

АДЕКВАТНОСТЬ СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Д. В. Горбунов^{1,2,a}, С. Г. Еловой^{1,2,b}

¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4420-9343>, ✉ gorbunov.dv@mail.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1860-9303>, s.elovoy@yandex.ru

Аннотация: одним из вариантов изучения сложных систем является разработка и исследование симуляционной модели. В основе рассматриваемой модели лежит теория дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Такой подход необходим, так как решить задачу воспроизведения хаотической динамики произвольных и непроизвольных движений методами детерминистской или стохастической науки не удастся ввиду сложности исследуемой подсистемы. Следует обратить внимание и на то, что если речь идет о сложной системе и хаотической динамике, то и проверить адекватность модели стандартными методами тоже весьма затруднительно в классической интерпретации результатов расчета. В работе продемонстрирован подход к проверке адекватности модели для подобных систем на основе стандартных методов с учетом хаотической динамики результатов реальной и моделируемой системы. В результате проведенной проверки адекватности разработанной симуляционной модели можно сделать вывод, что модель адекватна и ее результаты можно использовать для проведения дополнительных исследований, в которых тремор является важным и неотъемлемым компонентом.

Ключевые слова: тремор, теппинг, симуляционная модель, адекватность модели, методы проверки адекватности.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Горбунов Д. В., Еловой С. Г. Адекватность симуляционной модели биомеханической системы человека. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):79–85.

Поступила в редакцию: 08.08.2025.

В окончательном варианте: 18.09.2025.

VALIDITY OF THE SIMULATION MODEL OF THE HUMAN BIOMECHANICAL SYSTEM

D. V. Gorbunov^{1,2,a}, S. G. Elovoy^{1,2,b}

¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4420-9343>, ✉ gorbunov.dv@mail.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1860-9303>, s.elovoy@yandex.ru

Abstract: an effective approach to studying complex systems is the use of simulation models. We developed a model of the human biomechanical system based on differential equations with a discontinuous right-hand side. This approach was required because reproducing the chaotic dynamics of voluntary and involuntary movements cannot be achieved with deterministic or stochastic methods due to the complexity of the subsystem under study.

We also noted that validating such models is difficult when using standard methods in the classical interpretation of calculation results, since chaotic dynamics complicate direct comparisons. Therefore, we demonstrated an approach to validating the model that applies standard methods while accounting for chaotic dynamics in the outputs of both real and simulated systems.

Our validation showed that the proposed simulation model is valid, and its results can be used for further research in which tremor is a significant and integral component.

Keywords: tremor, tapping, simulation model, model validity, validity verification methods.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Gorbunov D. V., Elovoi S. G. Validity of the Simulation Model of the Human Biomechanical System. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):79–85.

Original article submitted: 08.08.2025.

Revision submitted: 18.09.2025.

Введение

Исследования сложных биологических систем на основе систем моделирования являются одним из ключевых направлений для изучения динамики их поведения. Одна из проблем моделирования подобных систем или подсистем — это хаотическая динамика, которая проявляется на разных уровнях [1, 2]. Более того, сложность моделирования значительно возрастает ввиду наличия у сложных биологических систем самоорганизации. Этот процесс самоорганизации нельзя игнорировать, а природа его до конца не изучена. В этой связи остается открытым вопрос, каким образом можно оценить адекватность разработанной модели для сложной хаотической динамической системы с самоорганизацией [3–9].

В работе представлен подход к проверке адекватности симуляционной модели для биомеханической системы человека по воспроизведению динамики произвольных и непроизвольных движений. Предлагаемый подход основан на адаптации методов к реальным данным и модельным данным. Следует отметить, что для проверки адекватности в таком случае необходимо увеличить требования к количеству выборок, как реальных, так и модельных.

Стандартные методы проверки адекватности для моделей сложных биологических систем

На данный момент существует несколько алгоритмов проверки адекватности модели, но они опираются на конкретные меры, что не может быть использовано для моделей сложных биологических систем. Например, один из методов — средняя абсолютная ошибка (MAE). Указанный метод используется как метрика качества прогнозной модели, но среднее абсолютное отклонение между фактическими значениями и предсказанными моделью будет значительным из-за хаотической динамики сложной системы. Более того, если провести регистрацию реальных данных (не меняя начальных условий регистрации данных) и проверить на однородность, то результат будет не однозначный (пример представлен в таблице 1). Таким образом, на основе подобного рода исследований (таблица 1) можно сделать вывод, что данные одной модели не адекватны по отношению к данным этой же системы.

