

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВодОВ ТРЕХСТЕПЕННОГО СТАЦИОНАРНОГО РЕАБИЛИТАЦИОННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Дони В., Замашкин В.В., Кубряк О.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: стационарный экзоскелет, верхняя конечность, динамическая модель, электропривод, передаточное число, программное движение, ПИД-регулятор, диаграмма нагрузки.

Аннотация. Проектирование приводов реабилитационного экзоскелета требует совместного учета пространственной динамики механизма, массово-инерционных характеристик сегментов руки, упругости сочленений, параметров электродвигателей, передач и системы управления. Цель работы – разработать расчетную последовательность и на ее основе определить и обосновать параметры приводов трехстепенного стационарного экзоскелета верхних конечностей. Построена нелинейная пространственная электромеханическая модель трехзвенной системы с пассивной инерционной нагрузкой сегментов руки человека, упругими элементами, вязким и сухим трением, эквивалентной электрической моделью бесколлекторного двигателя и ПИД-регуляторами. Программное движение сформировано полиномами пятой степени. Целочисленные передаточные числа предварительно отбирались по результатам обратной динамики с учетом продолжительных и пиковых ограничений, после чего проверялись в полной замкнутой модели. Получены временные зависимости моментов, скоростей, токов, напряжений и деформаций упругих элементов. Определен минимально допустимый набор передаточных чисел, обеспечивающий выполнение заданных ограничений и проектного критерия точности. Проверка по каталоговым характеристикам серийного бесколлекторного двигателя подтвердила реализуемость унифицированной приводной конфигурации. Предложенная методика связывает расчет нагрузок, определение передаточных чисел и оценку качества управления и может применяться при проектировании приводных модулей реабилитационных экзоскелетов.

DYNAMIC ANALYSIS AND JUSTIFICATION OF DRIVE PARAMETERS FOR A THREE-DEGREE-OF-FREEDOM STATIONARY UPPER-LIMB REHABILITATION EXOSKELETON

Doni V., Zamashkin V.V., Kubryak O.V.

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

Keywords: stationary exoskeleton, upper limb, dynamic model, electric drive, transmission ratio, prescribed motion, PID controller, load diagram.

Abstract. Designing drives for rehabilitation exoskeletons requires simultaneous consideration of the spatial dynamics of the mechanism, the mass and inertial properties of the human arm segments, joint elasticity, motor and transmission parameters, and the control system. The aim of this study is to develop a calculation procedure and use it to determine and justify the drive parameters of a three-degree-of-freedom stationary upper-limb rehabilitation exoskeleton. A nonlinear spatial electromechanical model of a three-link system was developed, including the passive inertial load of the human arm segments, elastic joint elements, viscous and Coulomb friction, an equivalent electrical model of a brushless motor, and PID controllers. The prescribed motion was generated using fifth-order polynomials. Integer transmission ratios were initially screened using inverse dynamics against continuous-duty and peak constraints and were subsequently verified in the complete closed-loop model. Time histories of torques, rotational speeds, currents, voltages, and elastic-element deflections were obtained. The minimum feasible set of transmission ratios satisfying the adopted constraints and the tracking-accuracy criterion was determined. Verification against the catalog data of a brushless servomotor confirmed the feasibility of a unified drive configuration. The proposed procedure integrates load calculation, transmission-ratio selection, and control-performance evaluation and can be applied to the design of drive modules for rehabilitation exoskeletons.

Введение

Нарушения двигательных функций верхних конечностей после инсульта ограничивают самостоятельность пациента и возможность выполнения повседневных действий.

Восстановление движений плечевого и локтевого суставов требует многократного воспроизведения заданных траекторий, контролируемого темпа и согласованного изменения углов в нескольких сочленениях [1, 2].

Роботизированные реабилитационные системы позволяют задавать кинематические параметры упражнения, регистрировать движение и воспроизводить нагрузочные режимы с меньшей зависимостью от субъективных действий оператора. Современные обзоры подтверждают широкое применение роботизированных систем в физической и нейрореабилитации [3, 4]. Конструктивные решения экзоскелетов верхних конечностей существенно влияют на требования к приводной системе [5].

Введение упругого элемента в силовую цепь сочленения снижает механическую жесткость взаимодействия и способствует ограничению ударных нагрузок. Последовательно-упругие приводы применяются в робототехнических, протезных и реабилитационных устройствах [6-9]. Одновременно упругий элемент вводит дополнительную динамическую координату, поэтому его жесткость должна быть согласована с параметрами двигателя, передачи и регулятора.

Расчет привода только по максимальному статическому моменту не учитывает инерционные составляющие программного движения, приведенную инерцию ротора двигателя, электрические ограничения и переходные процессы замкнутой системы. Недостаточно разработанным остается совместное определение передаточного числа и параметров управления для пространственной многосвязной системы с упругими сочленениями. В предлагаемой методике целочисленные передаточные числа сначала отбираются по электромеханическим ограничениям на основе обратной динамики, а затем уточняются по результатам моделирования полной замкнутой системы.

Цель работы – определить и обосновать параметры приводов трехстепенного стационарного реабилитационного экзоскелета верхних конечностей. Для достижения цели построена пространственная нелинейная модель, рассчитаны нагрузки при заданном программном движении, определены минимально допустимые передаточные числа и проверена работоспособность замкнутой системы с унифицированным бесколлекторным двигателем.

