

УПРАВЛЕНИЕ НА СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ БИОМЕХАТРОННЫМ МАНИПУЛЯТОРНЫМ ПРОТЕЗОМ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЭГ И ЭМГ

Нимирич Н.С.¹, Филимонов Н.Б.^{1,2}

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;*

²*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*

Ключевые слова: протез верхней конечности, манипулятор, кинематика, параметры Денавита-Хартенберга, динамика, биомеханика, управление, метод скользящих режимов.

Аннотация. Статья посвящена разработке и исследованию алгоритма управления биомехатронным протезом верхней конечности (БМП ВК) с многозвенной структурой, содержащей семи-степенной манипулятор. Особенностью рассматриваемой системы управления протезом является возможность формирования управляющего воздействия на основе данных измерения электроэнцефалографии ЭЭГ и электромиографии ЭМГ. Представлена математическая модель БМП ВК как объекта управления, включая модели его кинематики и динамики. Кинематическая модель описана с использованием матриц однородного преобразования и параметров Денавита–Хартенберга, а динамическая модель описана с использованием метода Лагранжа–Эйлера. Синтезирован алгоритм управления БМП ВК на основе метода скользящих режимов. Приводятся результаты компьютерной апробации данного алгоритма управления протезом.

SLIDING MODE CONTROL OF BIOMECHATRONIC PROSTHETIC MANIPULATOR OF UPPER EXTREMITIES BASED ON EEG AND EMG

Nimirich N.S.¹, Filimonov N.B.^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow;*

²*V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, Moscow*

Keywords: upper limb prosthesis, manipulator, kinematics, Denavit-Hartenberg parameters, dynamics, biomechanics, control, sliding mode method.

Abstract. The article is devoted to the development and research of an algorithm for controlling a biomechatronic upper limb prosthesis (BULP) with a multi-link structure containing a seven-degree manipulator. A feature of the considered prosthetic control system is the possibility of forming a control effect based on measurement data from electroencephalography and electromyography. A mathematical model of the BULP as a control object is presented, including models of its kinematics and dynamics. The kinetic model is described using homogeneous transformation matrices and Denavit–Hartenberg parameters, while the dynamic model is described using the Lagrange–Euler method. A BULP control algorithm based on the sliding mode method is synthesized. The results of computer testing of this prosthesis control algorithm are presented.

Введение

Протезирование верхних конечностей (ВК) – органов опорно-двигательного аппарата человека, остаётся одной из наиболее значимых и сложных задач современной биомедицинской инженерии. При этом, несмотря на достигнутые успехи в развитии конструкций, технологий и материалов протезов ВК, все большую актуальность приобретают исследования, направленные на их совершенствование путем интеграции с нервно-мышечной системой человека.

Управление является одной из ключевых проблем в разработке протезов ВК, поскольку именно от эффективности управляющих алгоритмов зависит точность, надежность и отзывчивость движений искусственной конечности. Сложность задачи управления ВК обусловлена необходимостью согласования биомеханических, нейрофизиологических и инженерных параметров, обеспечивающих приспособленность системы управления к индивидуальным особенностям человека. Настоящая статья посвящена разработке и исследованию алгоритма управления биомехатронного манипуляторного протеза (БМП) ВК, основанного на одном из наиболее популярных современных методов теории нелинейного управления динамическими объектами – *методе скользящих режимов*.

Особенности БМП ВК, управляемых на основе ЭЭГ и ЭМГ

БМП ВК – это техническая система, имитирующая анатомические и функциональные свойства здоровой руки человека, в которой реализованы электронные и механические компоненты для восстановления утраченных моторных функций. Работа протеза основана на преобразовании биологических сигналов, получаемых при помощи электроэнцефалографии (ЭЭГ) и электромиографии (ЭМГ), в команды управления, которые обрабатываются микропроцессором и реализуются исполнительными механизмами (моторами, приводами), обеспечивая захват, удержание и манипуляции предметами.

Принцип работы системы управления БМП ВК на основе сигналов ЭЭГ и ЭМГ показан на рисунке 1.

