

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>

Математическое моделирование ходьбы человека в реабилитационном экзоскелете с помощью метода видеоанализа походки

А. С. Печурин¹, А. В. Федоров¹, А. С. Яцун¹, С. Ф. Яцун¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Одним из путей повышения эффективности систем реабилитации пациентов с нарушениями опорно – двигательного аппарата является применение экзоскелетов, позволяющих обеспечить заданное врачом –реабилитологом движение нижних конечностей по законам, близким к естественной походке. Для получения соответствующих закономерностей в статье рассматривается метод, основанный на построении траекторий движения голеностопного сустава (ГСС) с последующим синхронным определением углов поворота звеньев нижних конечностей на основе численного решения задачи обратной кинематики. Известно, что использование упрощенных законов движения ГСС и стоп без учета антропометрических параметров пациента приводит к формированию неправильной походки и, как следствие, значительному увеличению времени реабилитации пациента. Поэтому, при построении математической модели паттернов движения голеностопного сустава предлагается применять метод видеозахвата выбранных на ГСС и стопе точек-маркеров, с последующей обработкой и аппроксимацией получаемых сигналов с помощью полиномов, что обеспечивает высокую точность воспроизведения паттернов движения. Целью исследования является построение законов движения звеньев экзоскелета по траектории движения ГСС на основе численного решения задачи обратной кинематики.

Методы. Для достижения поставленной цели применяются экспериментальные исследования ходьбы с построением траектории движения ГСС по видеофрагменту, сглаживание и аппроксимация этой траектории и решение задачи обратной кинематики.

Результаты. Предложен метод построения и обработки траектории движения стопы и нахождения кинематических характеристик движения звеньев для создания паттернов движения экзоскелета при походке.

Заключение. Результаты моделирования показали, что предложенные методы построения траектории движения и моделирования походки экзоскелета позволяют с высокой точностью повторить походку человека при проведении реабилитационных процедур.

Ключевые слова: походка человека; математическое моделирование походки человека; решение обратной задачи кинематики скорости; экзоскелет; видеоанализ траектории; CAD-модель.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-08-044А.

© Печурин А. С., Федоров А. В., Яцун А. С., Яцун С. Ф., 2021

Для цитирования: Математическое моделирование ходьбы человека в реабилитационном экзоскелете с помощью метода видеоанализа походки / А. С. Печурин, А. В. Федоров, А. С. Яцун, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 27-40. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>.

Поступила в редакцию 14.05.2021

Подписана в печать 10.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Mathematical Modeling of Human Gait in a Rehabilitation Exoskeleton Using Gait Video Analysis Method

Alexander S. Pechurin ¹, Alexander V. Fedorov ¹, Andrei S. Jatsun ¹,
Sergey F. Jatsun ¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research One of the ways to increase effectiveness of rehabilitation systems for patients with musculoskeletal disorders is the use of exoskeletons, which make it possible to ensure lower limbs movement according to the laws close to natural gait set by the rehabilitation therapist. The article considers a method based on construction of ankle joint motion trajectories (AJ) followed by synchronous determination of rotation angles of lower limb links based on numerical solution of inverse kinematics problem. It is known that the use of simplified laws of ankle joint movement and feet without taking into account anthropometric parameters of a patient leads to the formation of an incorrect gait and, as a result, a significant increase in rehabilitation time of a patient. Therefore, when constructing mathematical model of ankle motion patterns, it is proposed to use the method of video capture of marker points selected on AJ and foot, followed by processing and approximation of received signals using polynomials, which provides high accuracy of reproducing motion patterns. Purpose of research is to build motion laws of exoskeleton links along the trajectory of AJ motion based on a numerical solution of inverse kinematics problem.

Methods. Experimental walking studies with the construction of AJ motion trajectory based on video fragment, smoothing and approximation of this trajectory and solving reverse kinematics problem are used to achieve this goal.

Results. Method for construction and processing of foot motion trajectory and finding kinematic characteristics of links motion for creation of exoskeleton motion patterns in gait is introduced.

Conclusion. Simulation results shows that proposed methods of constructing motion trajectory and gait modeling of the exoskeleton make it possible to copy the gait of a person with high accuracy in rehabilitation process.

Keywords: human gait; mathematical modeling of human gait; solution of reverse problem of speed kinematics; exoskeleton; trajectory video analysis; CAD model.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out with the support of the RFFI grant No. 19-08-044A.

For citation: Pechurin A. S., Fedorov A. V., Jatsun A. S., Jatsun S. F. Mathematical Modeling of Human Gait in a Rehabilitation Exoskeleton Using Gait Video Analysis Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 27-40 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>.

Received 14.05.2021

Accepted 10.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

В стране сегодня насчитываются десятки тысяч больных с повреждением опорно-двигательного аппарата (ОДА). Чаще всего травмы ОДА получают мужчины молодого трудоспособного возраста, причем соотношение пациентов в возрасте от 20 до 40 лет и от 41 до 65 лет составляет 45 и 49% соответственно. Большинство пациентов получают травмы в дорожно-транспортных происшествиях. Поэтому, обычно пациентам требуется несколько оперативных вмешательств с последующей длительной реабилитацией, что позволяет через 3-5 месяцев после получения травмы возвращаться к активной жизни. В то же время, тяжелые травмы опорно-двигательного аппарата, в ряде случаев, приводят к инвалидизации пациентов [1]. Одним из способов реабилитации таких больных является применение индивидуальных экзоскелетов, позволяющих осуществлять сложные виды движения, такие как вертикализация пациента, приседания, ходьба и другие. Попытки разработки и создания экзоскелетов предпринимались давно, последнее время стали появляться изделия, обеспечивающие движение пациента в режимах ходьбы [2,3]. Использование подобных аппаратов способствует значительному сокращению времени восстановления пациента после травм, повышая эффективность реабилитации. При разработке и создании экзоскелетов используются

современные методы компьютерного моделирования, позволяющие исследовать характеристики движения нижних конечностей пациента и экзоскелета. Одной из основных задач остается разработка паттернов движения и оптимизация параметров системы управления экзоскелетом, что позволяет проектировать персонифицированные системы реабилитации для восстановления пациентов.

