

Система регулирования экзопротеза пальца кисти человека с тросовой конфигурацией

© И.А. Шишков, О.Ю. Щербак, А.Л. Масленников

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Качественное и надежное функционирование экзопротезов, например кисти руки, поможет существенно улучшить качество жизни людей, у которых повреждены или утрачены части тела. Подобное функционирование обеспечивается с помощью системы управления, рассмотренной в данной работе. Моделью экзопротеза пальца служит математическая модель плоского трехзвенного маятника с учетом ограничений на возможные углы поворота каждого звена. Приведенный в работе тросовый механизм состоит из четырех независимых тросов, каждый из которых крепится к соответствующему звену экзопротеза пальца на заданном расстоянии. Каждый трос независимо управляется электрическим двигателем постоянного тока. Регулирование реализуется с помощью пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов) по ошибкам заданных значений углового положения каждого звена. Для этого по заданным угловым положениям каждого звена вычисляется необходимая сила натяжения тросов, используемая для создания моментов нагрузки приводов. Настройка системы регулирования осуществляется с помощью генетического алгоритма. Для проверки предложенного подхода было проведено моделирование, показавшее, что рассмотренная система регулирования экзопротеза пальца кисти человека с тросовой конфигурацией принципиально применима.

Ключевые слова: биомеханические системы, система регулирования, ПИ-регулятор, управляющие тросы, генетический алгоритм

Введение. При разработке экзопротезов кисти требуется не только усовершенствовать механическую конструкцию, но и создать систему управления, обеспечивающую точность, естественность и плавность движений [1]. Кисть человека обладает высокой степенью свободы и сложной биомеханикой, поэтому качество функционирования экзопротеза в значительной степени зависит от выбора его аппаратной и программной реализации [2].

Существует несколько подходов к формированию аппаратной части экзопротеза кисти человека. Например, используют электромеханические приводы с жесткой передачей [3] в виде редукторов и зубчатых передач [4, 5], приводы на основе сплавов с эффектом памяти формы (Shape Memory Alloys, SMA) [6, 7] и пневматические искусственные мышцы (Pneumatic Artificial Muscles, PAM) [8]. Последние способны воспроизводить основные свойства мышц, что делает их перспективными для применения в экзопротезах кисти, где критически важны компактность и приближенность к биологическим аналогам. Гидравлические приводы, напротив, применяют редко, поскольку они

имеют большую массу и сложны в обслуживании. Кроме того, для них характерен риск утечки жидкости [9].

Наиболее распространенным решением для аппаратной части экзопротеза кисти стали тросовые механизмы, в которых приводы размещаются вне пальцев, а движения звеньев реализуются посредством натяжения управляющих тросов, имитирующих работу сухожилий [10]. Такая конфигурация отличается простотой конструктивного исполнения, высокой надежностью и более естественной работой пальцев. В качестве конфигураций тросовых систем могут быть использованы кабельные передачи в прямых [11] или антагонистических схемах, тросы внутри гибкого канала (трос Боудена) [12] или кинематически избыточные системы, где один привод приводит в движение несколько тросов одновременно [13]. Для моделирования тросовых систем используют модели прямой и обратной кинематики многосегментных роботов [14], математические модели, учитывающие гибкость и инерцию тросов [15], а также влияние трения на передачу усилия [16].

Тросовые системы имеют ряд особенностей, влияющих на разработку системы регулирования: нелинейная упругость тросов, кинематическая избыточность, необходимость балансировки усилий между тросами и наличие трения. Например, для построения системы управления подобных систем применяется позиционное управление, при котором управляющее воздействие формируется на основе данных поверхностной электромиографии [12]. Широкое распространение получило применение различных конфигураций пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Например, используется пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор) и импедансное регулирование [17] или адаптивный алгоритм управления импедансом с компенсацией выходного сигнала с помощью ПИД-регулятора [18]. В кинематически избыточных системах применяют обратную связь по суммарной силе [19], $\sinh$ - $\cosh$ компенсацию и ПИД-регуляторы с планированием усиления [20].

Цель данной работы — разработать и настроить систему регулирования математической модели экзопротеза пальца с использованием четырех тросовых механизмов и пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов). Для этого рассматривается система регулирования элемента экзопротеза кисти руки человека, представляющего собой один палец, который состоит из трех фаланг, на основе математической модели плоского трехзвенного маятника с учетом ограничений на возможные углы поворота каждой фаланги. В качестве приводов использованы четыре электрических двигателя постоянного тока. Настройка ПИ-регуляторов осуществляется с помощью генетического алгоритма таким образом, чтобы обеспечить желаемые показатели качества переходных процессов.

Конфигурация и математическая модель тросовой системы экзопротеза пальца. Рассматриваемая тросовая система экзопротеза пальца основана на конфигурации, предложенной в работе [10], но с другими точками закрепления четырех независимых тросов, как показано на рис. 1. Три троса, расположенные на тыльной стороне пальца, крепятся к проксимальной, средней и дистальной фалангам (звеньям) в точках a_i^t на расстоянии одной трети от начала каждого звена, что позволяет независимо управлять сгибанием и разгибанием каждого звена. Четвертый трос, размещенный на ладонной стороне, крепится к дистальной фаланге в точке a_3^b также на расстоянии одной трети от ее начала, этот трос предназначен для сгибания пальца. Тросы проходят через систему направляющих роликов g_i , жестко связанных со звеньями. В качестве приводов использованы электрические двигатели постоянного тока, каждый из которых управляет натяжением соответствующего троса.

