

УДК 004.94

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.009](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.009)

Метод автоматизированного проектирования экзоскелета с учетом антропометрических данных пользователя

С.Е. Драгунов 

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,
Российская Федерация*

Резюме. Метод автоматизированного проектирования экзоскелета нижних конечностей с применением параметрического дизайна предназначен для создания медицинских экзоскелетов нижних конечностей под антропометрические параметры оператора, что позволяет снизить погрешность совмещения осей движения суставов экзоскелета и осей движения суставов оператора. Метод основывается на перестроении эталонной модели экзоскелета нижних конечностей под антропометрические данные оператора и включает в себя следующие проектные процедуры: процедуру снятия мерок с оператора, снятие изображения, полученного в результате 3D-сканирования, заполнение формы приложения, учитывающего эксплуатационные требования, вывод перестроенной модели экзоскелета и сопутствующей документации. Для определения элементной базы экзоскелета используется база данных электрорадиокомпонентов, подбираемых под эксплуатационные требования. Для построения каркаса, соответствующего антропометрическим данным, используется предварительно созданная эталонная модель экзоскелета нижних конечностей. Для апробации модели метод также включает в себя виртуальную симуляцию работы через наложение перестроенной модели экзоскелета на 3D-модель оператора, полученную в результате 3D-сканирования, с последующей проверкой анимации движений и совмещения коллизий моделей. Для проверки эффективности было произведено тестирование построения экзоскелетов под антропометрические данные пользователя ручным и автоматическим способами.

Ключевые слова: проектирование, САПР, автоматизация, экзоскелеты, антропометрические параметры, 3D-модель.

Для цитирования: Драгунов С.Е. Метод автоматизированного проектирования экзоскелета с учётом антропометрических данных пользователя. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1545> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.009

A method for automated design of an exoskeleton taking into account the user's anthropometric data

S.E. Dragunov 

Volgograd State Technical University, Volgograd, the Russian Federation

Abstract. The method of computer-aided design of the exoskeleton of the lower extremities using parametric design is intended for creating medical exoskeletons of the lower extremities according to the anthropometric parameters of the operator, which allows reducing the error in combining the axes of movement of the exoskeleton joints and the axes of movement of the operator's joints. The method is based on rebuilding a reference model of the exoskeleton of the lower extremities according to the anthropometric data of the operator and includes the following design procedures: the procedure for taking measurements from the operator, taking the image obtained as a result of 3D scanning, filling out the application form that takes into account operational requirements, outputting the rebuilt exoskeleton model and accompanying documentation. To determine the elemental base of the exoskeleton, a database of electrical and radio components selected for operational requirements is used. To construct

a frame corresponding to anthropometric data, a previously created reference model of the lower extremity exoskeleton is used. To test the model, the method also includes a virtual simulation of work by superimposing a rebuilt exoskeleton model on a 3D model of the operator obtained as a result of 3D scanning, followed by checking the animation of movements and the combination of model collisions. To test the effectiveness, we tested the construction of exoskeletons for the anthropometric data of the user using manual and automatic methods.

Keywords: design, CAD, automation, exoskeletons, anthropometric parameters, 3D model.

For citation: Dragunov S.E. A method for automated design of an exoskeleton taking into account the user's anthropometric data. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1545> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.009 (In Russ.).

Введение

Развитие современных технологий открывает новые пути развития носимой техники, интегрируясь в повседневную жизнь человека. Одной из таких систем являются экзоскелеты, которые получают все большее распространение в сфере медицины и промышленности [1]. Экзоскелеты – сложные робототехнические системы, совмещающие в себе электромеханические и информационные системы, непосредственно взаимодействующие с человеком (оператором экзоскелета) при функционировании, и предназначенные для увеличения или усиления имеющихся физических возможностей оператора [2]. На данный момент наиболее проработанными, с точки зрения проектирования и производства, являются медицинские экзоскелеты нижних конечностей. К перспективным направлениям относится создание активных экзоскелетов нижних конечностей (АЭНК), т. е. выполняющих движения без необходимости приложения оператором энергии [3].

Имеющиеся подходы в проектировании ограничены требованиями к антропометрическим данным оператора экзоскелета (ограничения на размерные сетки) и являются дорогостоящими. Существующие методы основываются на ручной параметризации моделей экзоскелетов на этапе проектирования конструкции [4, 5] либо строятся на системе подстроечных пазов [6, 7], не гарантирующих попадание в естественные оси движений оператора и снижающих тем самым удобство эксплуатации. Исследованиями в области проектирования активных экзоскелетов занимаются Дудуров Е. А. [8], Яцун С.Ф. [9], Орлов И.А. [10] и другие исследователи.