Из многообразия аппаратов для восстановления ОДА наиболее подходящим является экзоскелет нижних конечностей – двуногий робот, позволяющий проводить различные реабилитационные упражнения, обеспечивающие восстановление нижних конечностей пациента [4]. Для обеспечения работы экзоскелета в режиме походки, заданной врачом-реабилитологом, необходимо точно задавать траекторию движения ГСС и стоп с учетом антропометрических параметров человека. Эти данные позволяют рассчитать оптимальные управляющие воздействия и паттерны движения экзоскелета для людей с различными степенями поражения ОДА.

Материалы и методы

Описание экзоскелета

Аппарат для реабилитации людей с нарушением ОДА представляет собой управляемый экзоскелет нижних конечностей [4], способный повторить, заданный врачом-реабилитологом, закон движения нижних конечностей (рис.1). Схематически экзоскелет представляет

собой 9-звенный механизм, элементы которого связаны между собой шарнирами, каждый из которых, оснащен управляемым электроприводом. Шарниры обозначены буквами A_i ($i=0, \dots, 7$). Причем, шарниры A_1 и A_6 являются двухкоординатными и обозначены A_{1x} ; A_{1y} ; A_{6x} ; A_{6y} .

Положение звеньев экзоскелета в любой момент времени, задается вектором обобщенных координат $\bar{q}(t) = (q_{00}, \dots, q_{80})^T$, $\bar{q} \in R^n$, где n – число обобщенных координат, которые определяют абсолютные углы поворота звеньев; q_{00} – определя-

ет поворот передней части правой стопы (пальцы) относительно опорной поверхности; q_{10} – поворот задней части стопы относительно опорной поверхности; q_{20} – поворот правой голени; q_{80} – поворот передней части левой стопы (пальцы) относительно опорной поверхности и так далее. На вектор $\bar{q}(t)$ наложены ограничения, определяемые физиологическими особенностями человека. $\bar{q}^- \leq \bar{q} \leq \bar{q}^+$, где $\bar{q}^-$, $\bar{q}^+$ – предельные значения обобщенных координат.

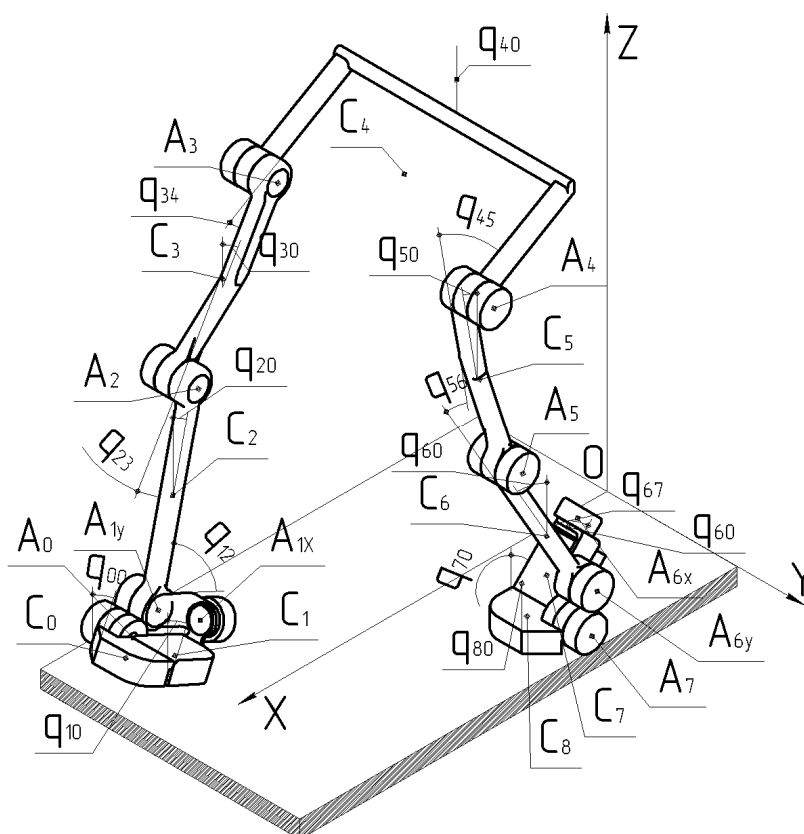


Рис. 1. Схема экзоскелета нижних конечностей. A_i ($i=0, \dots, 7$) – шарниры с управляемыми приводами, C_j ($j=0, \dots, 8$) – центры масс звеньев, $q_{00}, \dots, q_{80}$ – обобщённые координаты, описывающие взаимное расположение звеньев экзоскелета, которое зависит от траектории движения ГСС

Fig. 1. Diagram of the lower limbs exoskeleton. A_i ($i=0, \dots, 7$) - joints with controlled drives, C_j ($j=0, \dots, 8$) - centers of mass of the links, $q_{00}, \dots, q_{80}$ - generalized coordinates describing the relative position of the links of the exoskeleton, which depends on the trajectory of the AJ

Построение траектории движения центра масс

Синтез задающих законов $\bar{q}(t)$ [5-9] осуществляется путем решения обратной задачи кинематики. Для этого необходимо определить следующие параметры ходьбы: L – длина шага, T – время выполнения шага, $2y_m$ – расстояние между стопами во фронтальной плоскости. Задаем желаемые законы движения центра масс (ЦМ), определяемые радиус вектором:

$$\bar{r}_c(t) = (x_c, y_c, z_c)^T. \quad (1)$$

Для обеспечения устойчивого вертикального положения проекции ЦМ на горизонтальную плоскость, должны лежать в опорном полигоне. Также задаем траектории движения стоп $\bar{r}_{A_i}(t)$, $i = 1$ – для правой стопы, $i = 6$ – для левой. Стопы двигаются синхронно с центром масс, обеспечивая его положение в опорном полигоне. Точки A_i (ГСС) ($i=1$ или 6), принадлежащие стопам, совершают движение по некоторым пространственным траекториям.