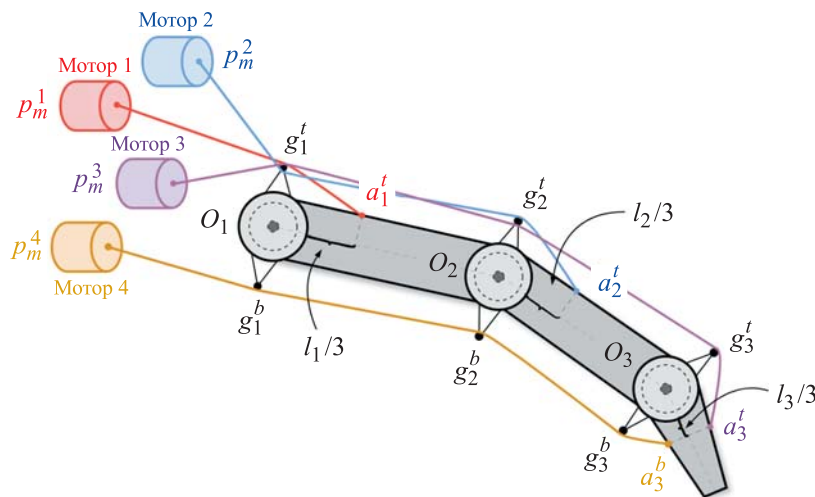


Рис. 1. Конфигурация тросового механизма с направляющими роликами

Для описания динамики тросового механизма вводится система отсчета, в которой по известным углам поворота каждого звена $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$, где $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ — углы поворота первого, второго и третьего звеньев (рад) соответственно, и заданным значениям центров моторов p_m^i , направляющих роликов g_i и точек крепления a_i тросов к звеньям однозначно определяется длина каждого троса $L_{тр}^i(\theta)$ как сумма евклидовых расстояний его прямолинейных сегментов [21]:

$$L_{\text{тр}}^i(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^{n_i} \left\| \mathbf{r}_{ik}^2(\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{r}_{ik}^1(\boldsymbol{\theta}) \right\|, \quad (1)$$

где $L_{\text{тр}}^i$ — длина i -го троса, м; n_i — число сегментов i -го троса; $\mathbf{r}_{ik}^1$, $\mathbf{r}_{ik}^2$ — координаты концов k -го сегмента, под которым понимается участок троса между двумя соседними точками контакта с роликами, в пределах которых трос считается натянутым и геометрически прямым.

Тогда вектор длин всех тросов $\mathbf{L}_{\text{тр}}(\boldsymbol{\theta})$ будет иметь вид

$$\mathbf{L}_{\text{тр}} = \begin{bmatrix} L_{\text{тр}}^1 & L_{\text{тр}}^2 & L_{\text{тр}}^3 & L_{\text{тр}}^4 \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

Продифференцировав вектор длин всех тросов по времени, получим связь между скоростями изменения длин тросов и угловыми скоростями звеньев:

$$\dot{\mathbf{L}}_{\text{тр}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ — матрица Якоби тросовой системы [22, 23], $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial \mathbf{L}_{\text{тр}}}{\partial \boldsymbol{\theta}}$;

$\dot{\boldsymbol{\theta}}$ — вектор угловых скоростей звеньев, рад/с.

Натяжение тросов приводит к возникновению управляющих моментов в звеньях, соотношения для которых получены из принципа виртуальной работы [24, 25]:

$$\mathbf{T}_{\text{тр}}^T \delta \mathbf{L}_{\text{тр}} = \boldsymbol{\tau}^T \delta \boldsymbol{\theta}, \quad (4)$$

где $\mathbf{T}_{\text{тр}}$ — вектор натяжения тросов, Н; $\delta \mathbf{L}_{\text{тр}}$ — виртуальные удлинения тросов, м; $\boldsymbol{\tau}$ — вектор управляющих воздействий, Н·м; $\delta \boldsymbol{\theta}$ — виртуальные перемещения, рад.

Векторы натяжения тросов и управляющих воздействий имеют вид

$$\mathbf{T}_{\text{тр}} = \begin{bmatrix} T_{\text{тр}}^1 & T_{\text{тр}}^2 & T_{\text{тр}}^3 & T_{\text{тр}}^4 \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Тогда выражение для определения $\boldsymbol{\tau}$ можно записать в виде

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{T}_{\text{тр}}. \quad (7)$$

Для учета параметров механической передачи электродвигателей при натяжении тросов рассчитывается вектор фактического натяжения тросов $\mathbf{T}_{\text{тр. факт}}$:

$$\mathbf{T}_{\text{тр. факт}} = \frac{\eta N}{r} K_t \mathbf{i}^M, \quad (8)$$

где η — коэффициент полезного действия, %; N — передаточное число редуктора; r — радиус барабана двигателя, м; K_t — коэффициент электромагнитного момента, Н·м/А; $\mathbf{i}^M$ — вектор токов якоря, А:

$$\mathbf{i}^M = \begin{bmatrix} i_1^M & i_2^M & i_3^M & i_4^M \end{bmatrix}^T, \quad (9)$$

где i_i^M — ток якоря i -го двигателя.

В результате вектор управляющих моментов будет иметь вид [24]

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{T}_{\text{тр. факт}}. \quad (10)$$

Для решения обратной задачи определения вектора натяжений тросов $\mathbf{T}_{\text{тр}}$, при котором достигаются заданные моменты, необходимо на основании уравнения (7) вычислить обратную матрицу $(\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^T)^{-1}$. Однако для данной системы задача распределения усилий является избыточной, поскольку число тросов превышает число степеней свободы системы и для вычисления обратной матрицы используется псевдообратное преобразование [22]:

$$\mathbf{T}_{\text{тр}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \left(\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^T \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \right)^{-1} \boldsymbol{\tau}. \quad (11)$$

Математическая модель экзопротеза пальца. Каждое звено (фаланга пальца) моделируется как жесткое тело, совершающее плоское движение, а связывающие их точки сочленения звеньев (суставы) рассматриваются как идеальные шарнирные соединения [26]. Каждое звено задается набором геометрических и массово-инерционных характеристик: длина l_i , расстояние до центра масс r_{ci} , масса m_i и момент инерции I_i . Кинематическая схема системы представлена на рис. 2.

Для получения математической модели рассматриваемой системы следует применить систему дифференциальных уравнений Лагранжа 2-го рода [27–29]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}_1} = \tau_1, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}_2} = \tau_2, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} + \frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}_3} = \tau_3. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь L — лагранжиан системы, $L = T - U$ (T — кинетическая энергия звена; U — потенциальная энергия системы); R — функция Рэлея, которая определяется следующим образом:

$$R(\dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \mathbf{B} \dot{\theta}, \quad (13)$$

где $\mathbf{B}$ — матрица коэффициентов вязкого трения в точках сочленения звеньев, имеющая вид

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

B_{ii} — коэффициент вязкого трения i -й точки сочленения звеньев, Н·м·с/рад.