Материалы и методы исследования

Рассматривается модуль для правой верхней конечности. Кинематическая структура включает неподвижное основание и три последовательно соединенных подвижных звена: первое обеспечивает приведение и отведение плеча, второе – сгибание и разгибание в плечевом суставе, третье – сгибание и разгибание в локтевом суставе. Приводы и упругие элементы расположены в сочленениях (рис. 1).

Обобщенные координаты включают углы звеньев φ_i и углы выходных валов редукторов θ_i перед упругими элементами. Угол вала двигателя равен $n_i\theta_i$, где n_i – передаточное число. Деформация i -го упругого элемента определяется разностью $\delta_i = \varphi_i - \theta_i$. Вектор обобщенных координат имеет вид:

$$q = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T.$$

Ориентации звеньев определяются последовательным перемножением матриц поворота локальных систем координат. Положение центров масс и узловых точек вычисляется

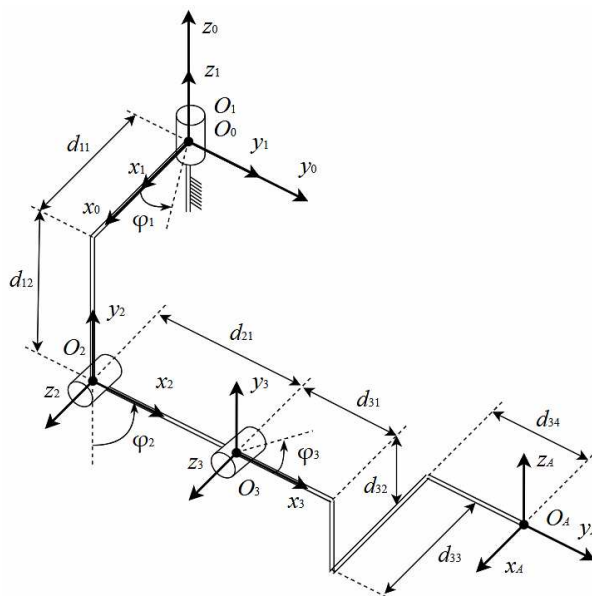


Рис. 1. Кинематическая схема модуля экзоскелета для правой верхней конечности

рекурсивно, а линейные и угловые скорости – дифференцированием соответствующих радиус-векторов и матриц ориентации:

$$R_{0i} = \prod_{k=1}^i R_{k-1,k}, \quad v_{C_i} = \frac{dr_{C_i}}{dt},$$

где R_{0i} – матрица ориентации i -го звена относительно неподвижной системы координат; $R_{k-1,k}$ – матрица относительного поворота соседних систем; r_{C_i} – радиус-вектор центра масс; v_{C_i} – его линейная скорость; t – время.

Уравнения движения получены в форме Лагранжа второго рода с учетом диссипативной функции Релея и неконсервативных обобщенных сил:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \dot{q}_j} = Q_j, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия; $\mathfrak{R}$ – диссипативная функция Релея; Q_j – неконсервативная обобщенная сила; q_j – соответствующая обобщенная координата.

Кинетическая энергия содержит поступательную и вращательную энергии звеньев, а также энергии роторов двигателей и элементов редукторов. Момент инерции ротора приводится к координате выходного вала множителем n_i^2 :

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (m_i v_{C_i}^T v_{C_i} + \omega_i^T J_i \omega_i + (n_i^2 J_{\partial\theta,i} + J_{p,i}) \dot{\theta}_i^2),$$

где m_i – масса i -го звена; v_{C_i} и ω_i – линейная скорость центра масс и угловая скорость звена; J_i – тензор инерции звена; $J_{\partial\theta,i}$ – момент инерции ротора двигателя; $J_{p,i}$ – момент инерции элементов передачи, приведенный к выходному валу; n_i – передаточное число.

Потенциальная энергия включает гравитационную составляющую и энергию деформации торсионных элементов:

$$\Pi = \sum_{i=1}^3 m_i g z_{C_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 c_i \delta_i^2,$$

где g – ускорение свободного падения; z_{C_i} – вертикальная координата центра масс; c_i – угловая жесткость упругого элемента.

Для всех сочленений принято $c_i = 300$ Н·м/рад, что соответствует порядку величины жесткостей, применяемых в последовательно-упругих приводах [10].

Вязкое трение учитывается функцией Релея, а сухое трение – гладкой аппроксимацией функции знака:

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (b_i \dot{\phi}_i^2 + b_{\partial\theta,i} n_i^2 \dot{\theta}_i^2), \quad M_f = M_c \frac{\dot{q}}{\sqrt{\dot{q}^2 + \varepsilon^2}},$$

где b , $b_{\partial\theta}$ – коэффициенты вязкого трения в сочленениях и двигателях соответственно; M_f – момент сухого трения; M_c , $M_{c,\partial\theta}$ – предельный момент сухого трения в сочленениях и двигателях соответственно; $\dot{q}$ – соответствующая обобщенная скорость; ε – параметр сглаживания.