В настоящее время требуется существенный пересмотр существующих процессов проектирования и производства активных экзоскелетов нижних конечностей, которые изначально не проектируются для использования конкретным оператором. Кроме этого, необходимо иметь надежные, быстрые и доступные процедуры оценки антропометрических параметров оператора. Изменение процесса проектирования должно заключаться в добавлении и модификации следующих проектных процедур и операций: 1) добавление новой проектной операции измерения антропометрических параметров оператора; 2) включение значений антропометрических параметров оператора в техническое задание на проектирование в части формализации условий эксплуатации; 3) модификация проектных процедур синтеза структурных элементов бедра, голени и ступни, а также крепежного элемента и пояса в зависимости от антропометрических параметров оператора и назначения АЭНК (реабилитация или повседневное использование).

Материалы и методы

Для автоматизации проектирования разработана параметризованная модель экзоскелета в CAD системе с функциями параметризации (Рисунок 1) и набором

параметризованных настроек. Внесение антропометрических данных позволяет изменять структуру экзоскелета под антропометрические данные будущего оператора.

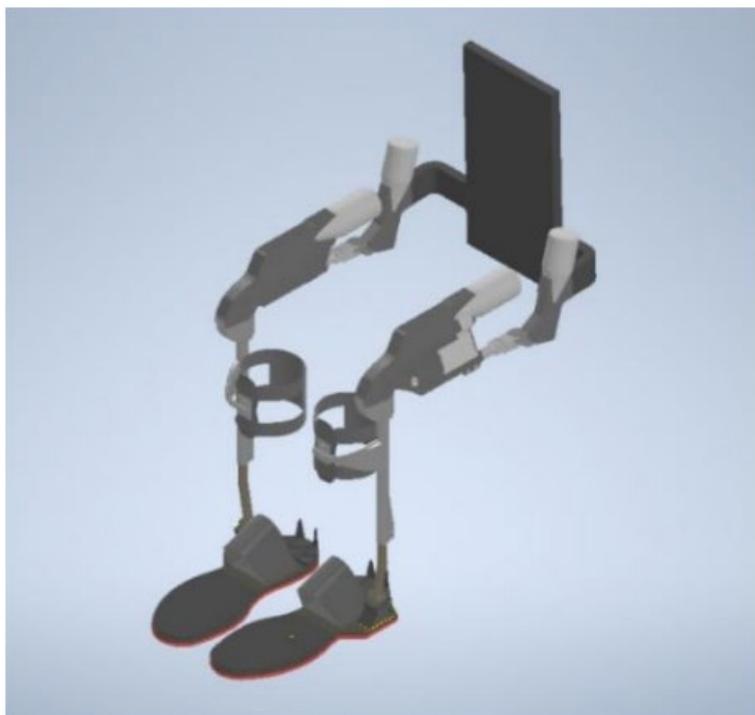


Рисунок 1 – 3D-модель экзоскелета
Figure 1 – 3D exoskeleton model

На верхнем уровне проектная процедура «Проектирование АЭНК» может быть представлена в следующем виде (Рисунок 2).

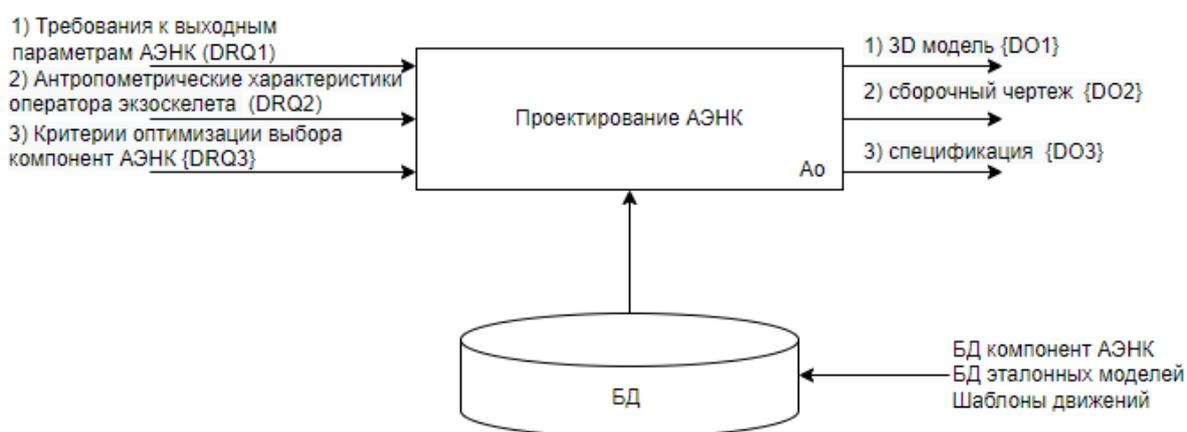


Рисунок 2 – Схема проектной процедуры A0 «Проектирование АЭНК»
Figure 2 – Scheme of the design procedure A0 “Design of AELL”

Результаты

На первом этапе вносятся входные данные (DRQ1), связанные с подбором электрорадиокомпонентов, такие как:

$$DRQ1 = \langle Us, kP, m, W, t, tCs, mt \rangle, \quad (1)$$

где Us – назначение АЭНК, kP – грузоподъемность (кг), m – масса экзоскелета(кг), t – время автономной работы (ч), tCs – время реакции системы управления (с), mt – материал исполнения основных конструктивных элементов.

