 2020, с. 197–208, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_17)
- [6] Пащенко В.Н., Пащенко В.В., Тимошенко А.А. Расчет погрешности позиционирования выходного звена механизма совместного относительного манипулирования. *МИКМУС-2018*. Москва, ИМАШ РАН, 2018, с. 498–501.
- [7] Хейло С.В., Глазунов В.А., Ширинкин М.А. и др. Возможные применения механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2013, № 5, с. 19–24.
- [8] Глазунов В.А., Брио С., Аракелян В. и др. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2008, № 2, с. 90–100.
- [9] Глазунов В.А., Хейло С.В., Ларюшкин П.А. Применение манипуляторов параллельной структуры в измерительном оборудовании для объектов микроиндустрии. *Тез. док. II-й науч.-практ. конф.* Москва, МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011, с. 25–26.
- [10] Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2004, № 2, с. 78–84.
- [11] Пащенко В.Н., Орехов С.Ю., Вейсман П.И. и др. Моделирование движения по траектории механизма совместного относительного манипулирования на основе дельта-робота. *МИКМУС-2021*. Москва, ИМАШ РАН, 2021, с. 590–597.
- [12] Крутько П.Д. Асимптотические свойства многомерных динамических систем, оптимальных по критерию минимума энергии ускорения. *Доклады академии наук*, 1994, т. 339, № 4, с. 465–467.
- [13] Ишматов З.Ш., Волков М.А. Синтез цифровых регуляторов на основе концепции обратных задач динамики. *Тр. 4 межотраслевой науч.-тех. конф. Автоматизация и прогрессивные технологии*. Новоуральск, Изд-во НГТИ, 2005, с. 172–176.
- [14] Пащенко В.Н., Трошкин К.Г., Лачихин А.В. Решение прямой задачи динамики механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы. *МИКМУС-2018*. Москва, ИМАШ РАН, 2018, с. 494–497.
- [15] Pashchenko V., Artemyev A., Antonov A. et al. Inverse dynamics problem solution for the combined relative manipulation mechanism with five degrees of freedom. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. *Springer*, 2020, pp. 253–263, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_21)
- [16] Крутько П.Д. Оптимизация многомерных динамических систем по критерию минимума энергии ускорения. *Техническая кибернетика*, 1994, № 1, с. 32–47.

- [17] Крутько П.Д. Принцип управления по ускорению в задачах проектирования автоматических систем. *Техническая кибернетика*, 1987, № 6, с. 115–126.
- [18] Крутько П.Д. *Обратные задачи динамики в теории автоматического управления*. Москва, Машиностроение, 2004. 573 с.

## References

- [1] Ganiev R.F., Glazunov V.A. Handling mechanisms of parallel structure and their application in modern equipment. *Doklady akademii nauk*, 2014, vol. 459, no. 4, pp. 428–431, doi: <https://doi.org/10.7868/S086956521434009X> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys.*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 582–585, doi: <https://doi.org/10.1134/S1028335814120015>)
- [2] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallelnoy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 95 p. (In Russ.).
- [3] Pashchenko V.N., Romanov A.V., Orekhov S.Yu. et al. [Solving the problem of passing the mechanism of joint Relative manipulation with five degrees of freedom along a given trajectory, taking into account the load created by the working body of the mechanism]. *MIKMUS-2021*. Moscow, IMASH RAN Publ., 2021, pp. 582–589. (In Russ.).
- [4] Glazunov V.A., Chunikhin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 3, pp. 37–43. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>)
- [5] Pashchenko V.N., Pashchenko V.V., Lachikhin A. et al. Positioning error calculation of the relative manipulation mechanism output link. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. *Springer*, 2020, pp. 197–208, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_17)
- [6] Pashchenko V.N., Pashchenko V.V., Timoshenko A.A. Calculation of the positioning error of the output link of the relative manipulation mechanism. *MIKMUS-2018*. Moscow, IMASH RAN Publ., 2018, pp. 498–501. (In Russ.).
- [7] Kheylo S.V., Glazunov V.A., Shirinkin M.A. et al. Possible applications of mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 5, pp. 19–24. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2013, vol. 42, no. 5, pp. 359–363, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618813050063>)
- [8] Glazunov V.A., Brio S., Arakelyan V. et al. Development of manipulators with a parallel-cross structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2008, no. 2, pp. 90–100. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2008, vol. 37, no. 2, pp. 176–185, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618808020143>)
- [9] Glazunov V.A., Kheylo S.V., Laryushkin P.A. [Application of parallel structure manipulators in measuring equipment for nanoindustry objects]. *Tez. dok. II-y nauch.-prakt. konf.* [Abs. II Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, MGTU im. A.N. Kosygina Publ., 2011, pp. 25–26. (In Russ.).
- [10] Glazunov V.A., Esina M.G., Bykov R.E. Control of mechanisms of parallel structure at transition through special positions. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2004, no. 2, pp. 78–84. (In Russ.).
- [11] Pashchenko V.N., Orekhov S.Yu., Veysman P.I. et al. Simulation of motion along the trajectory of the mechanism of joint relative manipulation based on a delta-robot. *MIKMUS-2021*. Moscow, IMASH RAN Publ., 2021, pp. 590–597. (In Russ.).
- [12] Krutko P.D. Asymptotic properties of multidimensional dynamical systems optimal by the criterion of minimum acceleration energy. *Doklady akademii nauk*, 1994, vol. 339, no. 4, pp. 465–467. (In Russ.).
- [13] Ishmatov Z.Sh., Volkov M.A. [Synthesis of digital regulators based on the concept of inverse dynamics problems]. *Tr. 4 mezhotraslevoy nauch.-tekh. konf. Avtomatizatsiya i progressivnye tekhnologii* [Proc. 4 Interdisciplinary Sci.-Pract. Conf.]. Novouralsk, Izd-vo NGTI Publ., 2005, pp. 172–176. (In Russ.).
- [14] Pashchenko V.N., Troshkin K.G., Lachikhin A.V. [The solution of the direct problem of dynamics of a sharing mechanism of relative manipulation with five degrees of freedom]. *MIKMUS-2018*. Moscow, IMASH RAN Publ., 2018, pp. 494–497. (In Russ.).