В расчетах принято: $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-3}$ рад/с, $b_i = 3 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с/рад, $M_c = 3 \cdot 10^{-2}$ Н·м, $b_{\partial\theta} = 3 \cdot 10^{-5}$ Н·м·с/рад, $M_{c,\partial\theta} = 3 \cdot 10^{-3}$ Н·м. Сглаживание функции знака устраняет разрыв правых частей дифференциальных уравнений. Структура модели трения выбрана с учетом подходов, применяемых при идентификации робототехнических механизмов и электродвигателей [11, 12]. Численные значения коэффициентов заданы как расчетные оценки.

Бесколлекторный двигатель представлен эквивалентной моделью двигателя постоянного тока при идеализированной электронной коммутации. Электромагнитный момент и уравнение электрической цепи записываются как [13]:

$$M_{\partial\theta,i} = k_{t,i} i_i; \quad L_i = \frac{di_i}{dt} + R_i i_i + k_{e,i} n_i \dot{\theta}_i = u_i, \quad (2)$$

где k_t – постоянная момента двигателя; k_e – коэффициент противо-ЭДС; i – ток; L и R – индуктивность и активное сопротивление обмотки; u – приложенное напряжение; $\omega_{\partial\partial} = n\dot{\theta}$ – угловая скорость ротора двигателя.

Управляющее напряжение формируется ПИД-регулятором по ошибке угла звена $e_i = \varphi_{\text{прог},i} - \varphi_i$:

$$u_i = K_{p,i}e_i + K_{i,i} \int e_i dt + K_{d,i}\dot{e}_i; |u_i| \leq U_{dc}, \quad (3)$$

где K_p , K_i и K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты; U_{dc} – напряжение шины.

В численной модели предполагается непосредственное измерение углов выходных звеньев. В интегральном канале применена коррекция, предотвращающая накопление интегральной составляющей при насыщении.

Для оценки качества управления принят проектный критерий:

$$\max_{t \in [0, t_u]} |e_i(t)| \leq 0,5^\circ; i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где t_u – продолжительность полного программного цикла.

Допуск $0,5^\circ$ принят как проектное требование: для рабочих диапазонов координат 83° , 135° и 120° он соответствует относительному отклонению не более $0,6\%$.

Программное движение задается по участкам полиномом пятой степени [14]. Для нормированного времени $s = \frac{t - t_k}{t_{k+1} - t_k}$ закон изменения угла имеет вид:

$$\varphi_{\text{прог},i}(t) = \varphi_{i,k} + (\varphi_{i,k+1} - \varphi_{i,k})(10s^3 - 15s^4 + 6s^5), \quad (5)$$

где $\varphi_{i,k}$ и $\varphi_{i,k+1}$ – заданные угловые положения i -го звена соответственно в начале и конце k -го участка программного движения, t_k и t_{k+1} – моменты времени, соответствующие началу и концу данного участка.

На границах каждого участка скорости и ускорения равны нулю, что исключает скачки этих величин при переходе между узловыми положениями. Значения углов и соответствующие моменты времени приведены в таблице 1.

Табл. 1. Узловые значения программного движения

t , с	φ_1 , град	φ_2 , град	φ_3 , град
0	0	0	0
2	0	135	0
4	0	90	0
6	0	90	120
8	0	90	0
10	23	90	0
12	-60	90	0
14	0	90	0
16	0	0	0
18	0	0	0

Массово-инерционные характеристики сегментов руки для расчетного пользователя массой 80 кг и ростом 180 см определены по регрессионной антропометрической модели, систематизированной в [15]. Массы звеньев включают конструктивные элементы, установленные мотор-редукторные узлы и пассивную инерционную нагрузку соответствующих сегментов руки. Основные параметры приведены в таблице 2.

До выбора конструктивного исполнения передач их приведенные моменты инерции и коэффициенты полезного действия заданы расчетными значениями. Для всех трех передач принято $\eta = 0,70$; это значение используется как при предварительном отборе, так и при окончательной проверке.

Табл. 2. Основные параметры расчетной модели

Параметр	Звено 1	Звено 2	Звено 3
Характерный размер, м	$d_{11} = 0,115$; $d_{12} = 0,246$	$d_{21} = 0,251$	$d_{31} = 0,108$; $d_{32} = 0,055$; $d_{33} = 0,115$; $d_{34} = 0,220$
Масса звена, кг	2,0	3,824	1,806
Момент инерции ротора $J_{\partial\partial}$, кг·м ²	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
Момент инерции передачи J_p , кг·м ²	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$
Жесткость c , Н·м/рад	300	300	300
КПД передачи η	0,70	0,70	0,70

Предварительный подбор выполнялся по обратной динамике. При идеальном воспроизведении программного движения для каждого целого передаточного числа n_i в диапазоне 1-70 вычислялись скорость ротора двигателя и требуемый электромагнитный момент двигателя:

$$\begin{cases} \omega_{\partial\partial,i} = n_i \dot{\varphi}_{\text{прог},i}, \\ M_{\partial\partial,i} = \frac{M_{\text{треб},i}}{\eta_i n_i} + J_{\partial\partial,i} n_i \ddot{\varphi}_{\text{прог},i} + b_{\partial\partial,i} \omega_{\partial\partial,i} + M_{c,\partial\partial,i} \frac{\omega_{\partial\partial,i}}{\sqrt{\omega_{\partial\partial,i}^2 + \varepsilon^2}}, \end{cases} \quad (6)$$

где $M_{\text{треб},i}$ – требуемый момент в i -м сочленении, определяемый из уравнений обратной динамики при заданном программном движении.