На рис. 2 показан пример кусочно-линейной траектории. Движение начинается из двухопорной фазы и при этом происходит перенос центра масс на левую стопу во фронтальной плоскости, а далее происходит перенос центра масс в сагиттальной плоскости вдоль стопы. При этом правая стопа переходит на расстояние $L/2$ вдоль оси Ox . В следующий момент времени происходит перенос центра масс во фронтальной

плоскости с левой стопы на правую. Далее движения повторяются.

В начальный момент времени центр масс экзоскелета (ЦМЭ) находится в точке "О", совпадающей с началом координат системы ОХУ. Движение ЦМЭ начинается из точки "О" вдоль оси ОУ (во фронтальной плоскости). При выполнении условия $y_c = y_m$, ЦМЭ начинает перемещаться вдоль оси ОХ (в сагиттальной плоскости). При этом правая стопа также перемещается вдоль оси ОХ. При выполнении условия $x_c = L/4$, начинается перенос ЦМЭ вдоль оси ОУ на правую стопу. Достигнув условия $y_c = -y_m$, ЦМЭ разворачивается и движется вдоль оси Ох, одновременно левая стопа также перемещается вдоль оси Ох до выполнения условия $x_c = 3L/4$. На диаграмме хорошо видно, что центр масс проходит расстояние вдоль оси Ох в два раза меньше, чем точка А, принадлежащая стопе. Далее, происходит периодическое движение центра масс и стоп, обеспечивающее перемещение центра масс вдоль оси Ох. Таким образом, шаг осуществляется за три этапа.

Преимуществом такой траектории является то, что движение звеньев экзоскелета происходит последовательно в сагиттальной и фронтальной плоскостях независимо друг от друга, что позволяет обеспечить движение пациента при сравнительно невысоких требованиях к управляющему алгоритму. Законы изменения координат центра масс от

времени на каждом участке траектории представим в виде:

$$x_C(t) = \sum_{i=0}^3 c_i t^i; y_C(t) = \sum_{i=0}^3 d_i t^i; z_C(t) = \sum_{i=0}^3 e_i t^i, (2)$$

где c_i, d_i, e_i – постоянные, определяемые из граничных условий.

Будем считать, что время выполнения одного шага равно T . Представим траекторию в виде отрезков прямой. Шаг разобьем на четыре участка и положим, что сшивка участков происходит при условии равенства соответствующих координат и скоростей, что отражается в граничных условиях. Время движения по участку составит $T/4$.

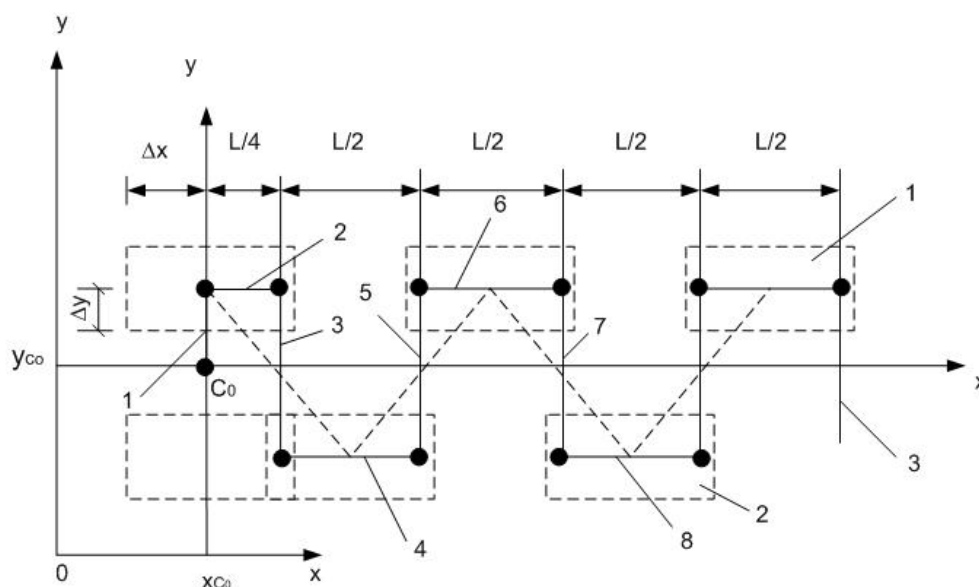


Рис. 2. Схема движения центра масс: y_{C0}, x_{C0} – положение начала локальной системы координат; $\Delta x, \Delta y$ – положение центра масс на стопе в начале одноопорной фазы. **1,3,5,7** – фрагменты траектории ЦМ во фронтальной плоскости; **2,4,6,8** – фрагменты траектории ЦМ в сагиттальной плоскости

Fig. 2. Scheme of mass center movement: y_{C0}, x_{C0} – the position of the origin of the local coordinate system; $\Delta x, \Delta y$ – the position of mass center on the foot at the beginning of single-support phase; **1,3,5,7** – fragments of MC trajectory in the frontal plane; **2,4,6,8** – fragments of MC trajectory in sagittal plane

Построение траектории движения ГСС

Наиболее точно построение траектории движения стопы человека можно осуществить с помощью обработки и анализа экспериментальных данных походки человека. Для этого, в работе применена программа анализа и моде-

лирования видеофрагментов, полученных в ходе проведения физических экспериментов – «tracker». Эта программа предназначена для физического образования данных [10]. После обработки шага человека программой видеонализа, полученные массивы данных переносятся в рабочее пространство MATLAB (рис. 3).