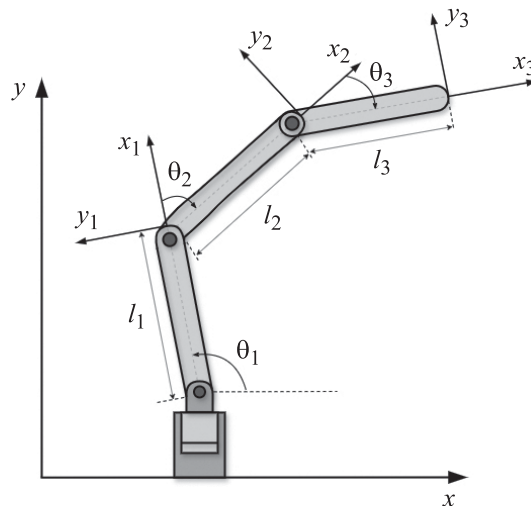


Рис. 2. Кинематическая схема трехзвенного пальца

Проведя необходимые преобразования, получим систему дифференциальных уравнений в векторно-матричном виде, описывающих динамику пальца:

$$\mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{B}\dot{\theta} + \mathbf{G}(\theta) = \tau, \quad (15)$$

где $\mathbf{M}(\theta)$ — матрица инерции точек сочленения звеньев; $\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})$ — вектор кориолисово-центробежных сил; $\mathbf{G}(\theta)$ — вектор гравитационных моментов точек сочленения звеньев.

Матрица $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ имеет вид

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где M_{ij} — сокращенное обозначение функций, зависящих от углов поворота и массово-инерционных характеристик звеньев, например:

$$\begin{aligned} M_{11} = & I_1 + I_2 + I_3 + m_1 r_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + r_{c2}^2 + 2l_1 r_{c2} \cos \theta_2) + \\ & + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + r_{c3}^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2l_1 r_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 r_{c3} \cos \theta_3). \end{aligned} \quad (17)$$

Вектор $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ можно представить так:

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = [C_1 \quad C_2 \quad C_3]^T, \quad (18)$$

элементы C_i которого формируются с использованием символов Христовфеля [30]:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} + \frac{\partial M_{ik}}{\partial \theta_j} - \frac{\partial M_{jk}}{\partial \theta_i} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k. \quad (19)$$

Вектор $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ записывается следующим образом:

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = [G_1 \quad G_2 \quad G_3]^T, \quad (20)$$

где G_i — гравитационный момент i -й точки сочленения звеньев.

Для численного моделирования уравнение (15) приводится к нормальной неявной форме Коши:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{M}(\mathbf{x}_q) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\dot{q}} \\ -\mathbf{C}(\mathbf{x}_q, \mathbf{x}_{\dot{q}}) - \mathbf{B}\mathbf{x}_{\dot{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{x}_q) + \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор состояния, который имеет вид

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_q \\ \mathbf{x}_{\dot{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T. \quad (22)$$

Движение звеньев должно соответствовать физиологическим ограничениям движений пальцев кисти человека [31, 32], поэтому в математическую модель введены ограничения на углы поворота звеньев, которые задают допустимую область компонентов вектора $\mathbf{x}_q$ и реализуются в системе управления посредством функции насыщения, имеющей следующий вид:

$$\theta_{\text{зад}} = \begin{cases} \theta_{\min}, & \theta_{\text{зад}} < \theta_{\min} \\ \theta_{\text{зад}}, & \theta_{\min} \leq \theta_{\text{зад}} \leq \theta_{\max} \\ \theta_{\max}, & \theta_{\text{зад}} > \theta_{\max} \end{cases}$$

где $\theta_{\text{зад}}$ — вектор заданных значений углов (уставок); $\theta_{\min}$, $\theta_{\max}$ — векторы минимально и максимально допустимых углов.

Система регулирования экзопротеза пальца. Структурная схема системы регулирования экзопротеза пальца, показанная на рис. 3, строится на базе ПИ-регуляторов, которые формируют управляющее воздействие на приводы на основе ошибок регулирования заданных значений углового положения каждого звена.

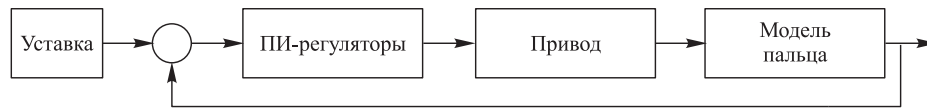


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования экзопротеза пальца

Вектор ошибок регулирования имеет вид

$$\mathbf{e} = \theta_{\text{зад}} - \theta, \quad (23)$$

где θ — вектор текущих значений углов.

Законы ПИ-регулирования записываются следующим образом:

$$\mathbf{u}_{\text{ПИ}} = \mathbf{K}_P \mathbf{e} + \mathbf{K}_I \mathbf{e}_{\text{int}}, \quad (24)$$

где $\mathbf{u}_{\text{ПИ}}$ — вектор управляющих воздействий, формируемых ПИ-регуляторами; $\mathbf{K}_P$, $\mathbf{K}_I$ — векторы коэффициентов регуляторов; $\mathbf{e}_{\text{int}}$ — вектор величин интегральных ошибок, вычисляемый наиболее удобным образом.

Вектор управляющих воздействий $\mathbf{u}_{\text{ПИ}}$ используется для расчета желаемых натяжений тросов $\mathbf{T}_{\text{тр. зад}}$ на основании уравнения (11). Желаемое натяжение тросов используется для создания моментов нагрузки $\tau_{\text{нагр}}$ на валу каждого электродвигателя, которые, в свою очередь, формируют управляющее воздействие τ для натяжения тросов в соответствии с уравнением (10). Функциональная схема системы регулирования экзопротеза пальца посредством управляющего тросового механизма с использованием ПИ-регуляторов приведена на рис. 4.