И входные параметры, необходимые для перестроения каркаса экзоскелета:

$$DRQ2 = \langle h1, h2, l1, l2, oh1, oh2, ol1, ol2, c1, c2, Ta, ba, Omas \rangle, \quad (2)$$

где $h1$ – длина левой голени (мм), $h2$ – длина правой голени (мм), $oh1, oh2$ – обхват голени (мм), $l1, l2$ – длина бедра (мм), $ol1, ol2$ – обхват бедра (мм), $c1$ – размер обуви левой конечности, $c2$ – размер обуви правой конечности, ba – длина спинной части (мм), Ta – обхват талии (мм), $Omas$ – масса оператора (кг).

Для выбора приоритетного критерия оптимизации необходимо выбрать один из трех параметров, имеющий представление в виде

$$DRQ3 = \langle m, tw, g \rangle, \quad (3)$$

где m – масса →минимум, tw – время автономной работы, g – мощность усилия.

Выходные параметры включают в себя спецификацию элементов экзоскелета ($DO1$), из которых формируется 3D-модель созданного экзоскелета ($DO2$) и чертеж с размерами каркаса экзоскелета ($DO3$), где спецификация выбирается из сгенерированных вариантов.

В приближении процесс может быть представлен в виде декомпозиции следующих процедур ($A0$):

$$A0 = \langle A1.1, A1.2, A1.3, A1.4, A1.5 \rangle, \quad (4)$$

где $A1.1$ – процедура выбора допустимых электрорадиокомпонентов, $A1.2$ – процедура оптимизации выбранных электрорадиокомпонентов, $A1.3$ – процедура параметризации 3D-моделей, $A1.4$ – процедура совмещения каркаса с N набором вариантов электрорадиокомпонентов и параметризация каркаса экзоскелета, $A1.5$ – процедура анализа динамики получившихся сборок.

На Рисунке 3 представлена декомпозиция процедуры $A0$.

Подбор электрорадиокомпонентов осуществляется по 6-ти типам элементов: «controllers», «actuators», «batteries», «motors», «reducers», «encoders». Также отображен состав выходных данных, т.е. данных в формате JSON, передаваемых в модуль генерации геометрической сборки модели. В состав входят данные с антропометрическими параметрами оператора для дальнейшей генерации каркаса и данные, содержащие информацию о деталях экзоскелета.

Разрабатываемый метод предназначен для синтеза деталей каркаса и подбора электрорадиокомпонентов сборки экзоскелета на основе предъявляемых требований и антропометрических данных оператора.

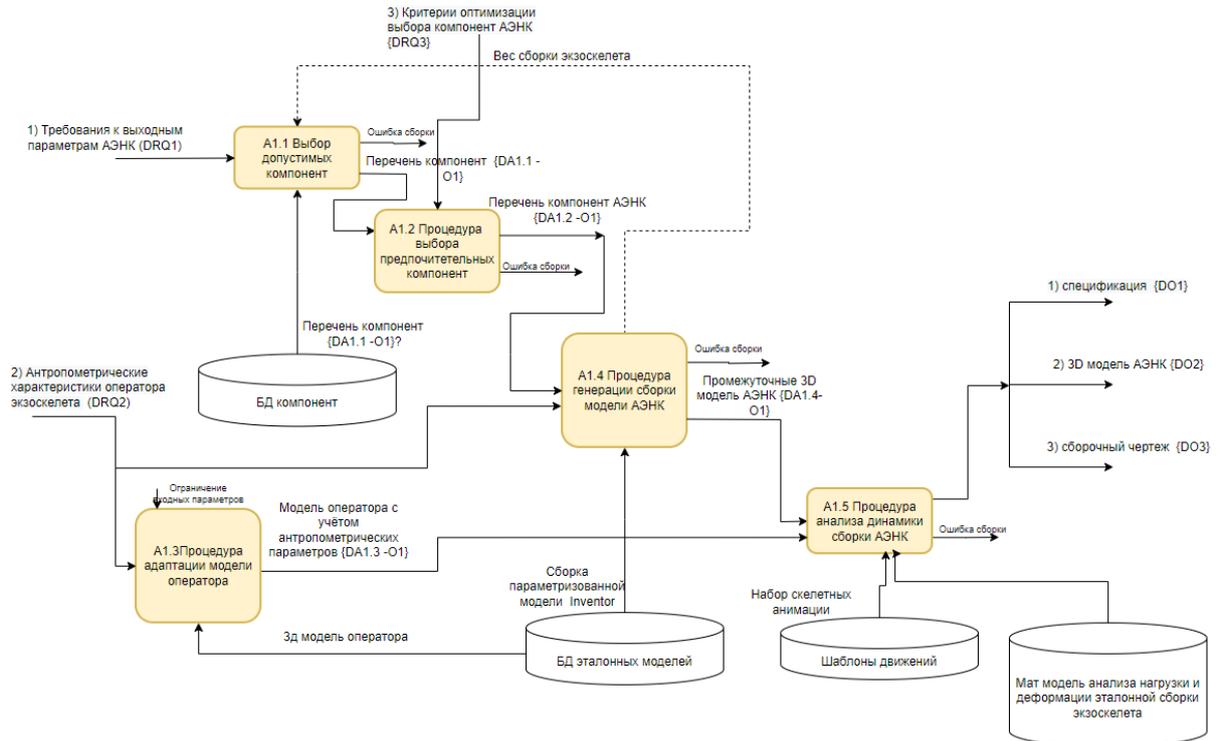


Рисунок 3 – Схема декомпозиции проектной процедуры A0
Figure 3 – Decomposition diagram of the design procedure A0