Таблица 1

Результаты проверки на адекватность реальных данных с неизменными начальными условиями методом MAE

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | | .022 | .013 | .026 | .015 | .032 | .029 | .035 | .031 | .042 | .046 | .020 | .039 | .037 | .051 |
| 2 | .022 | | .029 | .044 | .019 | .031 | .030 | .028 | .027 | .032 | .042 | .022 | .032 | .031 | .043 |
| 3 | .013 | .029 | | .028 | .021 | .037 | .028 | .034 | .034 | .044 | .044 | .020 | .038 | .039 | .050 |
| 4 | .026 | .044 | .028 | | .031 | .046 | .053 | .060 | .056 | .066 | .070 | .045 | .064 | .061 | .075 |
| 5 | .015 | .019 | .021 | .031 | | .034 | .033 | .036 | .030 | .040 | .045 | .022 | .040 | .037 | .049 |
| 6 | .032 | .031 | .037 | .046 | .034 | | .046 | .050 | .046 | .056 | .062 | .038 | .053 | .051 | .063 |
| 7 | .029 | .030 | .028 | .053 | .033 | .046 | | .016 | .027 | .031 | .023 | .016 | .024 | .031 | .037 |
| 8 | .035 | .028 | .034 | .060 | .036 | .050 | .016 | | .021 | .025 | .020 | .018 | .017 | .021 | .027 |
| 9 | .031 | .027 | .034 | .056 | .030 | .046 | .027 | .021 | | .018 | .024 | .021 | .022 | .018 | .022 |
| 10 | .042 | .032 | .044 | .066 | .040 | .056 | .031 | .025 | .018 | | .025 | .029 | .024 | .016 | .020 |
| 11 | .046 | .042 | .044 | .070 | .045 | .062 | .023 | .020 | .024 | .025 | | .028 | .026 | .029 | .027 |
| 12 | .020 | .022 | .020 | .045 | .022 | .038 | .016 | .018 | .021 | .029 | .028 | | .023 | .024 | .036 |
| 13 | .039 | .032 | .038 | .064 | .040 | .053 | .024 | .017 | .022 | .024 | .026 | .023 | | .022 | .024 |
| 14 | .037 | .031 | .039 | .061 | .037 | .051 | .031 | .021 | .018 | .016 | .029 | .024 | .022 | | .018 |
| 15 | .051 | .043 | .050 | .075 | .049 | .063 | .037 | .027 | .022 | .020 | .027 | .036 | .024 | .018 | |

Можно выделить еще один метод проверки модели на адекватность — коэффициент детерминации. В данном методе используется статистическая мера, которая может продемонстрировать, насколько хорошо модель объясняет вариацию зависимой переменной. Если провести сравнение данных, как в разобранный примере выше для MAE, то результаты будут схожи. Указанный метод покажет неадекватность данных одной системы (таблица 2).

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента детерминации для проверки на адекватность реальных данных с неизменными начальными условиями