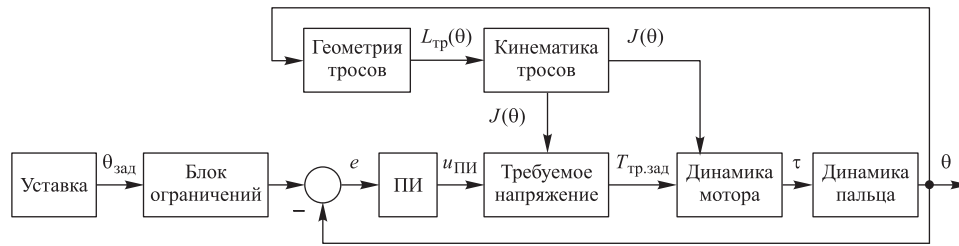


Рис. 4. Функциональная схема регулирования экзопротеза пальца

Настройка системы регулирования экзопротеза пальца. Для настройки ПИ-регуляторов могут использоваться разные методы, в том числе генетический алгоритм [33–35]. Оптимизационная задача по настройке ПИ-регуляторов в рассматриваемой системе формулируется следующим образом [36]:

$$\mathbf{k}_{\text{опт}} = \arg \min_{\mathbf{k} \in K} (J(\mathbf{k}, \mathbf{u}_{\text{ПИ}}, \mathbf{x})). \quad (25)$$

где $\mathbf{k}_{\text{опт}}$ — вектор подбираемых коэффициентов; $J(\mathbf{k}, \mathbf{u}_{\text{ПИ}}, \mathbf{x}_q)$ — общий критерий оптимизации; $\mathbf{k}$ — вектор коэффициентов, имеющий вид $\mathbf{k} = [K_{P_{\theta_1}} \ K_{I_{\theta_1}} \ K_{P_{\theta_2}} \ K_{I_{\theta_2}} \ K_{P_{\theta_3}} \ K_{I_{\theta_3}}]^T$ (K — область допустимых значений коэффициентов); $\mathbf{x}$ и $\mathbf{u}_{\text{ПИ}}$ — вектора состояния и управления для математической модели, записанной в форме Коши.

Критерий оптимизации формируется в виде

$$J = \sum_i |J_i| \rightarrow \min, \quad i = 1, \dots, 6. \quad (26)$$

Здесь каждый J_i — отдельный критерий оптимизации, соответствующий получению желаемых показателей качества:

$$\begin{aligned} J_1 &= \alpha_1 [\theta - \theta_{\text{зад}}] & J_4 &= \alpha_3 \sigma; \\ J_2 &= \alpha_2 [\dot{\theta} - \dot{\theta}_{\text{зад}}] & J_5 &= \alpha_5 [\mathbf{t} - \mathbf{t}_{\text{зад}}]; \\ J_3 &= \alpha_3 [\sigma - \sigma_{\text{зад}}] & J_6 &= \alpha_6 \mathbf{t}, \end{aligned} \quad (27)$$

где σ — вектор величин перерегулирования; $\mathbf{t}$ — вектор величин времени переходных процессов; α — вектор весовых коэффициентов, которые позволяют получить конфигурацию оптимизационной задачи под различные требования; индекс «зад» соответствует заданному значению, отсутствие индекса — фактическому.

Отметим, что в качестве критерия можно подбирать коэффициенты ПИ-регуляторов таким образом, чтобы переходные процессы системы были максимально близки к желаемым, вычисленным ранее переходным процессам [37].

Моделирование системы регулирования экзопротеза пальца.

Для оценки работоспособности разработанной системы регулирования проведено численное моделирование системы регулирования экзопротеза пальца.

Параметры модели трехзвенного пальца и ПИ-регуляторов, использованные в вычислительном эксперименте, приведены ниже:

Длина проксимальной фаланги l_1 , м	0,05
Масса проксимальной фаланги m_1 , кг	0,03
Коэффициент вязкого трения в проксимальной фаланге B_{11} , Н·м·с	0,2
Коэффициент П-составляющей регулятора углового положения проксимальной фаланги $K_{p_{\theta_1}}$	7,002
Коэффициент И-составляющей регулятора углового положения проксимальной фаланги $K_{I_{\theta_1}}$	0,4011
Длина средней фаланги l_2 , м	0,03
Масса средней фаланги m_2 , кг	0,02
Коэффициент вязкого трения в средней фаланге B_{22} , Н·м·с	0,015
Коэффициент П-составляющей регулятора углового положения средней фаланги $K_{p_{\theta_2}}$	5,0312
Коэффициент И-составляющей регулятора углового положения средней фаланги $K_{I_{\theta_2}}$	0,2116
Длина дистальной фаланги l_3 , м	0,02
Масса дистальной фаланги m_4 , кг	0,01
Коэффициент вязкого трения в дистальной фаланге B_{33} , Н·м·с	0,01
Коэффициент П-составляющей регулятора углового положения дистальной фаланги $K_{p_{\theta_3}}$	1,2151
Коэффициент И-составляющей регулятора углового положения дистальной фаланги $K_{I_{\theta_3}}$	0,1021

В качестве параметров привода используются параметры, соответствующие компактному коллекторному двигателю постоянного тока с планетарным редуктором Maxon DCX 13L, представленные ниже:

Номинальное напряжение V , В	6
Сопротивление якоря $R_{як}$, Ом	3,3
Индуктивность L_m , мГн	0,25
Постоянная момента K_t , Н·м/А	0,011
Постоянная ЭДС K_e , В/(рад·с ⁻¹)	0,011

Момент инерции ротора J_m , кг·м ²	$0,12 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент вязкого трения b , Н·м·с/рад	10^{-6}
Передаточное число редуктора N	126
КПД редуктора η , %	60