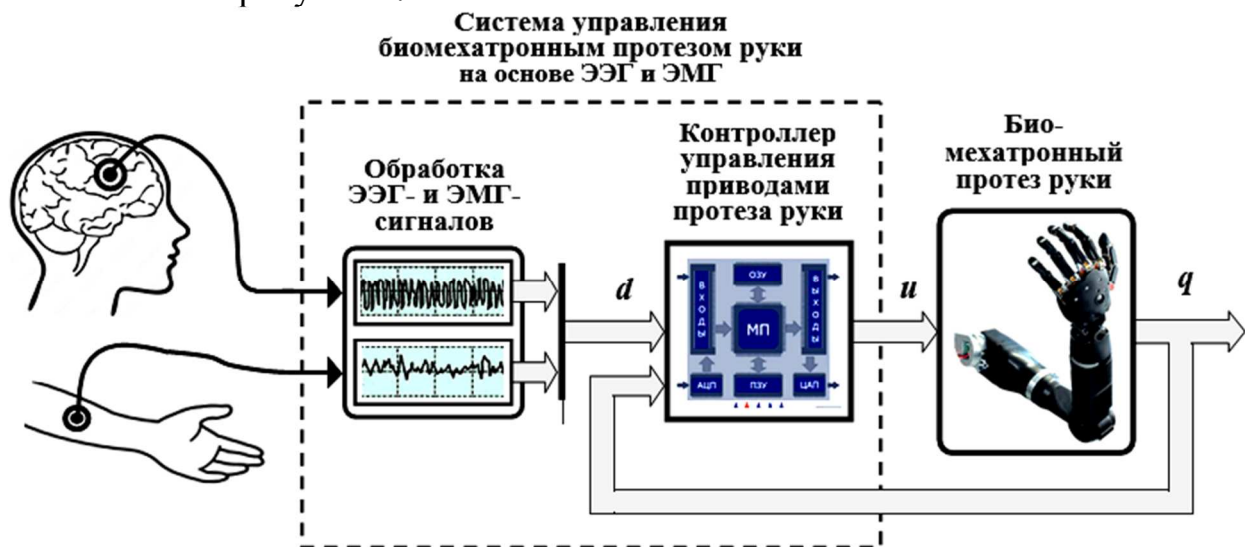


Рис. 1. Принцип работы БМП ВК

Здесь с датчиков, закреплённых на коже головы, снимаются электрические сигналы мозга ЭЭГ, а электродами с двух групп мышц культи (сгибателей и разгибателей) снимаются электрические сигналы мышц ЭМГ. Данные сигналы сначала поступают в блок обработки, где происходит их фильтрация, усиление и выделение ключевых признаков для последующего распознавания, а затем передаются на контроллер управления приводами протеза, который преобразует команды в управляющие сигналы приводами протеза для управления искусственной электромеханической рукой.

Ключевым элементом системы управления БМП ВК является контроллер управления, осуществляющий интерпретацию и преобразование биологических

сигналов в конкретные команды исполнительным механизмам протеза, обеспечивая корректную и скоординированную работу системы управления.

Аналогичные системы управления протезом ВК с применением сигналов ЭЭГ и ЭМГ приведены в работах [1, 2].

Математическая модель БМП ВК как объекта управления

Кинематическая схема такого манипулятора представлена на рисунке 2. Здесь подход к конструкции протеза как к манипулятору, представляющего сложную кинематическую цепь, составленную многочисленными шарнирными сочленениями её частей в суставах, обусловлена многозвенчатой структурой, пространственной степенью подвижности и необходимостью точного позиционирования ВК для выполнения разнообразных действий. Применение математического аппарата, используемого в робототехнике для манипуляторов, позволяет формализовать кинематику и динамику, а также задачу управления БМП ВК. Кинематическая схема такого древовидного семи-степенного манипулятора приведена на рисунке 2, причем похожая схема манипулятора представлена в работе [3].