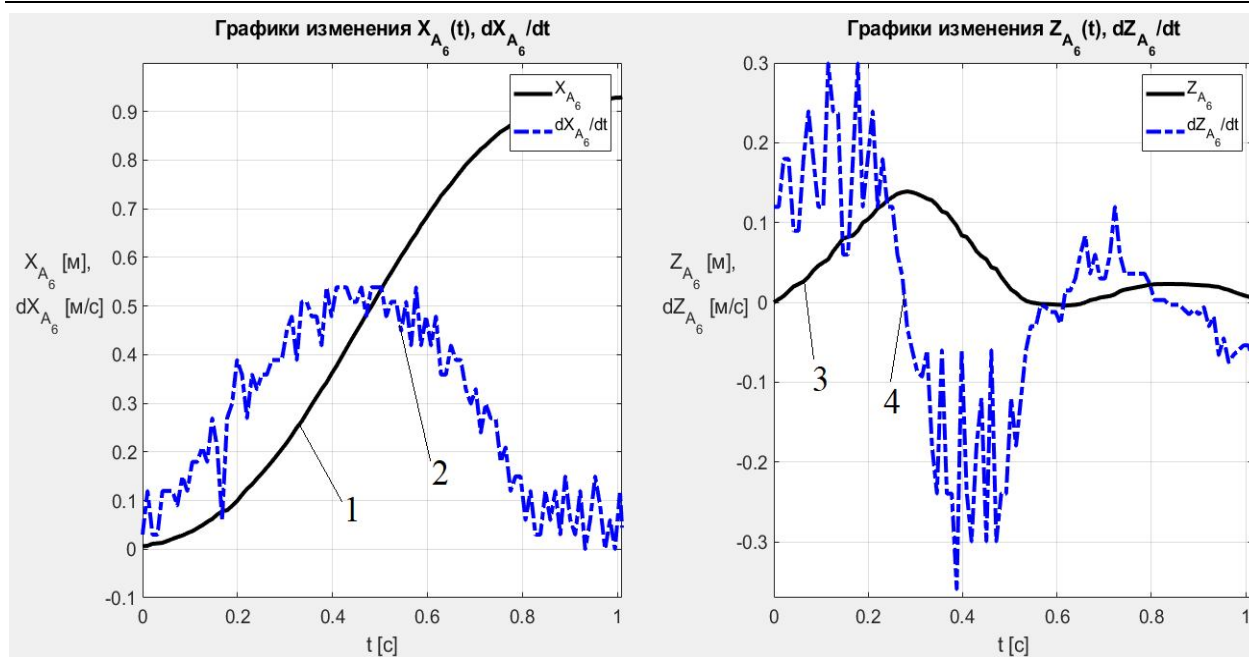


Рис. 3. Графики изменения экспериментально полученных законов движения ГСС и соответствующих скоростей: **1** – X_{A_6} ; **2** – $\dot{X}_{A_6}$; **3** – Z_{A_6} ; **4** – $\dot{Z}_{A_6}$

Fig. 3. Graphs of changes in experimentally obtained laws of AJ motion and corresponding speeds:

1 – X_{A_6} ; **2** – $\dot{X}_{A_6}$; **3** – Z_{A_6} ; **4** – $\dot{Z}_{A_6}$

Полученные графики изменения производных траектории ГСС имеют ярко выраженный колебательный характер (см. рис. 3), поэтому требуется сглаживание полученных в эксперименте зависимостей $X_{A_6}(t)$, $Z_{A_6}(t)$.

Сглаживание траектории

Чтобы сгладить полученные в ходе эксперимента значения $X_{A_6}(t)$, $Z_{A_6}(t)$ используется функция «smooth» программного пакета MATLAB, которая сглаживает данные с помощью фильтра скользящего среднего [11,12]. Результатом сглаживания данных является траектория движения стопы, представленная на рис. 4.

Представленные на рис. 4 сглаженные графики изменения кинематики дви-

жения ГСС имеют более плавный характер изменения, чем изначальные и существенно меньшие крайние значения, однако производные по-прежнему имеют колебательный характер изменения. Поэтому для получения траектории оптимального вида применяется аппроксимация гладкой функцией.

Аппроксимация законов движения ГСС

Для нахождения закона изменения движения ГСС из данных, полученных в ходе эксперимента, можно применить аппроксимацию функцией «polyfit» программного пакета MATLAB, возвращающей коэффициенты полинома n -ой степени, которые подходят для описания аппроксимируемых данных [13, 14].