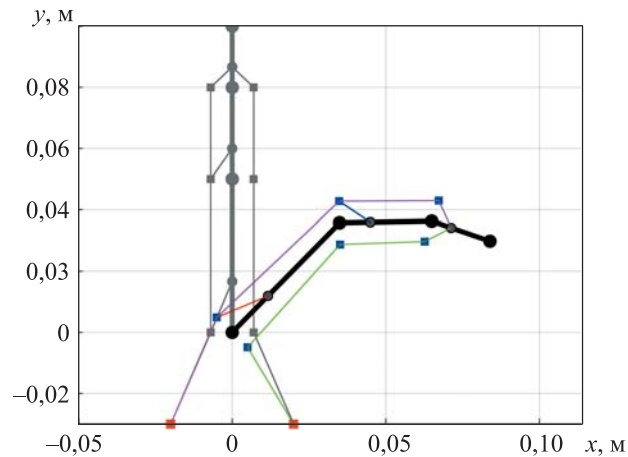


Рис. 5. Результаты моделирования системы регулирования экзопротеза пальца

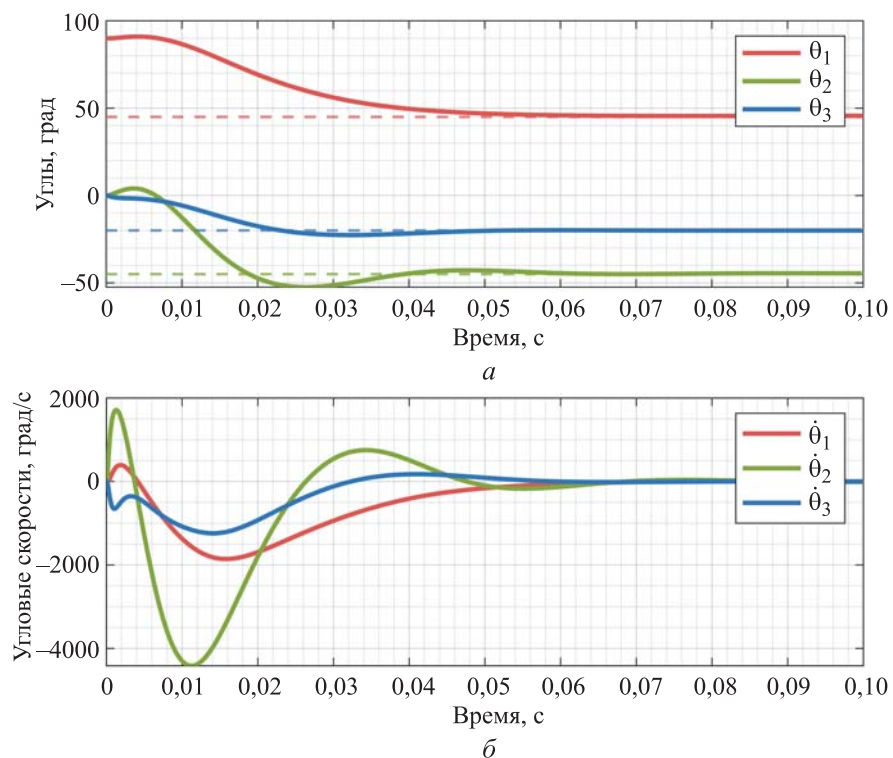


Рис. 6. Переходные процессы по углам (а) и угловым скоростям (б)

Начальное состояние системы соответствует вертикальному положению звеньев: $\theta_0 = [90 \ 0 \ 0]^T$, а желаемые значения углов $\theta_{\text{зад}} = [45 \ -45 \ -20]^T$.

Результаты моделирования системы регулирования экзопротеза пальца в виде графиков начального положения экзопротеза пальца и его положения после завершения переходных процессов представлены на рис. 5. По переходным процессам по углам и угловым скоростям (рис. 6) видно, что система точно реагирует на заданную уставку, плавно перемещаясь из начального положения в заданное.

Заключение. Работа посвящена проектированию и настройке системы регулирования экзопротеза пальца человека с тросовым управлением. Предложена математическая модель экзопротеза пальца человека с учетом ограничений на углы поворота звеньев, дано описание конфигурации тросовой системы и приводов. Система регулирования рассмотренного экзопротеза пальца включает в себя ПИ-регуляторы по ошибкам заданных значений углового положения каждого звена, на основе которых формируется управляющее воздействие в виде заданного натяжения тросов, преобразующего приводы в усилия, подающиеся на вход системы. Для настройки системы регулирования была сформирована оптимизационная задача, в которой коэффициенты ПИ-регуляторов подбираются таким образом, чтобы обеспечить заданные показатели качества переходных процессов с помощью генетического алгоритма.

Для подтверждения разработанной системы регулирования экзопротеза пальца человека был проведен вычислительный эксперимент по регулированию экзопротеза пальца в заданном положении. Результаты показали, что предложенная математическая модель обладает достаточной степенью адекватности, система регулирования корректно обрабатывает заданную уставку. Таким образом, полученная система регулирования позволяет провести моделирование движения экзопротеза пальца человека.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shah G., Sharma A., Joshi D., Rathor A.S. Revolutionizing prosthetic hand control using non-invasive sensors and intelligent algorithms: A comprehensive review. *Computers and Electrical Engineering*, 2025, vol. 123, p. 110094. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2025.110094
- [2] Siegel J.R., Harwood J.K., Lau A.C., Brenneis D.J.A., Dawson M.R., Pilarski P.M., Schofield J.S. A performance evaluation of commercially available and 3D-printable prosthetic hands: a comparison using the anthropomorphic hand assessment protocol. *BMC Biomedical Engineering*, 2024, vol. 6, no. 11, 14 p. DOI: 10.1186/s42490-024-00086-w
- [3] Joseph T.B., Jacob L.S., Aaron M.D., Richard F.W. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 2013, vol. 50, no. 5, pp. 599–618. DOI: 10.1682/jrrd.2011.10.0188