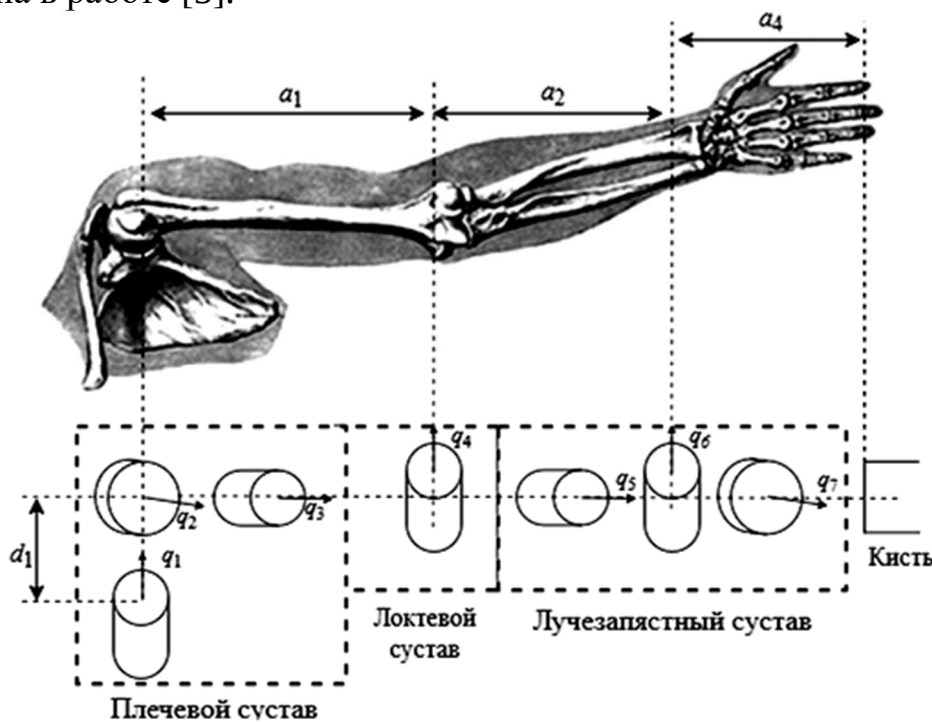


Рис. 2. Кинематическая схема БМП ВК

В работе [4] разработана математическая модель движения БМП ВК, включающая его кинематическую и динамическую модели.

Для получения **кинематической модели** БМП ВК, определяющей пространственное положение протеза, используется либо представление Денавита–Хартенберга, либо методы однородных преобразований и блочных матриц.

Для получения **динамической модели** БМП ВК используется метод Лагранжа–Эйлера, согласно которому уравнение динамики манипулятора протеза (общая форма уравнения Лагранжа второго рода) имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

где $\mathbf{q}$ – 7х1-вектор обобщённых координат (углы суставов), $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ – матрица масс (инерции), $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – центробежные и кориолисовы силы, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ – гравитационные силы, $\boldsymbol{\tau}$ – управляющие моменты (сигналы на приводы).

Эта система уравнений связывает динамические характеристики манипулятора (его массы, моменты инерции, силы приводов) с его движением и позволяет рассчитывать требуемые усилия для достижения желаемых положений.

Вводя в рассмотрение вектор состояния $x_1 = q$, уравнение динамики БМП ВК (1) можно переписать в виде следующей системы уравнений в переменных состояния:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)(u - C(x_1, x_2)x_2 - G(x_1)). \quad (3)$$

Постановка задачи следящего управления БМП ВК

Сформулируем следующую задачу следящего управления: для БМП ВК, описываемого уравнениями (2)–(3), требуется синтезировать управляющий вектор $u = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7)^T$, обеспечивающий отслеживание вектором управляемых переменных $q = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7)^T$ вектор произвольно заданной программной траектории $q_d(t) = (q_{d1}(t), q_{d2}(t), q_{d3}(t), q_{d4}(t), q_{d5}(t), q_{d6}(t), q_{d7}(t))^T$ произвольно заданной программной траектории, то есть выполнение следующего целевого условия управления:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0, e(t) = q(t) - q_d(t).$$

Метод и алгоритм управления БМП ВК на скользящих режимах

В современной теории и практики автоматического управления одним из наиболее популярных методов нелинейного управления динамическими объектами является **метод скользящих режимов** (Sliding Mode Control) [5]. Данный метод основан на использовании релейного алгоритма управления для организации в системе управления с переменной структурой особого движения в виде переключений с большой частотой, именуемого *скольжением*. В результате, реализованный скользящий режим способен обеспечить в системе управления в условиях неопределенности свойство робастности, т.е. малой чувствительности динамических характеристик системы (устойчивости и качества процессов управления) к действующим неконтролируемым параметрическим возмущениям модели динамики управляемого объекта.