По найденному моменту определялись ток и требуемое напряжение двигателя:

$$i_i = \frac{M_{\partial\partial,i}}{k_{t,i}}; \quad u_i = L_i \frac{di_i}{dt} + R_i i_i + k_{e,i} \omega_{\partial\partial,i}.$$

Допустимость варианта определялась совокупностью ограничений по среднеквадратическим (СКЗ) и пиковым значениям момента и тока, а также по максимальной частоте вращения и требуемому напряжению:

$$\begin{cases} k_{np} M_{\partial\partial,i,CKЗ} \leq M_{\text{ном}}, & k_{\text{пик}} M_{\partial\partial,i,\text{max}} \leq M_{\text{пик}}, \\ k_{np} I_{i,CKЗ} \leq I_{\text{ном}}, & k_{\text{пик}} I_{i,\text{max}} \leq I_{\text{пик}}, \\ k_{\omega} \omega_{\partial\partial,i,\text{max}} \leq \omega_{\text{max}}, & U_{i,\text{max}} \leq 0,95 U_{dc}, \end{cases} \quad (7)$$

где $M_{\text{ном}}$ и $M_{\text{пик}}$ – соответственно номинальный и пиковый допустимые моменты двигателя, $I_{\text{ном}}$ и $I_{\text{пик}}$ – номинальный и пиковый допустимые токи двигателя, ω_{max} – максимально допустимая угловая скорость ротора двигателя.

В условиях отбора $k_{np} = 1,10$ – коэффициент запаса для продолжительного режима; $k_{\text{пик}} = 1,05$ – коэффициент запаса для пиковых величин; $k_{\omega} = 1,05$ – коэффициент запаса по частоте вращения.

Среднеквадратические значения определялись за полный программный цикл:

$$X_{CKЗ} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} X^2(t) dt}, \quad (8)$$

где $X(t)$ – рассматриваемая величина.

Проверка СКЗ момента и СКЗ тока характеризует продолжительную тепловую нагрузку двигателя, поскольку потери в обмотке пропорциональны i^2 . Пиковые момент и ток используются для оценки кратковременных перегрузок; дополнительно контролируются максимальная частота вращения и требуемое напряжение.

Для проверки расчетных требований использованы каталоговые параметры бесколлекторного сервомотора типа Fulling FL38SV10-48V и сервопривода SVD4812RC-AA (табл. 3). Числовые параметры приняты по технической документации производителя.

Табл. 3. Каталогные параметры двигателя и драйвера

Параметр	Значение
Номинальная мощность, Вт	100
Номинальное напряжение, В	48
Сопротивление обмотки, Ом	0,88
Индуктивность обмотки, мГн	0,78
Постоянная момента, Н·м/А	0,074
Номинальный / пиковый момент, Н·м	0,32 / 0,96
Номинальный / пиковый ток двигателя, А	4,3 / 12,9
Номинальная / максимальная частота, об/мин	3000 / 6000
Момент при максимальной частоте, Н·м	0,16
Момент инерции ротора, кг·м ²	$4,0 \cdot 10^{-6}$
Масса двигателя, кг	0,50
Допустимый ток драйвера: продолжительный / пиковый, А	12 / 45
Диапазон питания драйвера, В	20-56

После выбора передаточных чисел решалась полная система нелинейных дифференциальных уравнений, сформированная на основе уравнений движения (1), электромеханической модели двигателя (2) и закона управления (3). Коэффициенты ПИД-регуляторов уточнялись итерационно и составили:

$$K_p = \{1100; 1140; 590\}, K_i = \{0; 710; 590\}, K_d = \{440; 42; 24\}.$$

Результаты исследования

Предварительный расчет (6) и проверка ограничений (7) дали минимальные допустимые передаточные числа 3, 56 и 14. Для первого и третьего приводов меньшие значения 2 и 13 не удовлетворяли установленным ограничениям уже на предварительном этапе. Для второго привода значение 56 прошло предварительный отбор, однако в полной замкнутой модели рассчитанное по (8) СКЗ тока с учетом коэффициента запаса оказалось выше номинального значения.

Последующая проверка при $n_2 = 57$ обеспечила выполнение всех ограничений (7) и критерия точности (4). Таким образом, при фиксированных параметрах двигателя, КПД передач, коэффициентах запаса, программном движении и настройках регуляторов набор $n = \{3; 57; 14\}$ является минимально допустимым в рассматриваемом целочисленном диапазоне.

Фактические углы звеньев, а также ошибки слежения приведены на рисунке 2.