Первый шаг – на основе входных данных DRQ1 формируется список допустимых компонентов из базы данных электрорадиокомпонентов (Рисунок 4).

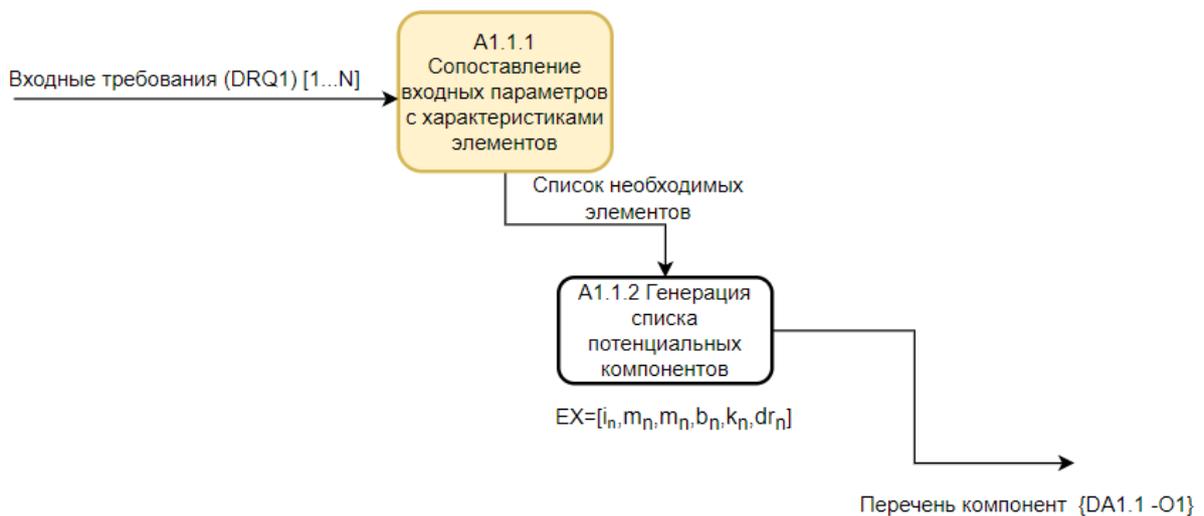


Рисунок 4 – Схема декомпозиции проектной процедуры A1
Figure 4 – Decomposition diagram of the design procedure A1

На основании входных требований определяются допустимые электрорадиокомпоненты экзоскелета:

$$EX = [i_{n1}, m_{n1}, b_{n1}, k_{n1}, dr_{n1}], \quad (5)$$

где $i = \{i_1 \dots i_{n1}\}$ – модель энкодера, $m = \{m_1 \dots m_{n1}\}$ – модель мотора, $b = \{b_1 \dots b_{n1}\}$ – модель батареи, $k = \{k_1 \dots k_{n1}\}$ – модель контроллера, $dr = \{dr_1 \dots dr_{n1}\}$ – модель драйвера, n – вариант электрорадиокомпонента.

Второй шаг – генерация сочетания сборок без повторений электрорадиокомпонентов в соответствующей категории с учетом выбранного ключевого параметра $DRQ3$ (Рисунок 5).

$$EXE_k = [i, m, b, k, dr], \quad (6)$$

где k – вариант сборки электрорадиокомпонентов.