Организация в системе управления БМП ВК скользящего режима заключается в обеспечении следующего условия:

$$\dot{s}(x_1, x_2, t) = 0.$$

путем формирования управления в виде двух слагаемых:

$$u = u_s + u_r,$$

где u_s – управление, обеспечивающее движение системы на поверхности скольжения s , а u_r – релейное управление $\text{sign}(s)$, обеспечивающее движение системы к поверхности скольжения s .

При этом условие устойчивости скользящего режима имеет вид

$$s(x_1, x_2, t)\dot{s}(x_1, x_2, t) < 0.$$

Для синтеза алгоритма управления u методом скользящих режимов, требуется задать поверхность скольжения s в виде вектора размера 7×1 :

$$s = \dot{e} + c_1 e,$$

где $e = x_1 - x_d$ – ошибка относительно заданного состояния, c_1 – диагональная числовая матрица размера 7×7 .

Нетрудно получить следующее выражение для производной от $s(x_1, x_2, t)$:

$$\dot{s}(x_1, x_2, t) = \ddot{e} + c_1 \dot{e} = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} + c_1(x_2 - x_{2d}).$$

Из условия $\dot{s}(x, t) = 0$ следует:

$$\dot{s}(x_1, x_2, t) = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} + c_1(x_2 - x_{2d}) = 0,$$

$$M^{-1}(x_1)(u - C(x_1, x_2)x_2 - G(x_1)) - \dot{x}_{2d} + c_1(x_2 - x_{2d}) = 0.$$

Откуда находим:

$$u_r = M(x_1)(\dot{x}_{2d} - c_1(x_2 - x_{2d})) + C(x_1, x_2)x_2 + G(x_1).$$

Окончательный алгоритм управление БМП ВК будет иметь вид:

$$u = M(x_1)(\dot{x}_{2d} - c_1(x_2 - x_{2d}) - \frac{c_2 s}{|s| + \varepsilon}) + C(x_1, x_2)x_2 + G(x_1), \quad (4)$$

где c_2 – диагональная числовая матрица размера 7×7 ; ε – константа определяющая точность аппроксимации релейной функции $\text{sign}(s)$, принятая равной $\varepsilon = 0.01$.

Следует заметить, что слагаемое u_s алгоритма управления (4), отвечающее за скользящее движение по поверхности переключения, расположено в скобках и при подстановке u в уравнения динамики (2)-(3) остаётся только оно и именно оно позволяет навязать требуемую динамику объекту.

Используя второй метод Ляпунова, нетрудно убедиться, что алгоритм управления (4) обеспечивает системе управления БМП ВК устойчивость.

Компьютерная апробация алгоритма управления БМП ВК

Компьютерное моделирование на Python системы управления БМП ВК с синтезированным алгоритмом проводилось при следующих параметрах модели:

$$m_1 = 0.4 \text{ кг.}; m_2 = 0.4 \text{ кг.}; m_3 = 0.44 \text{ кг.}; m_4 = 0.64 \text{ кг.};$$

$$m_5 = 0.64 \text{ кг.}; m_6 = 0.34 \text{ кг.}; m_7 = 0.3 \text{ кг.};$$

$$d_1 = 0.06 \text{ м.}; a_1 = 0.47 \text{ м.}; a_2 = 0.54 \text{ м.}; a_4 = 0.03 \text{ м.}; g = 9.81 \text{ м/с}^2.$$

Приняты следующие тензоры инерции I_{c_i} всех звеньев протеза:

$$\begin{aligned} I_{c_1} &= \begin{pmatrix} 0.048 & 0 & 0 \\ 0 & 0.048 & 0 \\ 0 & 0 & 1.8 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}; I_{c_2} = \begin{pmatrix} 0.048 & 0 & 0 \\ 0 & 0.048 & 0 \\ 0 & 0 & 1.8 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}; \\ I_{c_3} &= \begin{pmatrix} 0.0529 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0529 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}; I_{c_4} = \begin{pmatrix} 0.077 & 0 & 0 \\ 0 & 0.077 & 0 \\ 0 & 0 & 2.9 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}; \\ I_{c_5} &= \begin{pmatrix} 0.0534 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0534 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}; I_{c_6} = \begin{pmatrix} 0.028 & 0 & 0 \\ 0 & 0.028 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}; \\ I_{c_7} &= \begin{pmatrix} 0.025 & 0 & 0 \\ 0 & 0.025 & 0 \\ 0 & 0 & 9.375 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Матрицы однородного преобразования заданы в виде:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & -s_1 & 0 \\ 0 & s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; A_2 = \begin{pmatrix} c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -s_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ A_3 &= \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & -s_4 & 0 \\ 0 & s_4 & c_4 & 0.47 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