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 1,0 | -3,9 | -2,8 | -1,6 | -0,6 | -1,0 | -1,2 | -3,7 | -0,6 | -5,1 | -3,6 | -1,0 | -4,4 | -0,7 | -0,5 |
| 2 | -0,9 | 1,0 | -1,0 | 0,0 | -0,1 | -2,1 | -0,2 | -0,4 | -0,3 | -2,0 | -1,7 | 0,0 | -1,6 | -1,3 | -0,2 |
| 3 | -1,6 | -2,5 | 1,0 | 0,0 | -0,3 | -2,8 | -2,6 | -0,4 | 0,2 | -0,1 | -0,7 | -0,3 | -2,0 | -1,2 | -1,2 |
| 4 | -2,8 | -2,8 | -1,2 | 1,0 | 0,0 | -6,6 | -2,6 | -1,7 | -0,4 | -5,1 | -4,8 | -0,5 | -6,1 | -4,1 | -1,6 |
| 5 | -3,9 | -7,5 | -4,7 | -1,1 | 1,0 | -8,8 | -3,4 | -5,2 | -1,0 | -13 | -10 | -1,8 | -12 | -6,8 | -1,6 |
| 6 | 0,1 | -2,5 | -1,4 | -1,2 | -0,4 | 1,0 | -0,6 | -2,2 | -0,5 | -2,5 | -1,8 | -0,6 | -1,8 | 0,0 | -0,2 |
| 7 | -0,4 | -1,0 | -2,3 | -0,5 | 0,1 | -1,3 | 1,0 | -1,5 | -0,6 | -5,1 | -3,1 | -0,1 | -3,5 | -1,9 | 0,0 |
| 8 | -2,4 | -1,6 | -0,5 | -0,3 | -0,5 | -4,4 | -2,0 | 1,0 | -0,6 | -2,5 | -0,7 | -0,3 | -2,4 | -3,2 | -1,2 |
| 9 | -3,2 | -7,8 | -2,2 | -1,5 | -0,7 | -8,1 | -5,6 | -4,8 | 1,0 | -7,5 | -7,0 | -1,7 | -9,5 | -3,9 | -2,1 |
| 10 | -0,9 | -1,4 | 0,5 | -0,2 | -0,4 | -1,5 | -2,0 | -0,5 | 0,0 | 1,0 | -0,2 | -0,4 | -0,7 | -0,2 | -0,9 |
| 11 | -0,8 | -1,7 | 0,0 | -0,5 | -0,4 | -1,5 | -1,6 | 0,1 | -0,2 | -0,6 | 1,0 | -0,2 | -0,5 | -0,8 | -0,5 |
| 12 | -3,2 | -4,6 | -2,9 | -1,1 | -0,9 | -6,7 | -2,6 | -2,7 | -1,2 | -8,5 | -5,3 | 1,0 | -8,5 | -4,7 | -1,5 |
| 13 | -1,0 | -1,4 | -0,6 | -0,7 | -0,6 | -1,4 | -1,6 | -0,7 | -0,5 | -1,0 | -0,4 | -0,7 | 1,0 | -0,6 | -0,2 |
| 14 | -1,6 | -8,2 | -4,0 | -4,3 | -3,0 | -2,6 | -6,2 | -7,9 | -1,9 | -5,3 | -6,3 | -3,2 | -5,7 | 1,0 | -2,3 |
| 15 | -1,4 | -4,0 | -4,2 | -1,8 | -0,4 | -3,4 | -1,5 | -3,8 | -0,9 | -8,8 | -5,4 | -0,9 | -4,2 | -2,5 | 1,0 |

Симуляционная модель биомеханической системы человека

Прежде чем приступить к проверке на адекватность, необходимо сразу представить модель, которую необходимо оценить. Симуляционная модель разработана с использованием математического обеспечения, представленного ранее в статье [10]. В основе математического обеспечения лежит теория дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, что, с одной стороны, существенно осложняет процесс моделирования и оценку адекватности, а с другой стороны, в полной мере может воспроизвести хаотическую динамику системы с механизмом самоорганизации. Система дифференциальных уравнений с разрывной правой частью для описания динамики движений человека имеет вид [10]:

$$\begin{aligned}
 dx/dt = & f(t, x, u_1^{br}(t, x), u_2^{br}(t, x), u_1^{ibr}(t, x, Q^+(t, x)), u_2^{ibr}(t, x, Q^-(t, x)), \\
 & u_{tr}(t, x, Q(t, x)), u_{1,o}^+(x, t, m_{1,o}^+(t, x), t_{se}^+(x, t)), u_{2,w}^+(x, t, m_{2,w}^+(t, x), t_{ak}^+(x, t)), \\
 & u_{3,s}^+(x, t, m_{3,s}^+(t, x), t_{lj}^+(x, t)), u_{1,o}^-(x, t, m_{1,o}^-(t, x), t_{se}^-(x, t)), \\
 & u_{2,w}^-(x, t, m_{2,w}^-(t, x), t_{ak}^-(x, t)), u_{3,s}^-(x, t, m_{3,s}^-(t, x), t_{lj}^-(x, t)), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где o, w, s — количество мышечных волокон определенного типа, $u_1^{br}(t, x), u_2^{br}(t, x)$ осуществляют установку верхней и нижней границы, являются непрерывными и пробегают множества $U_1^{br}(t, x), U_2^{br}(t, x)$. Особое внимание необходимо обратить на функции $u_1^{ibr}(t, x, Q^+(t, x)), u_2^{ibr}(t, x, Q^-(t, x))$, отвечающие за формирование коридора, в котором генерируется линия разрыва (траектория движения), при ее пересечении происходит переключение работы мышечных пучков. Эти функции являются разрывными и пробегают соответствующие множества $U_1^{ibr}(t, x, Q^B), U_2^{ibr}(t, x, Q^H)$, здесь решением Q^B считаются значения из множества $Q_{i-1}^+(t, x)$, а решение Q^H формируем на основе множества $Q_{i-1}^-(t, x)$.