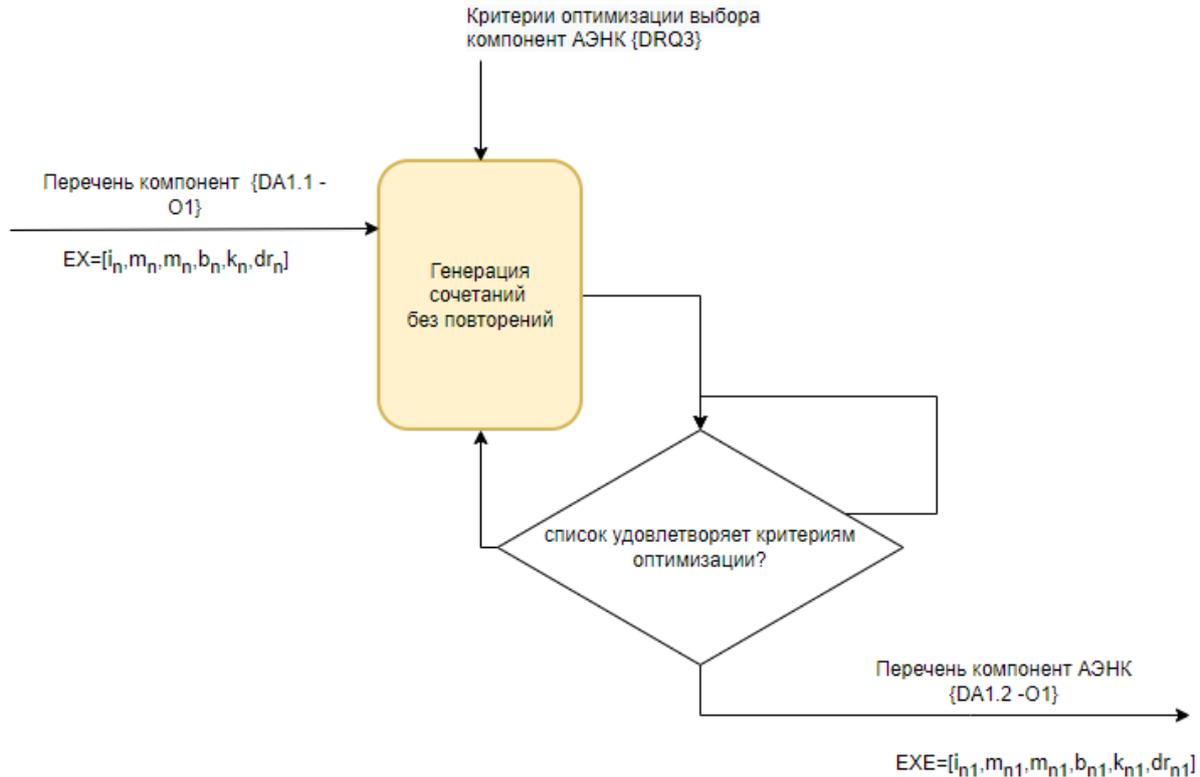


Рисунок 5 – Схема декомпозиции проектной процедуры $A2$
 Figure 5 – Decomposition diagram of the design procedure $A2$

Далее список допустимых электрорадиокомпонентов комбинируется без повторений:

$$EXS = [i_{n1}, m_{n1}, b_{n1}, k_{n1}, dr_{n1}]. \quad (7)$$

Третий шаг представлен на Рисунке 6. На основании входных параметров антропометрических данных оператора ($DRQ2$) из эталонной модели оператора (Oex) формируется модель оператора под заданные параметры ($OexS$) для последующей компьютерной симуляции проверки работоспособности варианта сборки:

$$OexS = [h1_n, h2_n, l1_n, l2_n, oh1_n, oh2_n, ol1_n, ol2_n, c1_n, c2_n, Ta_n, ba_n, Omas_n], \quad (8)$$

где $OexS = DRQ2$, n – значение параметра.



Рисунок 6 – Схема декомпозиции проектной процедуры *A3*
Figure 6 – Decomposition diagram of the design procedure *A3*

Четвертый шаг – параметризация эталонной модели экзоскелета *Ope* с антропометрическими данными *DRQ2* для получения подогнанного экзоскелета *OpeS* с вариантами подобранных электрорадиокомпонентов *EXS* (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Схема декомпозиции проектной процедуры *A4*
Figure 7 – Decomposition diagram of the design procedure *A4*

Пятый шаг – на основании сформированных моделей оператора *OexS*, каркаса экзоскелета *OpeS* и вариантов элементной базы *EXS* производится компьютерная симуляция шаблонов движений для проверки работоспособности созданных вариантов методом проверки коллизий поверхностей построенных моделей. Варианты сборки, прошедшие проверку, попадают в список возможных вариантов сборки экзоскелета, представленном на Рисунке 8.