- [15] Pashchenko V., Artemyev A., Antonov A. et al. Inverse dynamics problem solution for the combined relative manipulation mechanism with five degrees of freedom. Proc. 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, 2020, pp. 253–263, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_21)
- [16] Krutko P.D. Optimisation of multidimensional dynamic systems by the criterion of minimum acceleration energy. *Tekhnicheskaya kibernetika*, 1994, no. 1, pp. 32–47. (In Russ.).
- [17] Krutko P.D. Principle of acceleration control in problems of designing of automatic systems. *Tekhnicheskaya kibernetika*, 1987, no. 6, pp. 115–126.
- [18] Krutko P.D. *Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Inverse problems of dynamics in the theory of automatic control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 573 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.04.2024

## Информация об авторах

**ПАЩЕНКО Василий Николаевич** — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Мехатроника и робототехнические системы». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, ул. Баженова, д. 2, e-mail: [pashenkovn@inbox.ru](mailto:pashenkovn@inbox.ru)).

**АКИМЕНКО Дмитрий Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, ул. Баженова, д. 2, e-mail: [akimenko@kaluga.ru](mailto:akimenko@kaluga.ru)).

**СКАДИН Артем Владимирович** — инженер-конструктор. АО «Калугаприбор» (248021, Калуга, Российская Федерация, ул. Московская, д. 249, e-mail: [a.skadin@mail.ru](mailto:a.skadin@mail.ru)).

**БОШЛЯКОВ Андрей Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: [boshlyakov@bmstu.ru](mailto:boshlyakov@bmstu.ru)).

**РОМАНОВ Андрей Александрович** — кандидат технических наук, младший научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: [Dru.ny@mail.ru](mailto:Dru.ny@mail.ru)).

## Information about the authors

**PASHCHENKO Vasily Nikolaevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head. Department of Mechatronics and Robotic Systems. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenova St., Bldg. 2, e-mail: [pashenkovn@inbox.ru](mailto:pashenkovn@inbox.ru)).

**AKIMENKO Dmitry Andreevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenova St., Bldg. 2, e-mail: [akimenko@kaluga.ru](mailto:akimenko@kaluga.ru)).

**SKADIN Artem Vladimirovich** — Design Engineer. JSC Kalugapribor (248021, Kaluga, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 249, e-mail: [a.skadin@mail.ru](mailto:a.skadin@mail.ru)).

**BOSHLYAKOV Andrey Anatolievich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotic Systems and Mechatronics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [boshlyakov@bmstu.ru](mailto:boshlyakov@bmstu.ru)).

**ROMANOV Andrey Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonyevskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: [Dru.ny@mail.ru](mailto:Dru.ny@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пашченко В.Н., Акименко Д.А., Скадин А.В., Бошляков А.А., Романов А.А. Синтез системы управления двигателями механизмов с параллельной кинематикой при наличии разброса их характеристик. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 19–28.

### Please cite this article in English as:

Pashchenko V.N., Akimenko D.A., Skadin A.V., Boshlyakov A.A., Romanov A.A. Synthesizing a motor control system for the parallel kinematics mechanisms with a spread in their characteristics. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 9, pp. 19–28.