- [4] Deshpande A.D., Ko J., Fox D., Matsuoka Y. Control strategies for the index finger of a tendon-driven hand. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, vol. 32, no. 1, pp. 115–128. DOI: 10.1177/0278364912466925
- [5] Zhou X., Fu H., Shentu B., Wang W., Cai S., Bao G. Design and Control of a Tendon-Driven Robotic Finger Based on Grasping Task Analysis. *Biometrics*, 2024, vol. 9, no. 6, pp. 370–387. DOI: 10.3390/biomimetics9060370.
- [6] Abdullah F., Asan Muthalif G.A., Azni N.W., Dzareeful M. Development of shape memory alloy (SMA) based artificial muscle for application in soft gripper. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2023, vol. 8, no. 3, pp. 1413–1426.
- [7] Liang C., Rogers C.A. Design of Shape Memory Alloy Actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, 1997, vol. 4, no. 8, pp. 303–313. DOI: 10.1177/1045389X9700800403
- [8] Жетенбаев Н.Т., Нұрғизат Е.С., Балбаев Г.К., Шингисов Б.Т., Естемесова Г.Д. Исследование и применения пневматических искусственных мышц. *Engineering Journal of Satbayev University*, 2021, № 143, с. 217–225. DOI: 10.51301/vest.su.2021.v143.i1.27.
- [9] Vertongen J., Kamper D.G., Smit G., Vallery H. Mechanical Aspects of Robot Hands, Active Hand Orthoses, and Prostheses: A Comparative Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 955–965. DOI: 10.1109/tmech.2020.3014182
- [10] Rodic A., Miloradovic B., Popic S., Krsenkovic I. Development of Antropomorphic Robot Hand of Modular Structure. *22nd International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*. Portotoz, 2013, pp. 11–13.
- [11] Geon L., Choi Y. Bio-Inspired Tendon-Driven Finger Design with Isomorphic Ligamentous Joint. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 18240–18251. DOI: 10.1109/access.2020.2968739
- [12] Hocaoglu E., Patoglu V. Design, Implementation, and Evaluation of a Variable Stiffness Transradial Hand Prosthesis. *Front Neurobot*, 2022, vol. 16, pp. 1–15. DOI: 10.3389/fnbot.2022.789210
- [13] Mottard A., Laliberté T., Gosselin C. Underactuated tendon-driven robotic/prosthetic hands: design issues. *Robotics: Science and Systems*, 2017, pp. 1–9. DOI: 10.15607/rss.2017.xiii.019
- [14] Bhalkikar A., Lokesh S., Ashwin K.P. Kinematic models for Cable-driven Continuum Robots with multiple segments and varying cable offsets. *Mechanism and Machine Theory*, 2024, vol. 200, p. 105701. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105701
- [15] Moussa K., Thieffry M., Claveau F., Chevrel P., Caro S. Dynamic models for simulation of Cable-Driven Parallel Robots with elasticity and sagging. *Mechanism and Machine Theory*, 2025, vol. 209, p. 105972. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2025.105972
- [16] Tan K., Shi H., Mei X., Geng T., Yang J. Control of Force Transmission for Cable-Driven Actuation System Based on Modified Friction Model with Compensation Parameters. *Control Engineering Practice*, 2024, p. 12. DOI: 10.2139/ssrn.4783604
- [17] Sainul I.A., Deb A.K., Deb S. Position and Impedance Control of a multi-finger tendon-driven robotic hand. *6th International and 27th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR-2016)*. Pune, Maharashtra, INDIA. 2016, 6 p.
- [18] Chen J., Han D. The Control of Tendon-Driven Dexterous Hands with Joint Simulation. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 1723–1739. DOI: 10.3390/s140101723

- [19] Nikafrooz N., Leonessa A. A single-actuated, cable-driven, and self-contained robotic hand designed for adaptive grasps. *Robotics*, 2021, vol. 10, no. 4, p. 109. DOI: 10.3390/robotics10040109
- [20] Urrea C., Kern J., Álvarez E. Design and implementation of fault-tolerant control strategies for a real underactuated manipulator robot. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, vol. 8, pp. 5101–5123. DOI: 10.1007/s40747-022-00740-7
- [21] Priyanka R. *Tendon Driven Continuum Robots: Modeling and Motion Planning for Contact Aided Navigation and Shape Locking*. Toronto, University of Toronto, 2024, 148 p.
- [22] Rombokas E., Theodorou E., Malhotra M., Todorov E., Matsuoka Y. Tendon-Driven Control of Biomechanical and Robotic Systems: A Path Integral Reinforcement Learning Approach. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 208–214. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224650
- [23] Shirafuji S., Ikemoto S., Hosoda K. Development of a tendon-driven robotic finger for an anthropomorphic robotic hand. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, vol. 33, no. 5, pp. 677–693. DOI: 10.1177/0278364913518357
- [24] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. New Jersey, Springer-Verlag, 2009, 182 p.
- [25] Zhou X., Fu H., Shentu B., Wang W., Cai S., Bao G. Design and control of a tendon-driven robotic finger based on grasping task analysis. *Biometrics*, 2024, vol. 9, no. 6, pp. 370–387. DOI: 10.3390/biomimetics9060370
- [26] Смирнов Д.А. Исследование динамики механической системы шарнирных стержней с тремя степенями свободы. *Фундаментальные исследования*, 2014, № 11, с. 2620–2624.
- [27] Заика В.В., Масленников А.Л. Математическое моделирование однозвенного сферического маятника в сферической системе координат. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 9, с. 1–13. DOI: 10.18698/2541-8009-2020-01-566
- [28] Заика В.В., Масленников А.Л. Синтез системы регулирования сферического маятника методом компенсации нелинейностей. *Фундаментальные основы механики*, 2019, № 4, с. 74–79. DOI: 10.26160/2542-0127-2019-4-74-79
- [29] Заика В.В., Масленников А.Л. Цифровая система управления сферическим маятником. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, № 21, с. 82–88. DOI: 10.26160/2474-5901-2020-21-82-88
- [30] Safeea M., Neto P., Bearee R. Robot dynamics: A recursive algorithm for efficient calculation of Christoffel symbols. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 142, p. 103589. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103589
- [31] Gellman H., McKellop H. Functional range of motion of the joints of the hand. *The Journal of Hand Surgery*, 1990, vol. 15A, no. 2, pp. 240–243. DOI: 10.1016/0363-5023(90)90102-W
- [32] Gracia-Ibanez V., Vergara M., Sancho-Bru J.L., Mora C.M., Piqueras C. Functional range of motion of the hand joints in activities of the International Classification of Functioning, Disability and Health. *Journal of Hand Therapy*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 337–347. DOI: 10.1016/j.jht.2016.08.001
- [33] Ansari U., Alam S. Hybrid Genetic Algorithm fuzzy rule based guidance and control for launch vehicle. *2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, 2011, pp. 178–185. DOI: 10.1109/isda.2011.6121651
- [34] Кузнецов М.А., Масленников А.Л. Настройка системы регулирования двухроторной аэродинамической системы с использованием генетического алгоритма. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2023, № 4, с. 33–38. DOI: 10.25791/pribor.4.2023.1403