Решением системы дифференциальных уравнений (1) называется дифференциальное

включение:

$$F_1(t, x) = f \left(t, x, U_1^{br}, U_2^{br}, U_1^{ibr}, U_2^{ibr}, U_{tr}(t, x, QQq), U_{1,o}^+ \left(t, x, M_{1,o}^+, T_{se}^+ \right), \right. \\ \left. U_{2,\omega}^+ \left(t, x, M_{2,\omega}^+, T_{ak}^+ \right), U_{3,s}^+ \left(t, x, M_{3,s}^+, T_{lj}^+ \right), U_{1,o}^- \left(t, x, M_{1,o}^-, T_{se}^- \right), \right. \\ \left. U_{2,\omega}^- \left(t, x, M_{2,\omega}^-, T_{ak}^- \right), U_{3,s}^- \left(t, x, M_{3,s}^-, T_{lj}^- \right) \right). \quad (2)$$

В соответствии с математическим обеспечением в работе задействованы мышечные волокна мышечного пучка (POS или NEG), который нужен для самоорганизации системы по удержанию траектории движения. Уровень удержания должен задаваться хаотически (рис.).

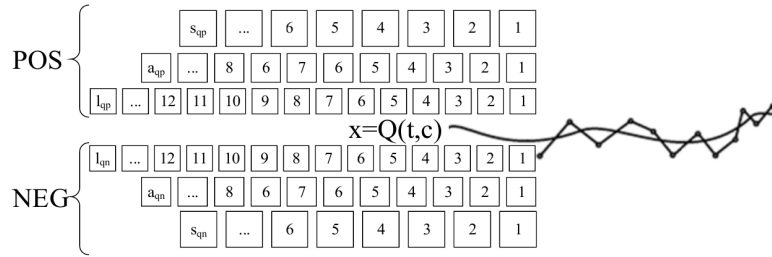


Рис. Схематическое изображение симуляционной модели в интерпретации машинного алгоритма

В соответствии с биологической составляющей функционирования мышечных пучков работа мышц представлена в численной форме:

$$S_i = \begin{cases} S_{i-1} + \sum_{e=1}^{s_{qp}} \sum_{k=1}^{a_{qp}} \sum_{j=1}^{l_{qp}} f_1(m_{pe}^+, t_{se}^+) f_2(m_{pk}^+, t_{ak}^+) f_3(m_{pj}^+, t_{lj}^+), \\ S_i \leq g_z(t), \quad m_{pe}^+ - 1, m_{pk}^+ - 1, \quad m_{pj}^+ - 1, \quad z \in N, \quad z < h, \quad h \in N; \\ S_{i-1} + \sum_{e=1}^{s_{qn}} \sum_{k=1}^{a_{qn}} \sum_{j=1}^{l_{qn}} f_4(m_{ne}^+, t_{se}^-) f_5(m_{nk}^+, t_{ak}^-) f_6(m_{nj}^+, t_{lj}^-), \\ S_i > g_z(t), \quad m_{ne}^+ - 1, \quad m_{nk}^+ - 1, \quad m_{nj}^+ - 1, \quad z \in N, \quad z < h, \quad h \in N, \end{cases} \quad (3)$$