$$FEX = \{fEX_1, fEX_2, \dots, fEX_N\}. \quad (8)$$

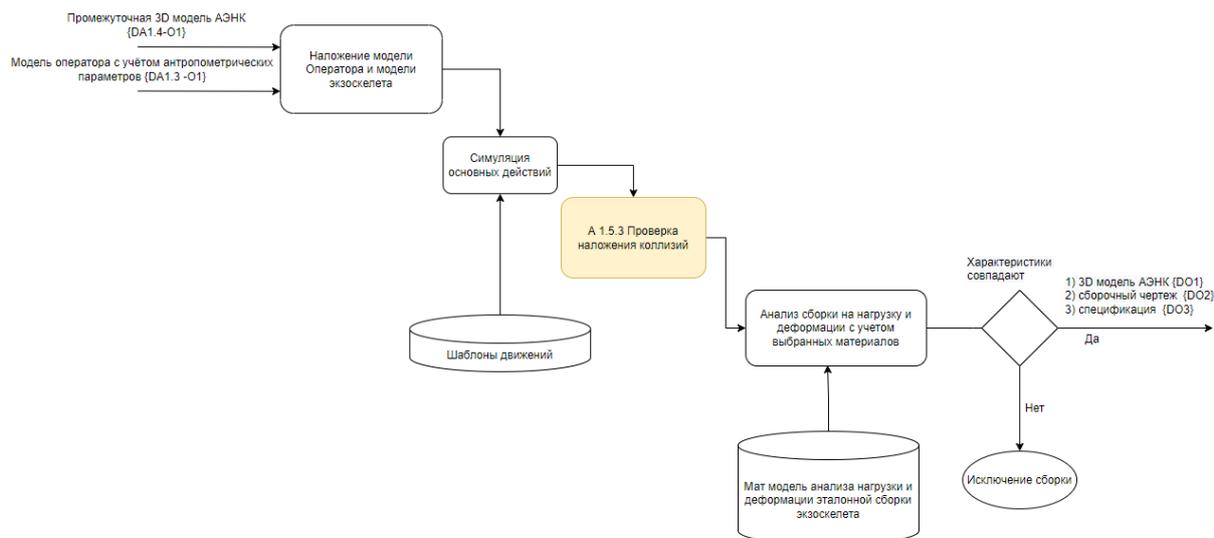


Рисунок 8 – Схема декомпозиции проектной процедуры A5
Figure 8 – Decomposition diagram of the design procedure A5

Таким образом, набор проектных процедур позволяет произвести индивидуальное проектирование и компьютерное моделирование вариантов сборок экзоскелета нижних конечностей, с последующей возможностью выгрузки чертежа, спецификации и 3D-модели.

Результирующая модель АЭНК удовлетворяет эргономическим требованиям и соответствует заявленным показателям эффективности и включает в себя:

- 1) перестроенную 3D-модель АЭНК {DO1};
- 2) сборочный чертёж перестроенной модели {DO2};
- 3) спецификация электрорадиокомпонентов {DO3}.

Обсуждение

На основании предложенного метода было разработано десктопное приложение для ввода параметра $DRQ1$, $DRQ2$, $DRQ3$, связанное с CAD системой с помощью Inventor Api, посредством которого производилось тестирование эффективности. Интерфейс приложения представлен на Рисунке 9.

В результате применения метода синтеза АЭНК получено 2 варианта технических решений, представленных на Рисунке 10.

Для получения полностью удовлетворяющего требованиям АЭНК было синтезировано и проанализировано 2 варианта экзоскелета нижних конечностей. Некоторые варианты оказались нежизнеспособны из-за превышения веса, другие варианты не подходили по эргономике, электрорадиокомпоненты нарушали центр масс и, как следствие, не прошли симуляцию, не позволяя выполнять базовые действия: стоять, ходить, приседать, поднимать ногу.

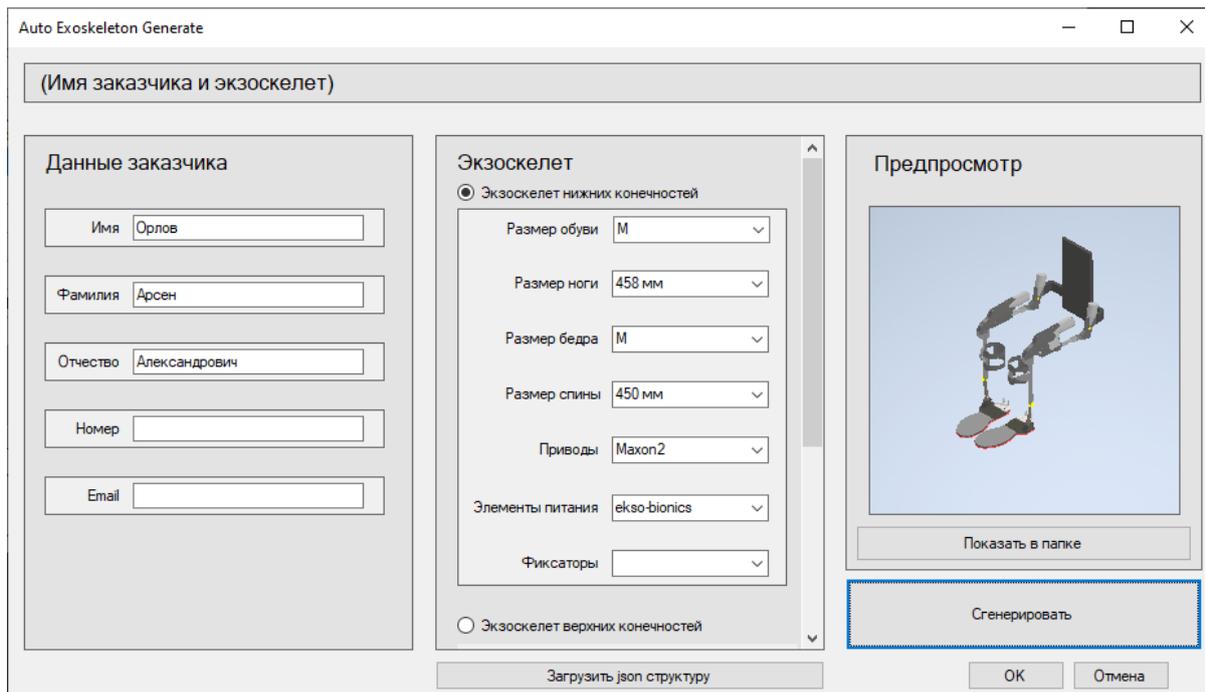


Рисунок 9 – Параметры, загруженные из json файла
Figure 9 – Parameters loaded from json file