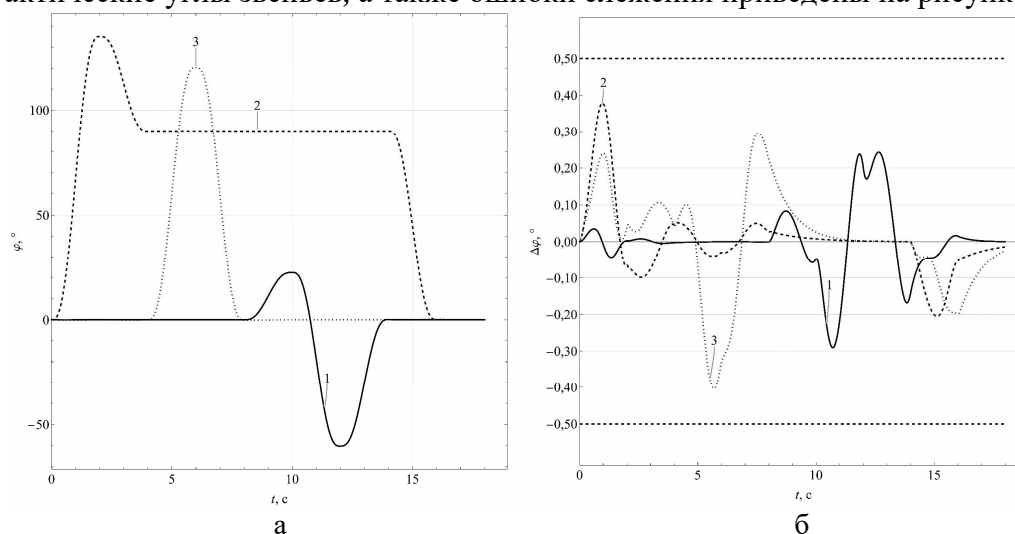


Рис. 2. Углы звеньев и отклонения от программного движения: а – фактические углы; б – ошибки слежения

Максимальные абсолютные ошибки составили $0,289^\circ$ для первого, $0,378^\circ$ для второго и $0,401^\circ$ для третьего сочленения. Наибольшее значение не превышает допуска, установленного критерием (4).

Пространственная траектория конечной точки при программном движении, сформированном согласно (5), приведена на рисунке 3.

Расчетные механические показатели приведены в таблице 4. Второе сочленение является наиболее нагруженным: пиковый требуемый момент равен $14,246 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а среднеквадратический – $11,346 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Для первого и третьего сочленений пиковые моменты составили $1,342$ и $3,669 \text{ Н}\cdot\text{м}$ соответственно.

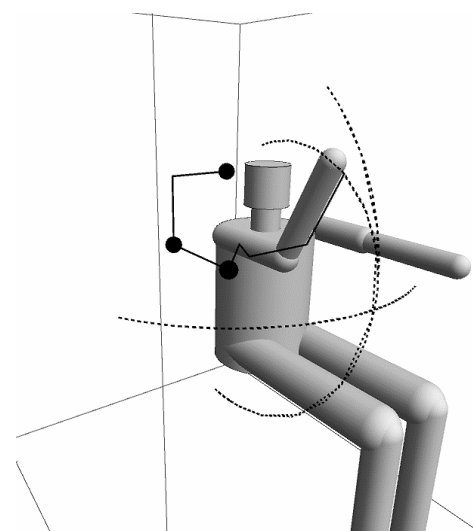


Рис. 3. Пространственная траектория движения верхней конечности при программном движении

Табл. 4. Точность и механические показатели приводов

№	n_i	$\Delta\varphi_{\max}$, град	$M_{\text{треб, макс}}$, Н·м	$M_{\text{треб, СКЗ}}$, Н·м	$M_{\text{дв, макс}}$, Н·м	$M_{\text{дв, СКЗ}}$, Н·м	$\omega_{\text{дв, макс}}$, об/мин
1	3	0,289	1,342	0,402	0,648	0,193	38,6
2	57	0,378	14,246	11,346	0,354	0,280	1239,2
3	14	0,401	3,669	2,684	0,378	0,276	261,2

Временные зависимости требуемых моментов в сочленениях и электромагнитных моментов двигателей приведены на рисунке 4.