где S_i — моделируемый сигнал; s_{qp} , a_{qp} , l_{qp} , s_{qn} , a_{qn} , l_{qn} — количество мышечных волокон определенной группы мышц, которые могут быть включены в работу модели; f_i , $i = 1 \dots 6$ — функция включения определенной группы мышц и генерации потенциала усилия; m_{pe}^+ , m_{pk}^+ , m_{pj}^+ , m_{ne}^+ , m_{nk}^+ , m_{nj}^+ — значения счетчика, отслеживающего утомление определенного мышечного волокна из определенной группы мышц; $t_{se}^+ \in [x_{se}; y_{se}]$, $t_{ak}^+ \in [x_{ak}; y_{ak}]$, $t_{lj}^+ \in [x_{lj}; y_{lj}]$ — случайное значение потенциала мышечного волокна из определенного диапазона; $t_{se}^- \in [x_{se}; y_{se}]$, $t_{ak}^- \in [x_{ak}; y_{ak}]$, $t_{lj}^- \in [x_{lj}; y_{lj}]$ — случайное «отрицательное» значение потенциала мышечного волокна из определенного диапазона; $g_z(t)$ — генерация уровня удержания определенной позиции на i -ой итерации; h — значения счетчика удержания позиции $g_z(t)$. Счет удержаний h жизненно необходим для адекватной работы модели, т.к. хаотический принцип организации функциональных систем не позволяет на длительном интервале времени Δt удерживать изолинию, т. е. уровень удержания позиции $g_z(t) \neq const$ на определенном Δt .

Уровень удержания позиции $g_z(t)$ устанавливается по формуле:

$$g_z(t) = Q(t, c), \quad S_i < g_z(t), \quad z = 0, \quad h \in N, \quad z + 1, \quad z < h, \quad (4)$$

где $Q(t)$ — случайное значение из определенного диапазона. Функция $Q(t)$ производит генерацию нового уровня при $z=h$, или при условии $g_z(t) < S_i$ при включенных в работу «отрицательных» мышцах, или при условии $g_z(t) > S_i$ при работе «положительных» мышц.

Диапазон генерации траектории варьируется на каждой итерации для $g_z(t)$. Смещение диапазона генерации уровня удержания устанавливается по формуле:

$$Q(c) = \begin{cases} A \in [-x + \Delta t; y + \Delta t], & A(t) \geq \frac{g_{z-1}(t)}{2}, & \Delta t = g_{z-1}(t), & y < y_0 = \text{const} \\ A \in [-x - \Delta t; y - \Delta t], & A(t) < \frac{g_{z-1}(t)}{2}, & \Delta t = g_{z-1}(t), & x > -x_0 = \text{const} \end{cases}, \quad (5)$$

где A – значение уровня удержания позиции, x и y – нижняя и верхняя границы генерации траектории, Δt – приращение к границам траектории.

Проверка адекватности результатов вычислительного эксперимента

Аналогичные расчеты проводились и для модельных данных. Результаты метода МАЕ представлены в таблице 3, а расчет коэффициента детерминации – в таблице 4. Как видно из этих таблиц, результаты коррелируют с данными, полученными на основе реальных экспериментов, несмотря на то, что значения существенно отличаются от теоретических по этим методам.

Таблица 3

Результаты проверки на адекватность модельных данных с неизменными начальными условиями методом МАЕ