подобрать компоненты

Доступные сочетания

Номер сборки	Кол-во	Тип компонента	Название
1	2	Мотор-редуктор	RE 40 Ø40 mm, 150...
1	2	Мотор-редуктор	RE 40 Ø40 mm, 90...
1	4	Контроллер	ESCON 70/10, 4-Q...
1	4	Датчик	Encoder HEDL 914...
1	4	Планетарная ...	Planetary Gearhead...
1	2	Аккумулятор	Delta ESP 1215
2	4	Контроллер	Synchronized Dual ...
2	4	Мотор-редуктор	DC-Harmonic Drive ...

Добавить в итоговую сборку Удалить из сборки

Итоговая сборка

Номер сборки	Кол-во	Тип компонента	Название	M
1	2	Мотор-редуктор	RE 40 Ø40 mm, 15...	43
1	2	Мотор-редуктор	RE 40 Ø40 mm, 90...	39
1	4	Контроллер	ESCON 70/10, 4-...	27
1	4	Датчик	Encoder HEDL 91...	21
1	4	Планетарная ...	Planetary Gearhea...	36
1	2	Аккумулятор	Delta ESP 1215	46

Сохранить сборку

Рисунок 10 – Окно приложения подобранных электрорадиокомпонентов
Figure 10 – Table of selected electrical and radio components

Пример параметризации крепления спины, эталонной модели под антропометрические данные оператора представлен на Рисунке 11.

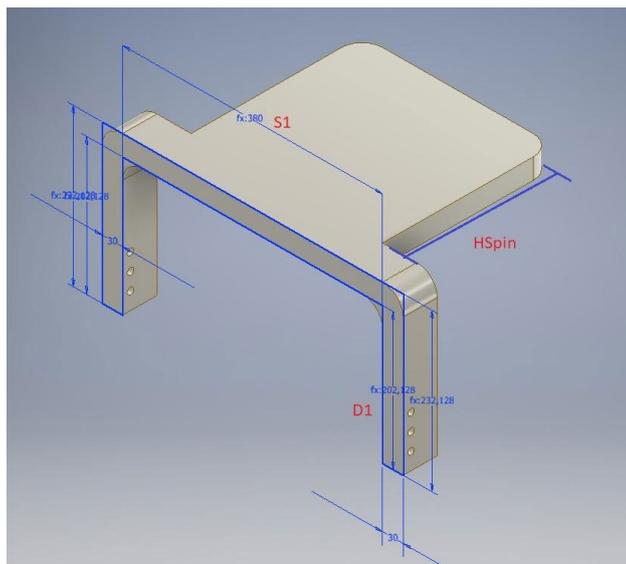


Рисунок 11 – Пример параметризуемых величин на примере крепления спины
Figure 11 – Example of parameterizable values using the example of a back mount

Расчет параметров крепления спины осуществляется по следующим формулам:
 $S1 = Ta \setminus 2$ – параметр подстройки под обхват талии; $D1 = ol1 \setminus 4,7$ – параметр модели подстройки под обхват бедер; $HSpin = ba$ – параметр модели подстройки под спину пользователя.

Результаты сравнения времени, затраченного на изменение параметров сборки активного и пассивного экзоскелета вручную и при помощи программы подсистемы проектирования экзоскелета указаны в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение времени, потраченного на изменение параметров сборки
Table 1 – Comparison of time spent changing build parameters

Сборка / номер сборки	Время, затраченное на изменение сборки вручную	Время, затраченное на изменение сборки с помощью программы
Активный / 1	24 мин. 38 с.	1 мин. 40 с.
Пассивный / 1	18 мин. 56 с.	1 мин. 38 с.
Активный / 2	25 мин. 10 с.	2 мин. 1 с.
Пассивный / 2	19 мин. 14 с.	1 мин. 55 с.
Активный / 3	23 мин. 58 с.	1 мин. 51 с.
Пассивный / 3	18 мин. 15 с.	1 мин. 40 с.
Активный / 4	24 мин. 44 с.	2 мин. 11 с.
Пассивный / 4	17 мин. 53 с.	2 мин. 3 с.
Активный / 5	25 мин. 49 с.	1 мин. 47 с.
Пассивный / 5	19 мин. 20 с.	1 мин. 43 с.

На основании изложенного можно сделать вывод, что с помощью программы подсистемы проектирования экзоскелета время, затраченное на изменение сборки экзоскелета, сокращается в среднем в 17 раз.