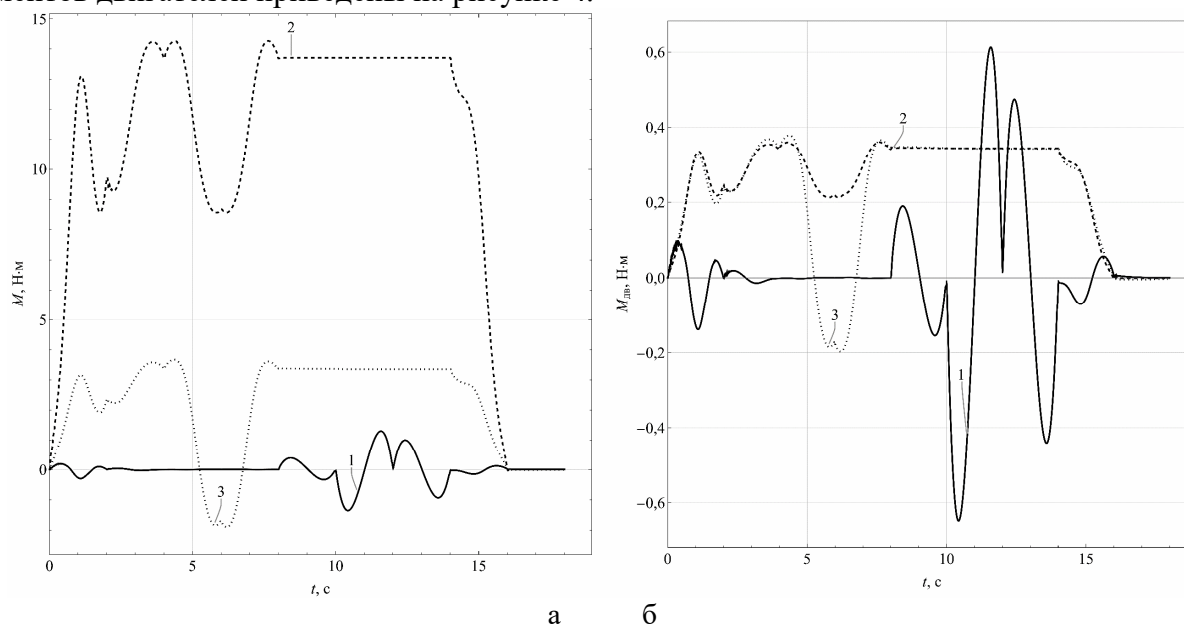


Рис. 4. Временные зависимости моментов: а – требуемые моменты в сочленениях; б – электромагнитные моменты двигателей

Электрические показатели и деформации упругих элементов приведены в табл. 5. Наибольший пиковый ток возникает в первом приводе, а наибольшее СКЗ тока – во втором. С учетом принятых коэффициентов запаса продолжительные и кратковременные ограничения двигателя выполняются. Максимальное требуемое напряжение равно $10,019 \text{ В}$; насыщение по напряжению отсутствует.

Табл. 5. Электрические показатели и состояния упругих элементов

№	$I_{\max}$, А	$I_{СКЗ}$, А	$U_{\max}$, В	$\delta_{\max}$, град	$M_{уп, \max}$, Н·м
1	8,757	2,607	7,793	0,259	1,354
2	4,788	3,787	10,019	2,724	14,265
3	5,110	3,731	5,181	0,701	3,671

Максимальная деформация второго упругого элемента составила $2,724^\circ$. При жесткости 300 Н·м/рад ей соответствует момент $14,265 \text{ Н·м}$, что согласуется с расчетной нагрузкой второго сочленения.

Диаграммы нагрузки построены в координатах «частота вращения – момент двигателя» и сопоставлены с номинальной и пиковой ограничивающими огибающими, сформированными по каталоговой характеристике двигателя (рис. 5).

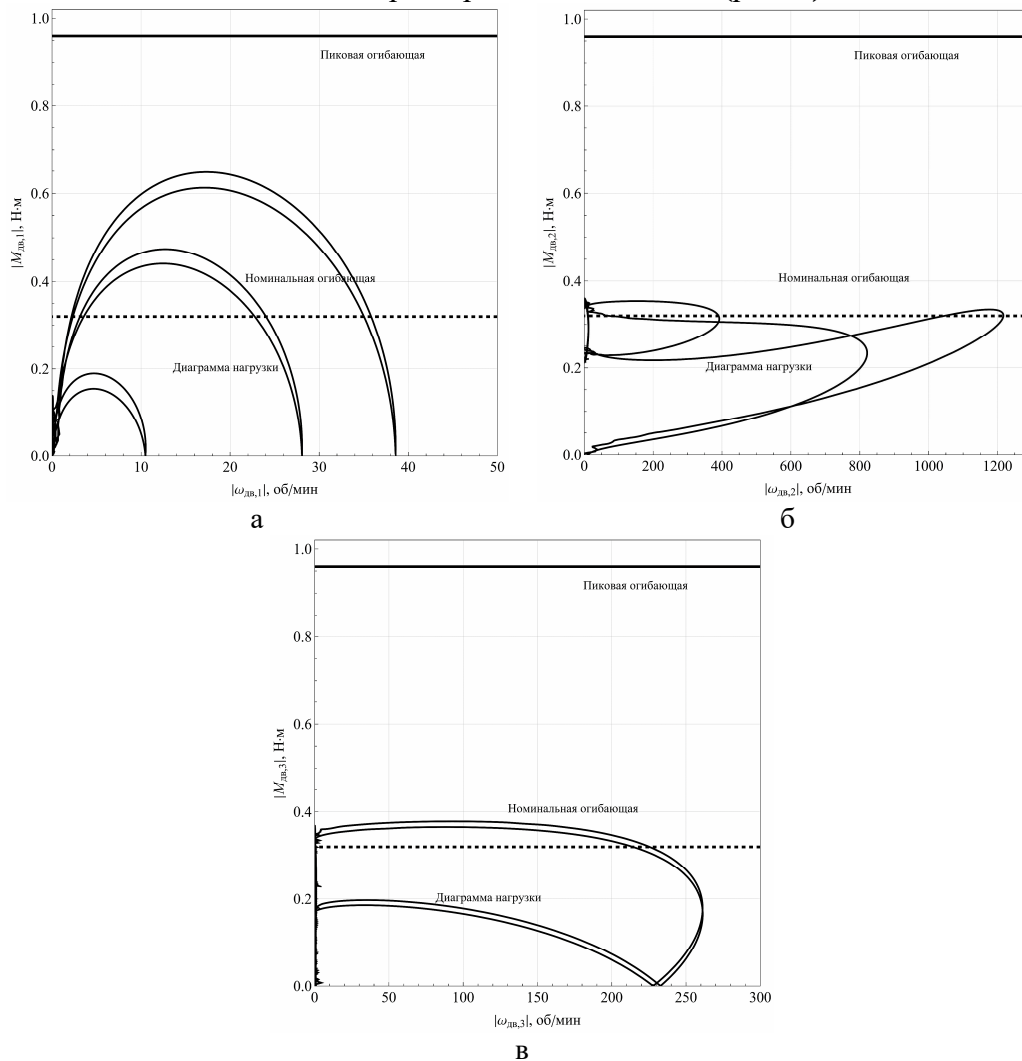


Рис. 5. Диаграммы нагрузки и расчетные каталоговые огибающие двигателя: а – первое; б – второе; в – третье сочленение