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | .000 | .029 | .045 | .044 | .044 | .035 | .039 | .045 | .034 | .042 | .046 | .045 | .037 | .048 | .033 |
| 2 | .029 | .000 | .057 | .053 | .057 | .042 | .042 | .052 | .034 | .049 | .046 | .061 | .052 | .051 | .046 |
| 3 | .045 | .057 | .000 | .035 | .048 | .045 | .058 | .028 | .040 | .043 | .054 | .025 | .038 | .047 | .054 |
| 4 | .044 | .053 | .035 | .000 | .041 | .033 | .049 | .036 | .036 | .039 | .039 | .031 | .031 | .034 | .052 |
| 5 | .044 | .057 | .048 | .041 | .000 | .036 | .027 | .035 | .050 | .044 | .037 | .037 | .035 | .036 | .025 |
| 6 | .035 | .042 | .045 | .033 | .036 | .000 | .040 | .044 | .038 | .042 | .042 | .032 | .036 | .041 | .043 |
| 7 | .039 | .042 | .058 | .049 | .027 | .040 | .000 | .047 | .047 | .046 | .028 | .047 | .039 | .032 | .027 |
| 8 | .045 | .052 | .028 | .036 | .035 | .044 | .047 | .000 | .042 | .045 | .051 | .031 | .035 | .044 | .044 |
| 9 | .034 | .034 | .040 | .036 | .050 | .038 | .047 | .042 | .000 | .050 | .047 | .043 | .035 | .048 | .046 |
| 10 | .042 | .049 | .043 | .039 | .044 | .042 | .046 | .045 | .050 | .000 | .045 | .045 | .042 | .038 | .044 |
| 11 | .046 | .046 | .054 | .039 | .037 | .042 | .028 | .051 | .047 | .045 | .000 | .047 | .035 | .027 | .042 |
| 12 | .045 | .061 | .025 | .031 | .037 | .032 | .047 | .031 | .043 | .045 | .047 | .000 | .031 | .039 | .045 |
| 13 | .037 | .052 | .038 | .031 | .035 | .036 | .039 | .035 | .035 | .042 | .035 | .031 | .000 | .039 | .040 |
| 14 | .048 | .051 | .047 | .034 | .036 | .041 | .032 | .044 | .048 | .038 | .027 | .039 | .039 | .000 | .041 |
| 15 | .033 | .046 | .054 | .052 | .025 | .043 | .027 | .044 | .046 | .044 | .042 | .045 | .040 | .041 | .000 |

Таблица 4

Результаты расчета коэффициента детерминации для проверки на адекватность реальных данных с неизменными начальными условиями

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 1,0 | -2,5 | -0,2 | -1,1 | -1,4 | -0,4 | -2,1 | -2,5 | -3,4 | -0,9 | -1,1 | -1,0 | -1,7 | -3,4 | -1,3 |
| 2 | -4,7 | 1,0 | -6,2 | -5,1 | -1,0 | -3,5 | -2,9 | -1,1 | -1,3 | -3,4 | -6,0 | -4,4 | -0,9 | -1,7 | -6,9 |
| 3 | -0,8 | -5,3 | 1,0 | -2,1 | -3,8 | -0,4 | -3,0 | -5,0 | -5,7 | -2,3 | -3,0 | -1,1 | -4,5 | -6,3 | -1,5 |
| 4 | -1,7 | -3,8 | -1,8 | 1,0 | -3,5 | -1,7 | -1,2 | -3,0 | -5,1 | -3,6 | -3,3 | -3,0 | -4,4 | -3,9 | 0,3 |
| 5 | -1,9 | -0,6 | -3,2 | -3,5 | 1,0 | -1,9 | -2,7 | -1,6 | -2,5 | -2,4 | -2,5 | -2,9 | -1,4 | -1,5 | -4,3 |
| 6 | -0,8 | -2,5 | -0,3 | -1,7 | -1,9 | 1,0 | -1,2 | -2,1 | -3,0 | -1,3 | -3,7 | -0,4 | -2,8 | -4,3 | -1,7 |
| 7 | -1,5 | -0,9 | -1,3 | -0,4 | -1,4 | -0,4 | 1,0 | 0,1 | -1,0 | -1,3 | -3,0 | -0,7 | -1,9 | -1,1 | -1,1 |
| 8 | -2,4 | -0,2 | -3,1 | -2,1 | -1,0 | -1,3 | 0,0 | 1,0 | -0,6 | -1,9 | -3,9 | -1,9 | -1,4 | -0,8 | -3,4 |
| 9 | -1,9 | 0,1 | -2,0 | -2,1 | -0,8 | -1,0 | -0,5 | -0,1 | 1,0 | -0,3 | -2,3 | -1,3 | -1,0 | -0,5 | -2,6 |
| 10 | -0,3 | -0,8 | -0,5 | -1,4 | -0,8 | -0,2 | -0,9 | -1,0 | -0,3 | 1,0 | -0,7 | -0,4 | -1,0 | -1,1 | -1,5 |
| 11 | 0,0 | -1,1 | -0,4 | -0,7 | -0,4 | -0,9 | -1,5 | -1,6 | -1,6 | -0,3 | 1,0 | -1,5 | -1,1 | -0,7 | -0,7 |
| 12 | -0,5 | -1,5 | -0,1 | -1,3 | -1,3 | 0,2 | -0,6 | -1,2 | -1,7 | -0,5 | -2,7 | 1,0 | -1,2 | -2,6 | -1,4 |
| 13 | -1,5 | -0,1 | -2,6 | -2,9 | -0,8 | -1,8 | -2,3 | -1,3 | -1,9 | -1,8 | -2,8 | -1,8 | 1,0 | -1,5 | -4,0 |
| 14 | -5,5 | -1,5 | -6,7 | -4,8 | -2,0 | -5,2 | -2,8 | -1,7 | -2,6 | -3,7 | -4,0 | -6,3 | -2,9 | 1,0 | -6,8 |
| 15 | -2,4 | -6,3 | -1,6 | 0,1 | -5,3 | -2,1 | -2,9 | -5,8 | -7,3 | -4,6 | -4,2 | -3,8 | -7,0 | -6,8 | 1,0 |