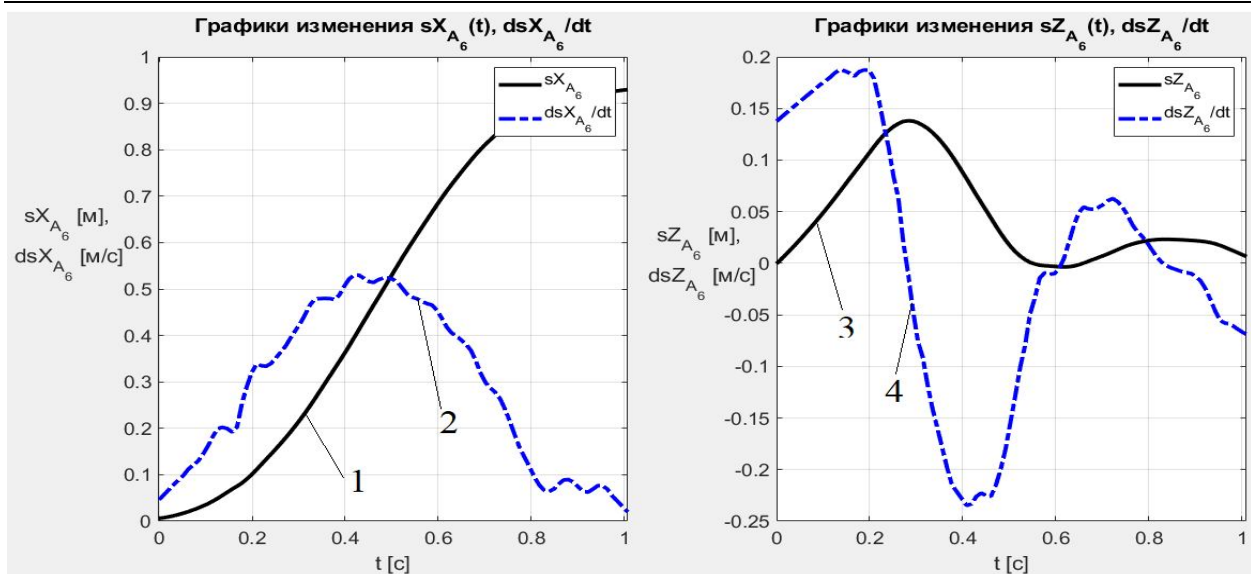


Рис. 4. Графики изменения "сглаженных" законов движения ГСС и соответствующих скоростей траектории движения ГСС: 1 – sX_{A_6} ; 2 – $s\dot{X}_{A_6}$; 3 – sZ_{A_6} ; 4 – $s\dot{Z}_{A_6}$.

Fig. 4. Graphs of changes in "smoothed" laws of AJ motion and corresponding velocities of AJ trajectory: 1 – sX_{A_6} ; 2 – $s\dot{X}_{A_6}$; 3 – sZ_{A_6} ; 4 – $s\dot{Z}_{A_6}$

Итоговые законы изменения координат стопы будут иметь вид [15]:

$$X_{A_6} = \sum_{i=0}^{n_x} a_i \cdot t^i; Z_{A_6} = \sum_{j=0}^{n_z} b_j \cdot t^j, \quad (3)$$

где n_x и n_z – порядок полинома; t – время, коэффициенты a_i и b_j находятся с помощью вышеописанной функции «polyfit».

Графики изменения аппроксимированных законов движения ГСС, полученные на основании обработки экспериментальной траектории, представлены на рис. 5.

После аппроксимации полиномом траектории движения стопы графики изменения которой, представлены на рис. 5 приобрели удовлетворительный для дальнейшего моделирования вид.

Обратная кинематика экзоскелета (ОКЭ)

Нахождение вектора обобщённых координат (4), при заданной траектории

движения стопы, осуществляется с помощью решения обратной задачи кинематики [16-20].

$$\bar{q}(t) = (q_{00}, \dots, q_{80})^T. \quad (4)$$

Рассмотрим задачу (ОКЭ) для одноопорной фазы при опоре на правую стопу. Определим вектор – функцию – $\bar{F}(\bar{q})$ (5), которая определяет значения, соответствующие проекциям центра масс, стопы и положения спины в зависимости от обобщённых координат $\bar{q}$.

$$\bar{F}(\bar{q}) = [\bar{r}_C(\bar{q}), \bar{r}_{A_6}(\bar{q})]^T. \quad (5)$$

Введем вектор-функцию:

$$\bar{\Phi}_F(t) = [\bar{r}_C(t), \bar{r}_{A_6}(t)]^T. \quad (6)$$

Обозначим псевдообратную матрицу Якоби

$$J^+ = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^+. \quad (7)$$

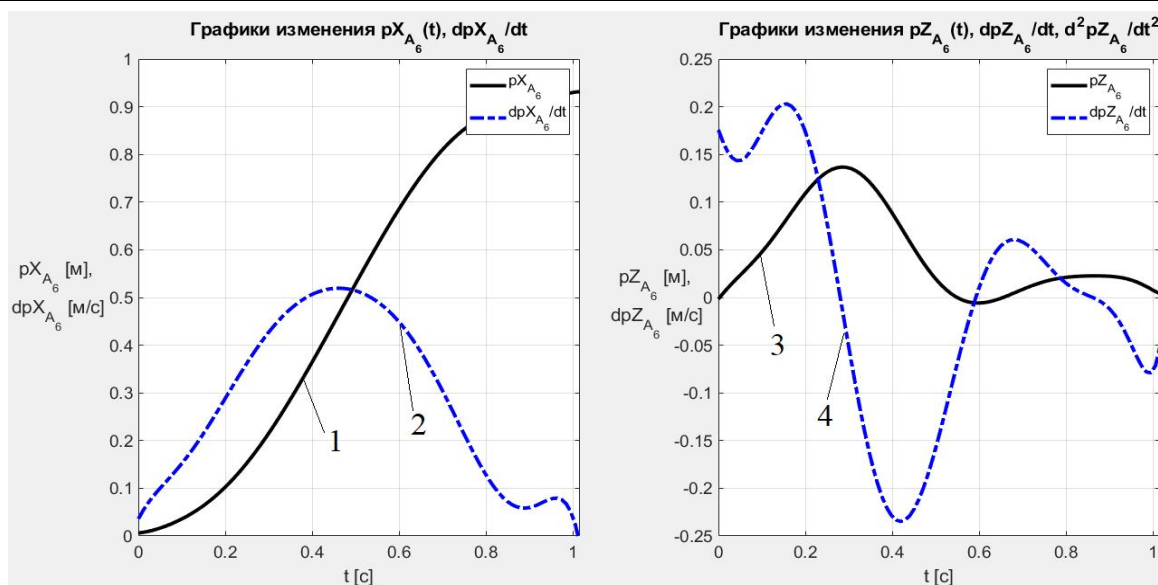


Рис. 5. Графики изменения аппроксимированных законов движения ГСС и соответствующих скоростей траектории движения ГСС на основании обработки экспериментально полученной траектории: 1 – pX_{A6} ; 2 – $p\dot{X}_{A6}$; 3 – pZ_{A6} ; 4 – $p\dot{Z}_{A6}$; 5 – $p\ddot{X}_{A6}$; 6 – $p\ddot{Z}_{A6}$

Fig. 5. Graphs of changes in approximated laws of AJ motion and corresponding velocities of AJ trajectory motion based on the processing of experimentally obtained trajectory:

1 – pX_{A6} ; 2 – $p\dot{X}_{A6}$; 3 – pZ_{A6} ; 4 – $p\dot{Z}_{A6}$; 5 – $p\ddot{X}_{A6}$; 6 – $p\ddot{Z}_{A6}$

Тогда, в дискретной форме выражение перепишем в виде:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + J_F^+ \Delta \bar{\Phi}_F(t), \quad (8)$$

где $\Delta \bar{\Phi}_F(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}_F(t)$ на временном шаге Δt .

Полученное соотношение позволяет находить вектор обобщенных координат $\bar{q}$ на $k+1$ -м временном шаге по известному значению $\bar{q}$ на k -м шаге.

Результаты и их обсуждение

На рис. 6 - 7 приведены диаграммы, отражающие изменения кинематических характеристик вращательного движения звеньев экзоскелета.

Выводы

1. Разработан метод построения законов движения нижних конечностей,

основанный на экспериментально определенной траектории движения голеностопного сустава (ГСС) с последующим синхронным расчетом углов поворота звеньев нижних конечностей на основе численного решения задачи обратной кинематики, позволяющий обеспечить заданное врачом - реабилитологом движение нижних конечностей пациента.

2. Предложен метод построения траектории движения ГСС с использованием процедуры сглаживания и аппроксимации траектории по видеофрагменту эксперимента.

3. Решена обратная задача кинематики скорости и проведено математическое моделирование походки реабилитационного экзоскелета, в ходе которого была получена информация о кинематике его звеньев, необходимая для создания паттернов движения аппарата.

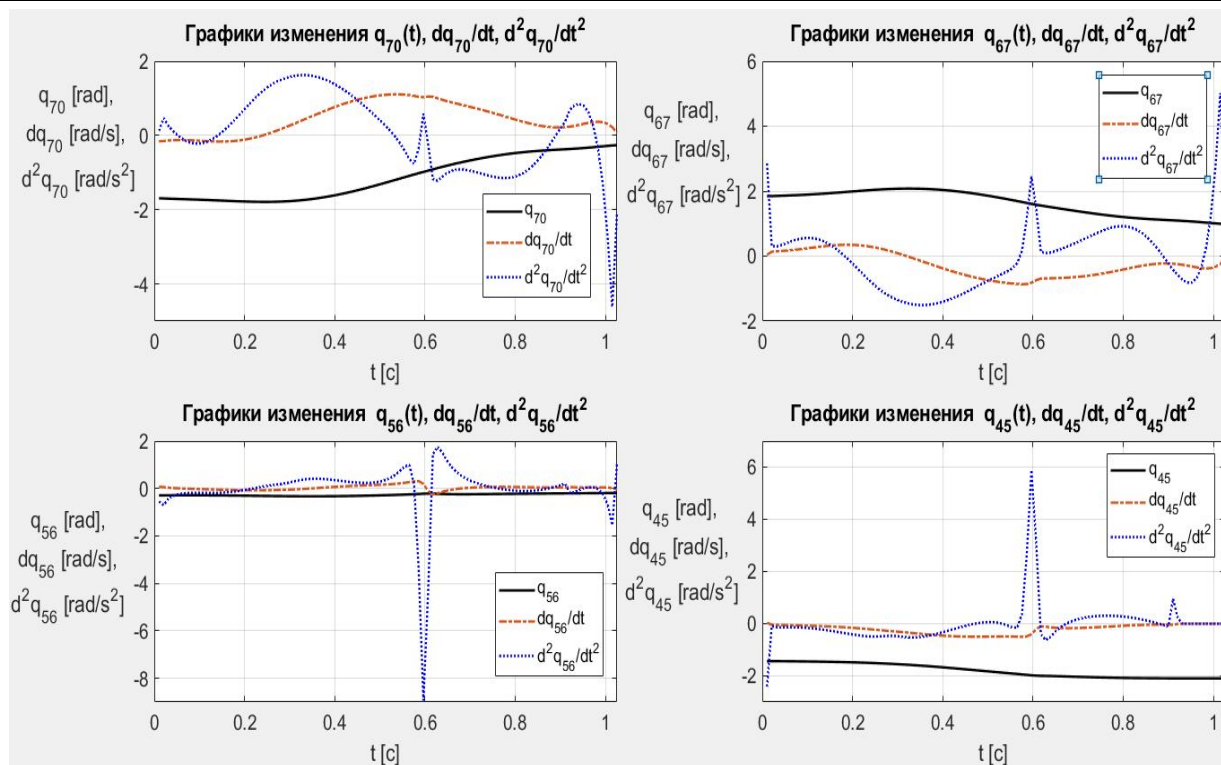


Рис. 6. Графики изменения кинематических характеристик углов. $q_{70}, q_{67}, q_{56}, q_{45}$