СКЗ моментов двигателей с коэффициентом запаса 1,10 не превышают номинальный момент $0,32 \text{ Н·м}$, а максимальные значения с коэффициентом 1,05 остаются ниже пикового момента $0,96 \text{ Н·м}$. Наиболее быстроходным является второй привод; максимальная частота его ротора составляет $1239,2 \text{ об/мин}$ при допустимых 6000 об/мин .

Трехмерная модель прототипа иллюстрирует общую компоновку стационарного двухстороннего устройства и размещение приводных узлов, соответствующих конструкции, защищенной патентом РФ на полезную модель №239006 (рис. 6).

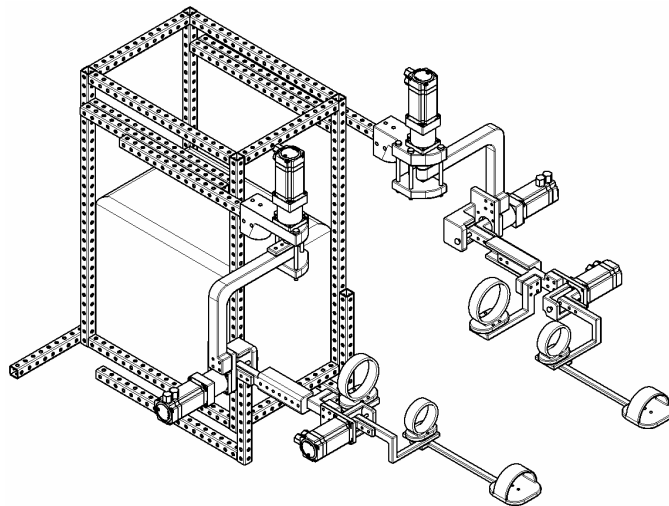


Рис. 6. Трехмерная модель прототипа стационарного экзоскелета

Обсуждение

Предложенная расчетная последовательность объединяет пространственную динамику, целочисленный подбор передаточных чисел и проверку замкнутой электромеханической системы. Передаточное число определяется с учетом максимальной и продолжительной нагрузки, скорости ротора двигателя, электрических ограничений и точности слежения. Отличие от выбора по одному статическому моменту состоит в проверке того же варианта в полной системе с упругими элементами и регуляторами.

Сопоставление предварительного и полного расчетов показало, что обратная динамика дает необходимую, но недостаточную оценку. Для второго сочленения $n_2 = 56$ удовлетворяло предварительным ограничениям, однако в замкнутой модели десятипроцентный запас по СКЗ тока не обеспечивался. Увеличение отношения до 57 снизило продолжительную токовую нагрузку и привело к выполнению всех критериев. Проверка соседних целых значений подтверждает минимальность принятого набора в рамках заданной постановки.

Использование одинакового двигателя в трех сочленениях упрощает унификацию приводных модулей. Различие нагрузок компенсируется передаточными числами: первый привод характеризуется наибольшей кратковременной перегрузкой, второй определяет продолжительный режим и требуемый выходной момент передачи, третий занимает промежуточное положение. Единый расчетный КПД $\eta = 0,70$ формирует консервативную оценку необходимой редукции до выбора конкретных передач.

Полученные коэффициенты ПИД-регуляторов обеспечивают максимальную ошибку менее $0,5^\circ$ без насыщения по напряжению. Деформации упругих элементов соответствуют передаваемым моментам и принятой жесткости, что подтверждает согласованность механической и электрической частей модели.

При конструктивной реализации необходимо подобрать передачи с отношениями, близкими к 3, 57 и 14, и уточнить их фактические КПД, приведенные моменты инерции, люфты и допустимые нагрузки. Экспериментальная идентификация трения и тепловые испытания двигателей позволят уточнить расчетные запасы опытного образца.

Выводы

Разработана пространственная нелинейная электромеханическая модель трехстепенного модуля стационарного экзоскелета, учитывающая пассивную инерционную нагрузку сегментов руки, упругие элементы, трение, электрическую динамику бесколлекторных двигателей и замкнутое ПИД-управление.

Предложена двухэтапная процедура определения передаточных чисел: предварительный целочисленный перебор по обратной динамике и окончательная проверка в полной замкнутой модели по продолжительному и пиковому моменту, току, частоте вращения, напряжению и точности слежения.

Для принятых параметров минимально допустимые передаточные числа составили 3, 57 и 14. Максимальные требуемые моменты в сочленениях равны 1,342; 14,246 и 3,669 Н·м. При коэффициентах $K_p = \{1100; 1140; 590\}$, $K_i = \{0; 710; 590\}$ и $K_d = \{440; 42; 24\}$ максимальные ошибки слежения составили 0,289°; 0,378° и 0,401° и не превысили проектный критерий 0,5°.