- [35] Кошкина А.А., Масленников А.Л., Бабенко М.Д., Чулин Н.А. Настройка контуров управления беспилотного воздушного судна самолетного типа с использованием генетического алгоритма. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 2, 14 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2025-2-2427
- [36] Scherbak O.Yu., Maslennikov A.L. Biotechnical system based on the wrist joint control system tuning via genetic algorithm. *Russian journal of biomechanics*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 116–122. DOI: 10.15593/RJBiomech/2025.2.11
- [37] Масленников А.Л., Щербак О.Ю. Настройка системы регулирования сферического маятника с использованием генетического алгоритма по желаемому переходному процессу. *Автоматизация. Современные технологии*, 2026, т. 80, № 2, с. 51–58. DOI: 10.36652/0869-4931-2026-80-2-51-58

Статья поступила в редакцию 16.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шишков И.А., Щербак О.Ю., Масленников А.Л. Система регулирования экзопротеза пальца кисти человека с тросовой конфигурацией. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 5. EDN WKHPPS

Шишков Иван Алексеевич — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: shishkovia@student.bmstu.ru

Щербак Ольга Юрьевна — ассистент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: scherbak.olga.j@bmstu.ru

Масленников Андрей Леонидович — старший преподаватель кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: amas@bmstu.ru

A Control System for a Human Finger Prosthesis with a Cord Mechanism

© I.A. Shishkov, O.Yu. Scherbak, A.L. Maslennikov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

High-quality and reliable operation of exoprostheses, for example, of the human hand, can significantly improve the quality of life. Such operation is ensured by a control system, which is considered in this work. A mathematical model of a planar three-link pendulum with constraints imposed on the possible rotation angles of each link is used as a model of the exoprosthetic finger. The cable-driven mechanism considered consists of four independent cables, each of which is attached to the corresponding link of the exoprosthetic finger at a specified distance. Each cable is independently actuated by a DC motor. Control is implemented using PI controllers based on the errors in the prescribed angular positions of each link. For this purpose, the required cable tension forces are calculated from the given angular positions of the links and are used to generate load torques for the actuators. The control system is tuned using a genetic algorithm. To verify the proposed approach, simulation has been carried out, which has demonstrated the feasibility of the considered control system for a cable-driven exoprosthetic finger of the human hand.

Keywords: biomechanical systems, control system, PI controller, cord mechanism control, genetic algorithm

REFERENCES

- [1] Shah G., Sharma A., Joshi D., Rathor A.S. Revolutionizing prosthetic hand control using non-invasive sensors and intelligent algorithms: A comprehensive review. *Computers and Electrical Engineering*, 2025, vol. 123, p. 110094. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2025.110094
- [2] Siegel J.R., Harwood J.K., Lau A.C., Brenneis D.J.A., Dawson M.R., Pilski P.M., Schofield J.S. A performance evaluation of commercially available and 3D-printable prosthetic hands: a comparison using the anthropomorphic hand assessment protocol. *BMC Biomedical Engineering*, 2024, vol. 6, no. 11, 14 p. DOI: 10.1186/s42490-024-00086-w
- [3] Joseph T.B., Jacob L.S., Aaron M.D., Richard F.W. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 2013, vol. 50, no. 5, pp. 599–618. DOI: 10.1682/jrrd.2011.10.0188
- [4] Deshpande A.D., Ko J., Fox D., Matsuoka Y. Control strategies for the index finger of a tendon-driven hand. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, vol. 32, no. 1, pp. 115–128. DOI: 10.1177/0278364912466925
- [5] Zhou X., Fu H., Shentu B., Wang W., Cai S., Bao G. Design and Control of a Tendon-Driven Robotic Finger Based on Grasping Task Analysis. *Biometrics*, 2024, vol. 9, no. 6, pp. 370–387. DOI: 10.3390/biomimetics9060370
- [6] Abdullah F., Asan Muthalif G.A., Azni N.W., Dzareeful M. Development of shape memory alloy (SMA) based artificial muscle for application in soft gripper. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2023, vol. 8, no. 3, pp. 1413–1426.
- [7] Liang C., Rogers C.A. Design of Shape Memory Alloy Actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, 1997, vol. 4, no. 8, pp. 303–313. DOI: 10.1177/1045389X9700800403

- [8] Zhetenbaev N.T., Nurgizat E.S., Balbaev G.K., Shingisov B.T., Estemesova G.D. Issledovanie i primeneniya pnevmaticheskikh iskusstvennykh myshts [Research and application of pneumatic artificial muscles]. *Engineering Journal of Satbayev University*, 2021, no. 143, pp. 217–225. DOI: 10.51301/vest.su.2021.v143.i1.27
- [9] Vertongen J., Kamper D.G., Smit G., Vallery H. Mechanical Aspects of Robot Hands, Active Hand Orthoses, and Prostheses: A Comparative Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 955–965. DOI: 10.1109/tmech.2020.3014182
- [10] Rodic A., Miloradovic B., Popic S., Krsenkovic I. Development of Antropomorphic Robot Hand of Modular Structure. *22nd International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*. Portotoz, 2013, pp. 11–13.
- [11] Geon L., Choi Y. Bio-Inspired Tendon-Driven Finger Design with Isomorphic Ligamentous Joint. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 18240–18251. DOI: 10.1109/access.2020.2968739
- [12] Hocaoglu E., Patoglu V. Design, Implementation, and Evaluation of a Variable Stiffness Transradial Hand Prosthesis. *Front Neurobot*, 2022, vol. 16, pp. 1–15. DOI: 10.3389/fnbot.2022.789210
- [13] Mottard A., Laliberté T., Gosselin C. Underactuated tendon-driven robotic/prosthetic hands: design issues. *Robotics: Science and Systems*, 2017, pp. 1–9. DOI: 10.15607/rss.2017.xiii.019
- [14] Bhalkikar A., Lokesh S., Ashwin K.P. Kinematic models for Cable-driven Continuum Robots with multiple segments and varying cable offsets. *Mechanism and Machine Theory*, 2024, vol. 200, p. 105701. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105701
- [15] Moussa K., Thieffry M., Claveau F., Chevrel P., Caro S. Dynamic models for simulation of Cable-Driven Parallel Robots with elasticity and sagging. *Mechanism and Machine Theory*. 2025, vol. 209, p. 105972. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2025.105972
- [16] Tan K., Shi H., Mei X., Geng T., Yang J. Control of Force Transmission for Cable-Driven Actuation System Based on Modified Friction Model with Compensation Parameters. *Control Engineering Practice*, 2024, p. 12. DOI: 10.2139/ssrn.4783604
- [17] Sainul I.A., Deb A.K., Deb S. Position and Impedance Control of a multi-finger tendon-driven robotic hand. *6th International and 27th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR-2016)*. Pune, Maharashtra, INDIA. 2016, 6 p.
- [18] Chen J., Han D. The Control of Tendon-Driven Dexterous Hands with Joint Simulation. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 1723–1739. DOI: 10.3390/s140101723
- [19] Nikafrooz N., Leonessa A. A Single-Actuated, Cable-Driven, and Self-Contained Robotic Hand Designed for Adaptive Grasps. *Robotics*, 2021, vol. 10, no. 4, p. 109. DOI: 10.3390/robotics10040109
- [20] Urrea C., Kern J., Álvarez E. Design and implementation of fault-tolerant control strategies for a real underactuated manipulator robot. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, vol. 8, pp. 5101–5123. DOI: 10.1007/s40747-022-00740-7
- [21] Priyanka R. *Tendon Driven Continuum Robots: Modeling and Motion Planning for Contact Aided Navigation and Shape Locking*. Toronto, University of Toronto, 2024, 148 p.
- [22] Rombokas E., Theodorou E., Malhotra M., Todorov E., Matsuoka Y. Tendon-Driven Control of Biomechanical and Robotic Systems: A Path Integral Reinforcement Learning Approach. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 208–214. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224650