Fig. 6. Graphs of changes of kinematic characteristics of angles. $q_{70}, q_{67}, q_{56}, q_{45}$

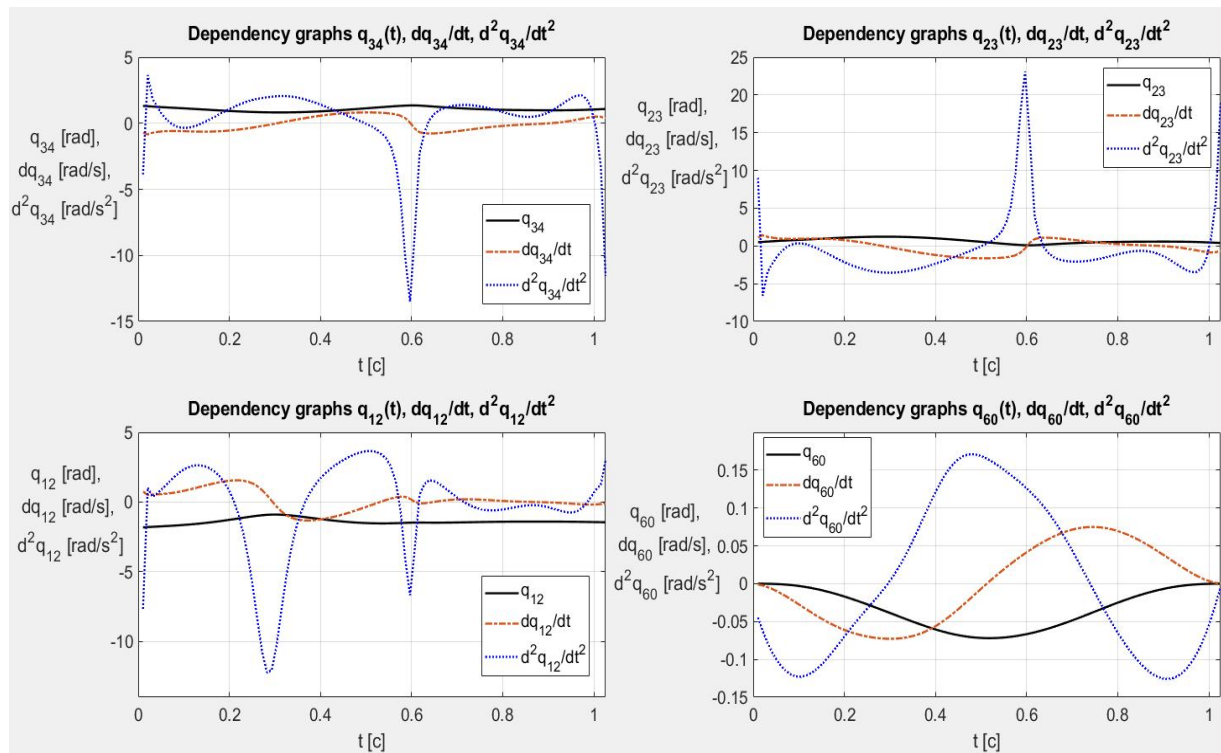


Рис. 7. Графики изменения кинематических характеристик углов. $q_{34}, q_{23}, q_{12}, q_{60}$

Fig. 7. Graphs of changes of kinematic characteristics of angles s. $q_{34}, q_{23}, q_{12}, q_{60}$

Список литературы

1. Динамика распространения заболеваний ОДА в России и в мире // Здоровье позвоночника и суставов. URL: https://spinet.ru/public/dinamika_rasprostraneniya_oda.php.
2. Воробьев А. А. и др. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) // Современные технологии в медицине. 2015. Т. 7. №. 2.
3. Zhang C. et al. Development of a lower limb rehabilitation exoskeleton based on real-time gait detection and gait tracking // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Т. 8. № 1. С. 1687814015627982.
4. Яцун С. Ф., Яцун А. С., Корневский Н. А. Опыт проектирования реабилитационных экзоскелетов // Медицинская техника. 2017. №. 3. С. 48-51.
5. Яцун С. В. и др. Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. №. 6. С. 176-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.
6. Хусаинов Р. Р., Климчик А. А., Магид Е. А. Метод управления движением двуногого шагающего робота по произвольной траектории // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 10. С. 633-641.
7. Котов Е. А., Друк А. Д., Клыпин Д. Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. №. 4 (178). С. 91-97.
8. Белов М. П., Козлова Л. П., Чыонг Д. Д. Система управления электроприводами движения нижних конечностей экзоскелета на основе ПД-регулятора с нейронной сетью // Электротехника. 2021. №. 3. С. 36-41.
9. Капустин А. В. и др. Способы поддержания устойчивого положения реабилитационного экзоскелета медицинского назначения при ходьбе // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. №. 3. С. 44-54.
10. Tracker // Tracker Video Analysis and Modeling Tool. URL: <https://physlets.org/tracker/>.
11. Михеев С. Е. О сглаживании функций // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2014. №. 4.
12. smooth // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html>.
13. Вершик А. М., Малоземов В. Н., Певный А. Б. Наилучшая кусочно-полиномиальная аппроксимация // Сибирский математический журнал. 1975. Т. 16. №. 5. С. 925-938.
14. polyfit // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.

15. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments // *Robotics research*. Springer, Cham, 2016. P. 649-666.
16. Колтыгин Д. С., Седельников И. А., Петухов Н. В. Аналитический и численный методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. №. 5 (124).
17. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. СПб., 2016. 105 с.
18. Zhao R. et al. Inverse kinematic solution of 6R robot manipulators based on screw theory and the Paden–Kahan subproblem // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. Vol. 15. №. 6. P. 1729881418818297.
19. Singh T. P., Suresh P., Chandan S. Forward and inverse kinematic analysis of robotic manipulators // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4. №. 2. P. 1459-1468.
20. Arian A., Danaei B., Tale Masouleh M. Kinematic and Dynamic Analyses of Tripteron, an Over-Constrained 3-DOF Translational Parallel Manipulator, through Newton-Euler Approach // *AUT Journal of Modeling and Simulation*. 2018. Vol. 50. №. 1. P. 61-70.

References

1. [The dynamics of the spread of diseases of ODA in Russia and in the world]. *Zdorov'e pozvonochnika i sustavov = Health of the spine and joints*. (In Russ). Available at: https://spinet.ru/public/dinamika_rasprostraneniya_oda.php.
2. Vorobiev A.A. et al. Ekzoskelet kak novoe sredstvo v abilitatsii i reabilitatsii invalidov (obzor) [Exoskeleton as a new tool in the habilitation and rehabilitation of disabled people (review)]. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*, 2015, vol. 7, no. 2.
3. Zhang C. et al. Development of a lower limb rehabilitation exoskeleton based on real-time gait detection and gait tracking. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 1687814015627982.
4. Yatsun S. F., Yatsun A. S., Korenevsky N. A. Opyt proektirovaniya reabilitatsionnykh ekzoskeletov [Experience in the design of rehabilitation exoskeletons]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Technology*, 2017, no. 3, pp. 48-51.
5. Yatsun S. V. et al. Modelirovanie patternov pokhodki patsienta s povrezhdeniem oporno-dvigatel'nogo apparata s pomoshch'yu ekzoskeleta [Modeling gait patterns of a patient with damage to the musculoskeletal system using an exoskeleton]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2019, vol. 23, no. 6, pp. 176-188 (In Russ). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.

6. Khusainov R.R., Klimchik A.A., Magid E.A. Metod upravleniya dvizheniem dvunogogo shagayushchego robota po proizvol'noi traektorii [Method of motion control of a two-legged walking robot along an arbitrary trajectory]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2018, vol. 19, no. 10, pp. 633-641.
7. Kotov E.A., Druk A.D., Klypin D.N. Razrabotka ekzoskeleta nizhnikh konechnostei cheloveka dlya meditsinskoi reabilitatsii [Development of the exoskeleton of the lower limbs of the human for medical rehabilitation]. *Omskii nauchnyi vestnik* = *Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 4 (178), pp. 91-97.
8. Belov M.P., Kozlova L.P., Chyong D.D. Sistema upravleniya elektroprivodami dvizheniya nizhnikh konechnostei ekzoskeleta na osnove PD-regulyatora s neironnoi set'yu [Control system for electric drives of movement of the lower extremities of the exoskeleton based on a PD controller with a neural network]. *Elektrotehnika*, 2021, no. 3, pp. 36-41.
9. Kapustin A.V. et al. Sposoby podderzhaniya ustoichivogo polozheniya reabilitatsionnogo ekzoskeleta meditsinskogo naznacheniya pri khod'be [Ways to maintain a stable position of a medical rehabilitation exoskeleton when walking]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* = *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2018, n. 3, pp. 44-54.
10. Tracker. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. Available at: <https://physlets.org/tracker/>.
11. Mikheev S.E. O sglazhivanii funktsii [On smoothing functions]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* = *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 4.
12. Smooth. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html>.
13. Vershik A.M., Malozemov V.N., Pevnyy A.B. Nailuchshaya kusochno-polinomial'naya approksimatsiya [The best piecewise polynomial approximation]. *Sibirskiy matematicheskii zhurnal* = *Siberian Math. Magazine*, 1975, vol. 16, no. 5, pp. 925-938.
14. Polyfit. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.
15. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments. *Robotics research*. Springer, Cham, 2016, pp. 649-666.
16. Koltygin D.S., Sedelnikov I.A., Petukhov N.V. Analiticheskii i chislennyy metody resheniya obratnoi zadachi kinematiki dlya robota Delta [Analytical and numerical methods for solving the inverse problem of kinematics for the Delta robot]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 5 (124).

17. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami* [Methods for controlling robotic applications]. St. Petersburg, 2016. 105 p.
18. Zhao R. et al. Inverse kinematic solution of 6R robot manipulators based on screw theory and the Paden–Kahan subproblem. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, vol. 15, no. 6, pp. 1729881418818297.
19. Singh T. P., Suresh P., Chandan S. Forward and inverse kinematic analysis of robotic manipulators. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 1459-1468.
20. Arian A., Danaei B., Tale Masouleh M. Kinematic and Dynamic Analyses of Tripteron, an Over-Constrained 3-DOF Translational Parallel Manipulator, through Newton-Euler Approach. *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 61-70.

Информация об авторах / Information about the Authors

Печурин Александр Сергеевич, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru

Alexander S. Pechurin, Master's Degree Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru

Федоров Андрей Владимирович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrei V. Fedorov, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией НИЛ МИР, кафедра механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ayatsun@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-7295>, Web of Science ResearcherID N-6212-2016

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Head of Research Laboratory MIR, Associate Professor, Senior Researcher of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ayatsun@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-7295>, Web of Science ResearcherID N-6212-2016

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, Web of Science ResearcherID G-3891-2017

Sergey F. Jatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, Web of Science ResearcherID G-3891-2017