$$A_5 = \begin{pmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0.54 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; A_6 = \begin{pmatrix} c_6 & 0 & s_6 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -s_6 & 0 & c_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$A_7 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_7 & -s_7 & 0 \\ 0 & s_7 & c_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

На рисунке 3 представлены переходная характеристика выходной переменной x_3 и соответствующая функция входного сигнала u_3 .

На рисунке 4 представлены траектории следящего управления движением БМП ВК при изменении переменных x_2 , x_3 , x_6 и стабилизирующего управления остальных переменных, а также управляющее воздействие u_6 .

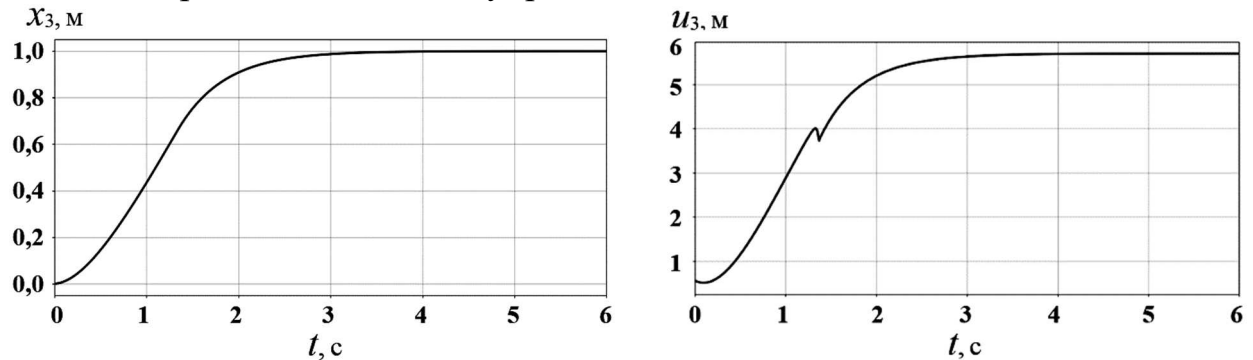


Рис. 3. Изменение 3-й выходной и входной переменных БМП ВК

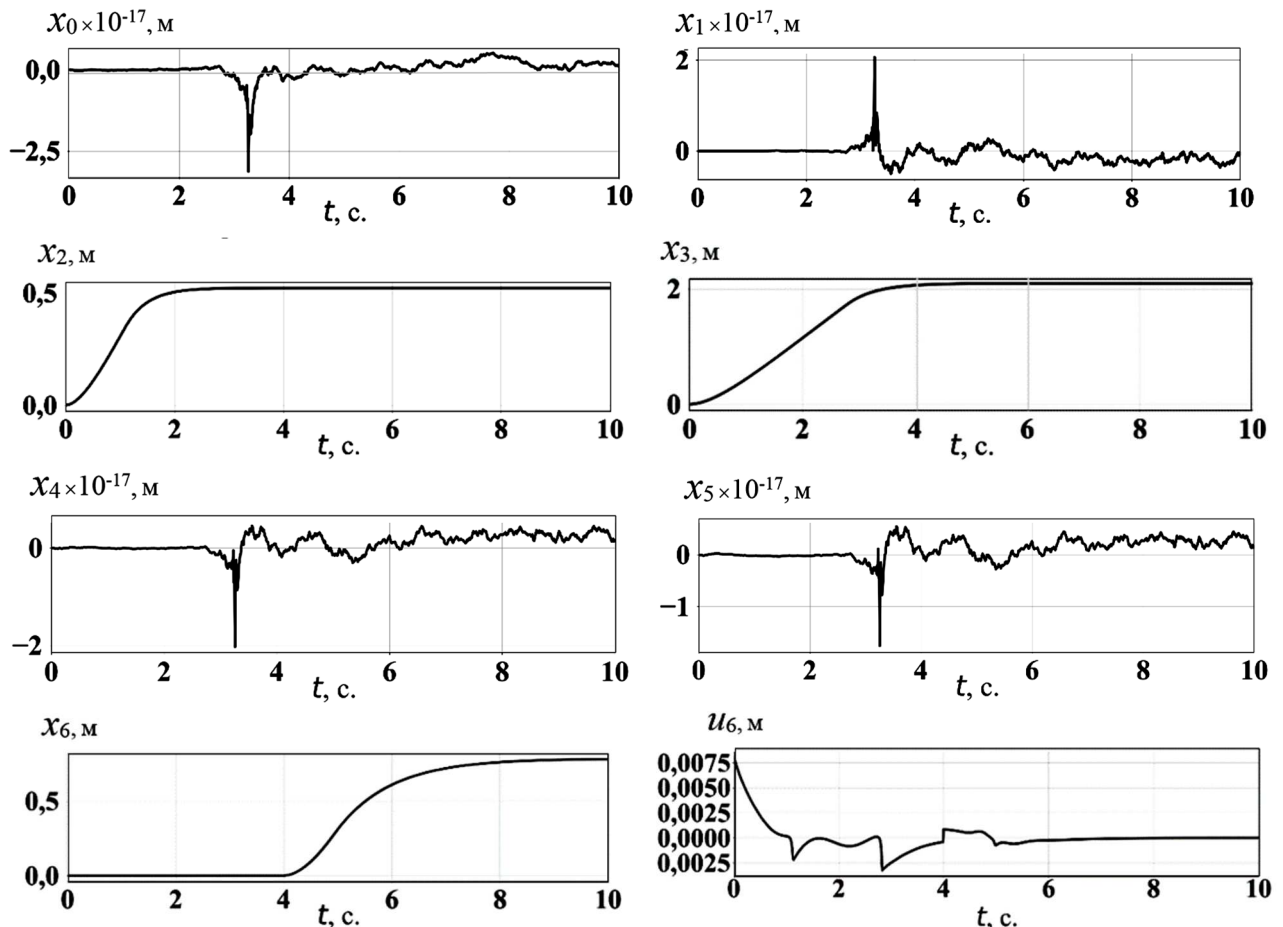


Рис. 4. Траектории следящего и стабилизирующего управления БМП ВК

На рисунке 5 приведены результаты анализа робастных свойств системы управления БМП ВК при изменении переменной x_0 и наличии дополнительной нагрузки на звенья в области запястья.