Заключение

Данный инструмент автоматизирует процесс разработки экзоскелетов нижних конечностей под антропометрические параметры оператора. Сокращает время проектирования индивидуальных экзоскелетов под требования конструктора, уменьшает время разработки на этапе проектирования и позволяет произвести компьютерную симуляцию работы перед реализацией конструкции. Индивидуализация каркаса экзоскелета позволяет сохранять естественные оси движения оператора, уменьшая вероятность негативных последствий эксплуатации подобных носимых систем. Задача автоматизации проектных процедур – построение экзоскелетов под заданные характеристики – является развивающейся областью в виду развития технологий быстрого прототипирования. В отличие от методов серийного производства, подобные системы могут стать доступнее конечному пользователю за счет сокращения издержек на производство.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Воробьев А.А., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С., Петрухин А.В., Поздняков А.М. Экзоскелет – состояние проблемы и перспективы внедрения в систему абилитации и реабилитации инвалидов (аналитический обзор). *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2015;(2):9–17.
Vorobiev A.A., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S., Petrukhin A.V., Pozdnyakov A.M. Current use of exoskeleton and prospects of its implementation in habilitation and rehabilitation of disabled people (analytical review). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Journal of Volgograd State Medical University*. 2015;(2):9–17. (In Russ.).
2. Даминов В.Д., Ткаченко П.В. Экзоскелеты в медицине: мировой опыт и клиническая практика Пироговского Центра. *Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова*. 2017;12(4-2):17–22.
Daminov V.D., Tkachenko P.V. Exoskeletons in medicine: world experience and clinical practice of the Pyrogov Center. *Vestnik Natsional'nogo mediko-khirurgicheskogo Tsentra im. N.I. Pirogova = Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center*. 2017;12(4-2):17–22. (In Russ.).
3. Yang K., Fei Jiang Q., Lai Wang X., Wu Chen Y., Yan Ma X. Structural design and modal analysis of exoskeleton robot for rehabilitation of lower limb. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1087(6). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/6/062004>.
4. Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Богданов А.А., Колбасин Б.Г. Эргономическое сопровождение разработки антропоморфных робототехнических систем космического назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021;(1):16–26. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-16-26>.
Dudorov E.A., Sokhin I.G., Bogdanov A.A., Kolbasin B.G. Ergonomic Support for the Development of Anthropomorphic Robotic Systems for Space Purposes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021;(1):16–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-16-26>.
5. Яцун С.Ф., Понедельченко М.С., Турлапов Р.Н. Синтез управляющих моментов по заданному закону движения трехзвенного манипулятора экзоскелета. *Вестник Воронежского института МВД России*. 2014;(2):146–152.
Yatsun S.F., Ponedelchenko M.S., Turlapov R.N. Synthesis of control moments of the given law of motion of the three-stage manipulator exoskeleton. *Vestnik Voronezhskogo*

- instituta MVD Rossii = The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2014;(2):146–152. (In Russ.).
6. Орлов И.А., Алисейчик А.П., Меркулова А.Г., Комарова С.В., Белая О.В., Грибков Д.А., Подопросветов А.В., Павловский В.Е., Ефимов А.Р., Бетц К.В. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела. *Медицина труда и промышленная экология*. 2019;59(7):412–416. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416>.
Orlov I.A., Aliseychik A.P., Merkulova A.G., Komarova S.V., Belaya O.V., Gribkov D.A., Podoprosvetov A.V., Pavlovsky V.E., Efimov A.R., Betz K.V. The relevance of the use of industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body. *Meditcina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2019;59(7):412–416. (In Russ.). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416>.
 7. Таможный В.А. Проектирование и создание опытных образцов нижних конечностей промышленного экзоскелета. *Инновации и инвестиции*. 2021;(1):150–153.
Tamozhniy V.A. Design and development of prototypes of the lower extremities of an industrial exoskeleton. *Innovatsii i investitsii = Innovation and Investment*. 2021;(1):150–153. (In Russ.).
 8. Малуга О.В. *Проектирование экзоскелета*. Саратов: Ай Пи Ар Медиа; 2019. 216 с.
Malyuga O.V. *Proektirovanie ekzoskeleta*. Saratov: IPR MEDIA; 2019. 216 p. (In Russ.).
 9. Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M.V. *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. 347 p.
 10. Чернышова Н.Д., Пономарев А.С. Разработка реабилитационных экзоскелетов. *Вестник науки и образования*. 2022;(1-1):41–45.
Chernyshova N.D., Ponomarev A.S. Development of rehabilitation exoskeletons. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2022;(1-1):41–45. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Драгунов Станислав Евгеньевич, старший преподаватель, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация.
Stanislav E. Dragunov, Senior Lecturer, Volgograd State Technical University, Volgograd, the Russian Federation.
e-mail: dragunov.stanislav.e@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.04.2024; одобрена после рецензирования 13.04.2024; принята к публикации 03.04.2024.

The article was submitted 01.04.2024; approved after reviewing 13.04.2024; accepted for publication 03.04.2024.