- [23] Shirafuji S., Ikemoto S., Hosoda K. Development of a Tendon-Driven Robotic Finger for an Anthropomorphic Robotic Hand. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, vol. 33, no. 5, pp. 677–693. DOI: 10.1177/0278364913518357
- [24] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. New Jersey, Springer-Verlag, 2009, 182 p.
- [25] Zhou X., Fu H., Shentu B., Wang W., Cai S., Bao G. Design and Control of a Tendon-Driven Robotic Finger Based on Grasping Task Analysis. *Biometrics*, 2024, vol. 9, no. 6, pp. 370–387. DOI: 10.3390/biomimetics9060370
- [26] Smirnov D.A. Issledovanie dinamiki mekhanicheskoy sistemy sharnirnykh sterzhney s tremya stepenyami svobody [Study of the dynamics of a mechanical system of articulated rods with three degrees of freedom]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 11, pp. 2620–2624.
- [27] Zaika V.V., Maslennikov A.L. Matematicheskoe modelirovanie odnozvennogo sfericheskogo mayatnika v sfericheskoy sisteme koordinat [Mathematical modeling of a single-link spherical pendulum in a spherical coordinate system]. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal — Polytechnical Youth Journal*, 2019, no. 9, pp. 1–13. DOI: 10.18698/2541-8009-2020-01-566
- [28] Zaika V.V., Maslennikov A.L. Sintez sistemy regulirovaniya sfericheskogo mayatnika metodom kompensatsii nelineynostey [Synthesis of a control system for a spherical pendulum using nonlinear compensation]. *Fundamentalnye osnovy mekhaniki*, 2019, no. 4, pp. 74–79. DOI: 10.26160/2542-0127-2019-4-74-79
- [29] Zaika V.V., Maslennikov A.L. Tsifrovaya sistema upravleniya sfericheskim mayatnikom [Digital control system for a spherical pendulum]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, no. 21, pp. 82–88. DOI: 10.26160/2474-5901-2020-21-82-88
- [30] Safea M., Neto P., Bearee R. Robot dynamics: A recursive algorithm for efficient calculation of Christoffel symbols. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 142, p. 103589. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103589
- [31] Gellman H., McKellop H. Functional range of motion of the joints of the hand. *The Journal of Hand Surgery*, 1990, vol. 15A, no. 2, pp. 240–243. DOI: 10.1016/0363-5023(90)90102-W
- [32] Gracia-Ibanez V., Vergara M., Sancho-Bru J.L., Mora C.M., Piqueras C. Functional range of motion of the hand joints in activities of the International Classification of Functioning, Disability and Health. *Journal of Hand Therapy*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 337–347. DOI: 10.1016/j.jht.2016.08.001
- [33] Ansari U., Alam S. Hybrid Genetic Algorithm fuzzy rule based guidance and control for launch vehicle. *2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, 2011, pp. 178–185. DOI: 10.1109/isda.2011.6121651
- [34] Kuznetsov M.A., Maslennikov A.L. Nastroyka sistemy regulirovaniya dvukhrotornoy aerodinamicheskoy sistemy s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Tuning of a control system for a twin-rotor aerodynamic system using a genetic algorithm]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika — Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2023, no. 4, pp. 33–38. DOI: 10.25791/pribor.4.2023.1403
- [35] Koshkina A.A., Maslennikov A.L., Babenko M.D., Chulin N.A. Nastroyka konturov upravleniya bespilotnogo vozдушnogo sudna samoletnogo tipa s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Tuning of control loops of a fixed-wing unmanned aerial vehicle using a genetic algorithm]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2025, iss. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2025-2-2427

- [36] Scherbak O.Yu., Maslennikov A.L. Biotechnical system based on the wrist joint control system tuning via genetic algorithm. Russian journal of biomechanics, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 116–122. DOI: 10.15593/RJBiomech/2025.2.11
- [37] Maslennikov A.L., Scherbak O.Yu. Nastroika sistemy regulirovaniya sfericheskogo mayatnika s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma po zhelae-momu perekhodnomu protsessu [Tuning of a control system for a spherical pen-dulum using a genetic algorithm based on a desired transient response]. *Avtoma-tizatsiya. Sovremennye tekhnologii — Automation. Modern Technologies*, 2026, vol. 80, no. 2, pp. 51–58. DOI: 10.36652/0869-4931-2026-80-2-51-58

Shishkov I.A., Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: shishkovia@student.bmstu.ru

Scherbak O.Yu., Assistant, Department of Automatic Control Systems, Bauman Mos-cow State Technical University. e-mail: scherbak.olga.j@bmstu.ru

Maslennikov A.L., Senior Lecturer, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: amas@bmstu.ru