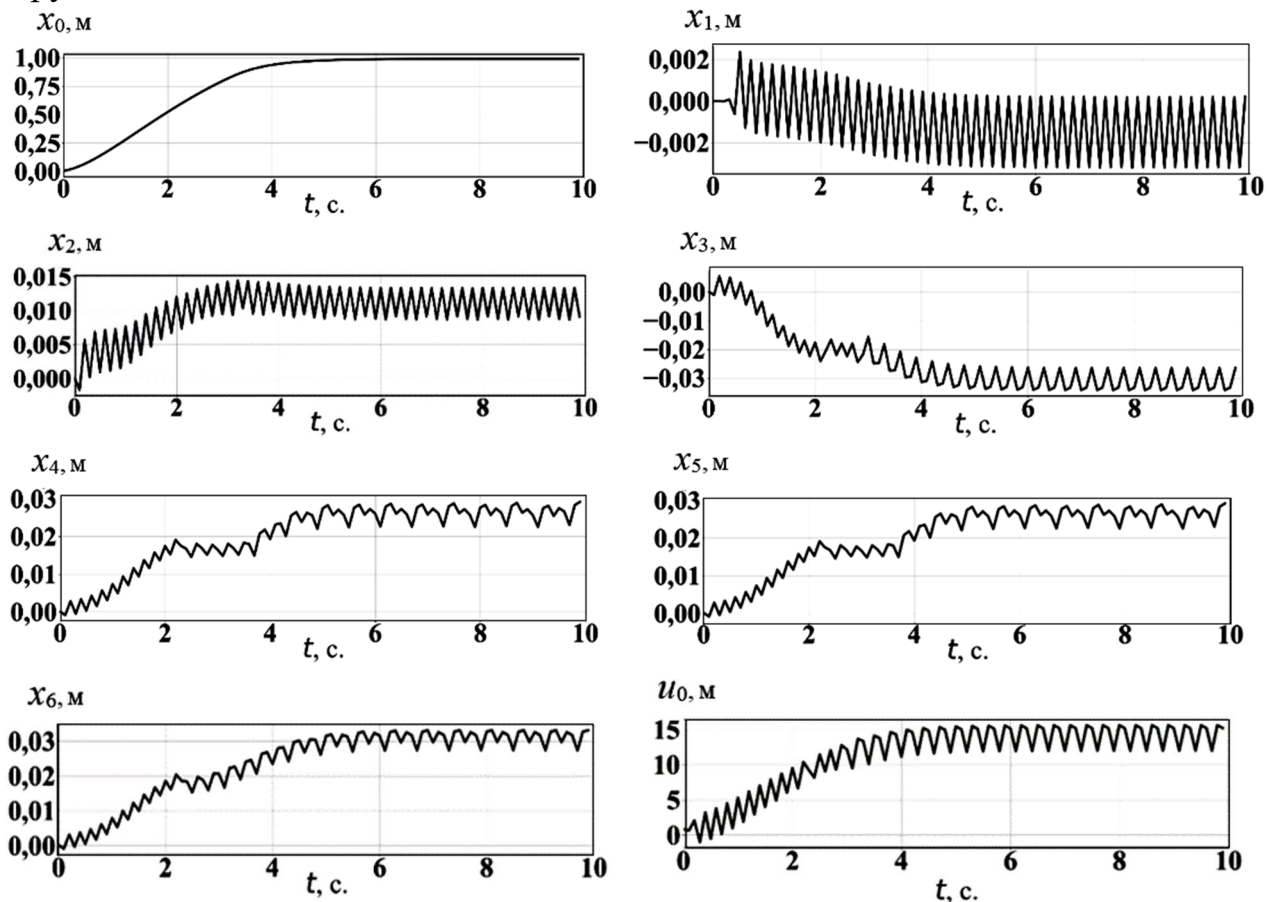


Рис. 5. Результаты анализа робастных свойств системы управления БМП ВК

Заключение

В статье разработан и исследован алгоритм управления БМП ВК с формированием управляющего воздействия на основе данных измерения ЭЭГ и ЭМГ. Приведена математическая модель протеза, как объекта управления, включая модели его кинематики и динамики, на основании которой синтезирован алгоритм управления протезом методом скользящих режимов. Проведен анализ эффективности синтезированного алгоритма управления БМП ВК путём его компьютерной апробации в среде Python как при номинальных параметрах модели протеза, так и при дополнительной нагрузке на его звенья. Результаты анализа демонстрируют высокую эффективность синтезированного алгоритма управления БМП ВК, включая свойство ее параметрической робастности.

Список литературы

1. Горохова Н.М., Головин М.А., Чежин М.С. Методы управления протезами верхних конечностей // Научно-технический вестник ИТМО. – 2019. – Т. 19, №2. – С. 314-325. – DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-314-325.
2. Tasar B, Tanyildizi A.K., Gulten A., Oguz Y. Moving sliding mode control for sEMG based prosthetic hand // Biomedical Research. 2018, vol. 29, iss. 9, pp. 1891-1897. DOI: 10.4066/biomedicalresearch.29-18-461.
3. Brahmi B., Rahman M.H., Maarouf S., Luna C.O. Iterative estimator-based nonlinear backstepping control of a robotic exoskeleton // World Academy of Science, Engineering and Technology,

International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2026, vol. 10, no. 8, pp. 1313-1319.

4. Нимирич Н.С. Математическая модель движения биомехатронного манипуляторного протеза верхних конечностей // JARiTS. – 2025. – №51. – С. 40-48. – DOI: 10.26160/2474-5901-2025-51-40-48.
5. Андриевский Б.Р., Бобцов А.А., Фрадков А.Л. Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления. – СПб.: ИПМаш РАН, 2017. – 327 с.

Сведения об авторах:

Нимирич Николай Сергеевич – студент;

Филимонов Николай Борисович – д.т.н., профессор кафедры «Физико-математические методы управления».