Расчет с параметрами двигателя типа Fulling FL38SV10-48V подтвердил выполнение ограничений по продолжительному и пиковому моменту, току, частоте вращения и напряжению для всех трех приводов. Полученные результаты задают требования к передаточным механизмам и исходные данные для конструктивной разработки приводных модулей.

Заключение

Разработанная методика позволяет согласованно определять нагрузки в сочленениях, минимально допустимые передаточные числа и параметры управления трехстепенного реабилитационного экзоскелета. Полная электромеханическая проверка уточняет результаты обратной динамики и выявляет граничные режимы по продолжительному току. Полученная конфигурация с унифицированным двигателем и различными передаточными числами может служить основой для выбора конструктивных исполнений передач и изготовления опытного образца.

Благодарности и финансирование

Авторы благодарят администрацию НИУ «МЭИ» и заведующего кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин И.В. Меркурьева за организационную поддержку и обсуждение инженерных решений. Исследование выполнено без внешнего финансирования.

Список литературы / References

1. Koh K., Oppizzi G., Baghi R., Kehs G.J., Zhang L.Q. Loss of joint individuation and abnormal synergy post stroke in upper limb movements // *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2025, vol. 39, no. 9, pp. 715-727. doi.org/10.1177/15459683251340914.
2. Shahid J., Kashif A., Shahid M.K. A comprehensive review of physical therapy interventions for stroke rehabilitation: impairment-based approaches and functional goals // *Brain Sciences*. 2023, vol. 13, no. 5, p. 717. doi.org/10.3390/brainsci13050717.
3. Banyai A.D., Brişan C. Robotics in physical rehabilitation: systematic review // *Healthcare*. 2024, vol. 12, no. 17, p. 1720. doi.org/10.3390/healthcare12171720.
4. Bonanno M., Calabrò R.S. Robot-aided motion analysis in neurorehabilitation: benefits and challenges // *Diagnostics*. 2023, vol. 13, no. 23, p. 3561. doi.org/10.3390/diagnostics13233561.
5. Palazzi E., Luzi L., Dimo E., Meneghetti M., Vicario R., Luzia R.F., Vertechy R., Calanca A. An affordable upper-limb exoskeleton concept for rehabilitation applications // *Technologies*. 2022, vol. 10, no. 1, p. 22. doi.org/10.3390/technologies10010022.
6. Zhao C., Liu Z., Zhu L., Wang Y. Design and research of series actuator structure and control system based on lower limb exoskeleton rehabilitation robot // *Actuators*. 2024, vol. 13, no. 1, p. 20. doi.org/10.3390/act13010020.
7. Grimmer M., Eslamy M., Seyfarth A. Energetic and peak power advantages of series elastic actuators in an actuated prosthetic leg for walking and running // *Actuators*. 2014, vol. 3, no. 1, pp. 1-19. doi.org/10.3390/act3010001.
8. Yun W., Kim J., Oh S. Novel series elastic actuator towards high torque capacity with high sensitive torque measurement // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2024, vol. 9, no. 6, pp. 5425-5432. doi.org/10.1109/LRA.2024.3393213.
9. Rosales-Luengas Y., Centeno-Barreda D., Salazar S., Flores J., Lozano R. Movement intent detection for upper-limb rehabilitation exoskeleton based on series elastic actuator as force sensor // *Actuators*. 2024, vol. 13, no. 8, p. 284. doi.org/10.3390/act13080284.
10. Accoto D., Carpino G., Sergi F., Tagliamonte N.L., Zollo L., Guglielmelli E. Design and characterization of a novel high-power series elastic actuator for a lower limb robotic orthosis // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013, vol. 10, no. 10, p. 359. doi.org/10.5772/56927.
11. Hao L., Pagani R., Beschi M., Legnani G. Dynamic and friction parameters of an industrial robot: identification, comparison and repetitiveness analysis // *Robotics*. 2021, vol. 10, no. 1, p. 49. doi.org/10.3390/robotics10010049.
12. Virgala I., Kelemen M. Experimental friction identification of a DC motor // *International Journal of Mechanics and Applications*. 2013, vol. 3, no. 1, pp. 26-30. doi.org/10.5923/j.mechanics.20130301.04.

13. Altay A., Yildiz A.B. Complete electrical equivalent circuit based modeling and analysis of permanent magnet direct current (DC) motors // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. 2022, vol. 21, pp. 182-187. doi.org/10.37394/23201.2022.21.20.
14. Guo F., Zhang H., Xu Y., Xiong G., Zeng C. Isokinetic rehabilitation trajectory planning of an upper extremity exoskeleton rehabilitation robot based on a multistrategy improved whale optimization algorithm // Symmetry. 2023, vol. 15, no. 1, p. 232. doi.org/10.3390/sym15010232.
15. Cicchella A. Development of the biomechanical technologies for the modeling of major segments of the human body: linking the past with the present // Biology. 2020, vol. 9, no. 11, p. 399. doi.org/10.3390/biology9110399.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Дони Владлен – ассистент кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Doni Vladlen – assistant of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Замашкин Валерий Владимирович – ассистент кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Zamashkin Valery Vladimirovich – assistant of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Кубряк Олег Витальевич – доктор биологических наук, профессор кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Kubryak Oleg Vitalievich – doctor of biological sciences, professor of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
donivladlen@mail.ru	

Получена 16.08.2026