Для удобства восприятия в таблице 5 представлены результаты расчета статистических показателей для таблиц 1-4. Из этой таблицы можно сделать вывод, что реальные данные сопоставимы с модельными, например, по среднему значению: $\langle MAE_p \rangle = 0,034$, а $\langle MAE_m \rangle = 0,41$; $\langle R_p^2 \rangle \approx \langle R_m^2 \rangle \approx -2,29$. Причем разброс по интервалу (min;max) по MAE и R^2 незначителен. Следует отметить, что подобные расчеты справедливы только для большого набора данных, по разовой выборке сделать выводы нельзя.

Таблица 5

Статистические показатели для двух методов проверки адекватности реальных данных с неизменными начальными условиями

| | Реальные данные | | Модельные данные | |
|----------------|-----------------|----------|------------------|----------|
| | MAE_p | R_p^2 | MAE_m | R_m^2 |
| среднее | 0,034 | -2,29265 | 0,041 | -2,29123 |
| мин | 0,013 | -13,197 | 0,024 | -6,90289 |
| макс | 0,075 | 0,175279 | 0,061 | 0,250222 |
| макс-мин | 0,062 | 13,37231 | 0,036 | 7,153108 |
| станд. отклон. | 0,014 | 2,697277 | 0,007 | 1,599994 |
| дисперсия | 0,00019 | 7,275305 | 0,000059 | 2,55998 |
| медиана | 0,031 | -1,47724 | 0,042 | -1,88383 |

Для подтверждения корреляции реальных и модельных данных представлена таблица 6, в которой отражены результаты расчетов MAE для проверки согласованности реальных и модельных данных. Очевидно, что средние показатели коррелируют с данными, представленными в табл. 1 и табл. 3. Здесь среднее значение $\langle MAE_{pm} \rangle = 0,036$, а вариационный размах составляет $R=0,042$.

Таблица 6

Результаты проверки на адекватность реальных (1–15) и модельных данных (16–30) с неизменными начальными условиями методом MAE

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 1 | .025 | .035 | .032 | .033 | .032 | .031 | .034 | .042 | .040 | .026 | .030 | .037 | .036 | .036 | .038 |
| 2 | .026 | .034 | .026 | .034 | .031 | .020 | .028 | .033 | .040 | .030 | .042 | .022 | .036 | .045 | .033 |
| 3 | .022 | .042 | .022 | .027 | .036 | .021 | .036 | .046 | .046 | .032 | .035 | .030 | .043 | .049 | .025 |
| 4 | .031 | .045 | .029 | .022 | .038 | .035 | .037 | .046 | .051 | .043 | .037 | .040 | .047 | .049 | .023 |
| 5 | .029 | .038 | .032 | .026 | .032 | .037 | .034 | .041 | .043 | .041 | .032 | .043 | .038 | .034 | .032 |
| 6 | .026 | .046 | .028 | .022 | .038 | .033 | .039 | .047 | .050 | .041 | .033 | .041 | .046 | .048 | .024 |
| 7 | .026 | .042 | .025 | .037 | .039 | .014 | .029 | .037 | .046 | .031 | .046 | .022 | .040 | .054 | .036 |
| 8 | .031 | .052 | .027 | .024 | .043 | .032 | .041 | .051 | .053 | .045 | .035 | .045 | .056 | .055 | .019 |
| 9 | .024 | .046 | .023 | .024 | .039 | .025 | .037 | .046 | .052 | .038 | .037 | .031 | .044 | .055 | .024 |
| 10 | .027 | .038 | .027 | .024 | .033 | .029 | .034 | .042 | .044 | .035 | .034 | .035 | .039 | .043 | .027 |
| 11 | .033 | .047 | .030 | .030 | .042 | .028 | .036 | .047 | .050 | .031 | .042 | .029 | .047 | .054 | .028 |
| 12 | .027 | .049 | .021 | .033 | .039 | .029 | .045 | .053 | .056 | .038 | .036 | .032 | .045 | .054 | .031 |
| 13 | .027 | .045 | .024 | .022 | .039 | .031 | .035 | .047 | .050 | .034 | .033 | .036 | .046 | .050 | .024 |
| 14 | .030 | .046 | .026 | .022 | .040 | .029 | .032 | .043 | .051 | .042 | .039 | .032 | .045 | .051 | .025 |
| 15 | .025 | .030 | .031 | .042 | .026 | .021 | .038 | .035 | .039 | .027 | .040 | .026 | .029 | .040 | .041 |

Заключение

На основе проведенного исследования возможной применимости методов MAE и расчета коэффициента детерминации R^2 в качестве мер оценки адекватности модели биомеханической системы человека с хаотической динамикой и механизмом самоорганизации можно сделать вывод, что адекватность подтверждена. Следует отметить, что применимость ограничена количеством выборок, полученных от реальной системы и в результате проведения вычислительного эксперимента. Для разовых выборок такой подход не сможет продемонстрировать достоверные результаты, на основе которых можно было бы сделать вывод об адекватности модели. Необходимо обратить внимание и на то, что

подобный подход может быть использован и для других подсистем сложной биологической системы, т.к. большинство из них обладает хаотической динамикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коннов П. Е., Еськов В. М., Кухарева А. Ю., Самойленко И. С. Существуют ли математические различия между произвольными и непроизвольными движениями? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2024;(3):57–68. DOI: 10.12737/2306-174X-2024-3-54-63.
2. Зинченко Ю. П., Еськов В. М., Филатов М. А., Григорьева С. В. Стохастика и хаос в организации движений. *Вестник новых медицинских технологий*. 2019;26(2):101–106. DOI: 10.24411/1609-2163-2019-16376.
3. Thelen D. G. Adjustment of Muscle Mechanics Model Parameters to Simulate Dynamic Contractions in Older Adults. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2003;125(1):70–7. DOI: 10.1115/1.1531112.
4. *Biomechanics of the Musculo-skeletal System* / Ed. B. M. Nigg, W. Herzog. 3rd ed. Chichester: Wiley; 2007. 688 p.
5. Dariush B. Human Motion Analysis for Biomechanics and Biomedicine. *Machine Vision and Applications*. 2003;14:202-205. DOI: 10.1007/s00138-002-0108-8.
6. Nasr A., Hashemi A., Mcphee J. Scalable Musculoskeletal Model for Dynamic Simulations of Upper Body Movement. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2023;27(3):306-337. DOI: 10.1080/10255842.2023.2184747.
7. Sylvester A. D., Lautzenheiser S. G., Kramer P. A. A Review of Musculoskeletal Modelling of Human Locomotion. *Interface Focus*. 2021;11(5):20200060. DOI: 10.1098/rsfs.2020.0060.
8. Liu L., Cooper J. L., Ballard D. H. Computational Modeling: Human Dynamic Model. *Frontiers in Neurorobotics*. 2021;15:723428. DOI: 10.3389/fnbot.2021.723428.
9. Correia Ramos C. Kinematics in Biology: Symbolic Dynamics Approach. *Mathematics*. 2020;8(3):339. DOI: 10.3390/math8030339.
10. Горбунов Д. В., Гавриленко Т. В. Математическое моделирование динамических процессов организма человека на основе дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):15–20. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-02.