

РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ БІОНІЧНОГО ПРОТЕЗУ КИСТІ

Корендій В.М.¹ [ORCID], Дурняк М.Р.² [ORCID],

Кривуляк І.І.³ [ORCID], Маркович Б.М.⁴ [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доцент, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

³Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

⁴Національний університет «Львівська політехніка», д.ф.-м.н., професор, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання розроблення та дослідження концептуальної моделі біонічного протезу кисті, який класифікується як роботизований антропоморфний маніпулятор з п'ятьма незалежними ступенями вільності. Особлива увага приділяється механічній архітектурі пристрою, зокрема застосуванню принципу внутрішньої актуації з інтеграцією сервоприводів у несучу основу долоні. Описано інноваційну систему передачі руху на основі жорстких важільних механізмів і тяг, що має суттєві переваги над традиційними тросовими приводами: забезпечення активного згинання і розгинання фаланг, усунення механічного гістерезису та підвищення точності позиціонування. Здійснено детальний структурно-кінематичний аналіз розробленого модуля пальця як плоского багатоланкового механізму. Із застосуванням структурної формули Чебишева математично підтверджено наявність одного ступеня вільності для семиланкової конструкції пальця. Проведено розкладання кінематичного ланцюга на групи Ассура, що дозволило класифікувати пристрій як механізм другого класу. Розроблена кінематична схема забезпечує жорстку синхронізацію руху фаланг та детерміноване відтворення біоміметричної траєкторії схоплювання.

Ключові слова: біонічний протез, кінематичний аналіз, важільний механізм, ступені вільності, антропоморфний маніпулятор, внутрішня актуація, групи Ассура.

Вступ. Втрата верхньої кінцівки є однією з найбільш складних проблем, яка суттєво знижує якість життя людини, обмежуючи її можливості в самообслуговуванні та професійній діяльності. Сучасний етап розвитку біомедичної інженерії та робототехніки характеризується інтенсивним вдосконаленням технічних засобів реабілітації, зокрема створенням

високофункціональних біонічних протезів верхніх кінцівок [1]. Пріоритетним завданням при їх проектуванні є максимальне наближення кінематики та моторики штучної кисті до біомеханіки людської руки.

Аналіз існуючих комерційних та експериментальних зразків показує, що для приведення в рух фаланг пальців найчастіше використовуються тросові системи передачі зусилля. Незважаючи на їхню відносну компактність та простоту, такі системи мають ряд суттєвих інженерних недоліків. Зокрема, вони схильні до розтягування тросів з часом, мають значний механічний гістерезис і здатні передавати зусилля лише на розтяг [2]. Це вимагає застосування додаткових еластичних елементів (зворотних пружин) для розгинання пальців, що знижує точність позиціонування та збільшує витрати енергії.

Альтернативним підходом, що дозволяє вирішити ці проблеми, є використання жорстких важільних механізмів передачі руху. Вони гарантують надійну фіксацію об'єктів та активне керування як фазою згинання, так і фазою розгинання. Метою даної роботи є розроблення концепції доступного біонічного протезу кисті антропоморфного типу з п'ятьма незалежними ступенями вільності на основі жорстких кінематичних зв'язків та проведення його структурно-кінематичного аналізу для підтвердження працездатності механізму [3].

Основний матеріал. Об'єктом розробки та дослідження у даній роботі є модель роботизованої кисті (рис. 1), що класифікується як біонічний маніпулятор антропоморфного типу з п'ятьма ступенями вільності. Концепція пристрою базується на відтворенні біомеханіки та моторики людської руки шляхом інтеграції механічних вузлів та системи керування в єдиний компактний модуль. Ключовою особливістю розробленої системи є наявність п'яти пальців з індивідуальною актуацією, що дозволяє реалізовувати складні кінематичні ланцюги та широкий спектр схоплювань.

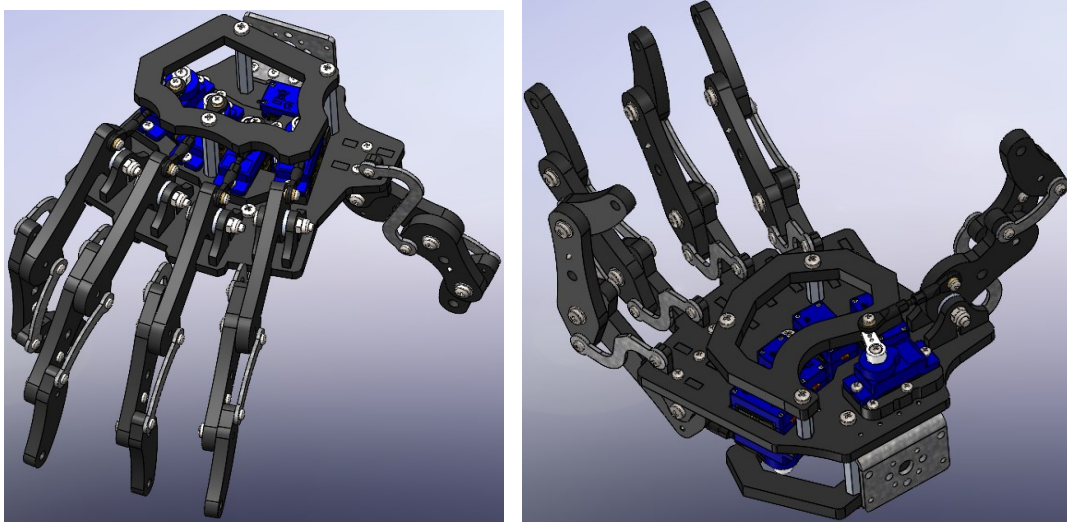


Рисунок 1 – Загальна концептуальна модель біонічного протезу кисті

Механічна підсистема протезу побудована за модульним принципом і включає три основні функціональні блоки: несучу основу (долоню), фалангові механізми пальців та систему передачі зусилля. Несуча основа виконана у вигляді складеної платформи, яка слугує жорстким шасі для розміщення виконавчих механізмів. Дизайн корпусу оптимізовано за принципом внутрішньої актуації [4]. Цей підхід передбачає інтеграцію мікро-сервоприводів безпосередньо в тіло кисті, а не їх винесення у гільзу передпліччя, що дозволяє створити самодостатній та компактний модуль. Шестикутна геометрія верхньої накладки забезпечує захист сервоприводів та конструктивну жорсткість на кручення. Важливою ергономічною особливістю є вузол великого пальця, встановлений на спеціальному виносному кронштейні під кутом до площини долоні. Така просторова конфігурація забезпечує функцію опозиції великого пальця решті масиву кисті, що є обов'язковою умовою для виконання силових циліндричних та точних щипкових захоплень.

Електромеханічна архітектура пристрою відзначається універсальністю. Виконавчими механізмами слугують мікро-сервоприводи (стандарту SG90 або MG90S) з металевим редуктором, розміщені горизонтально всередині несучої рами пальців для зменшення висоти профілю. Керування кутовим положенням здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що дозволяє програмно задавати швидкість руху кожного пальця та контролювати силу стискання. Апаратна частина відкрита до вибору мікроконтролера, включаючи

популярні платформи Arduino, ESP32 та STM32 для можливої інтеграції обробки електроміографічних (EMG) сигналів [5].

Основною інновацією розробленої моделі є застосована система передачі руху. Функціонально вона відповідає класу систем із дистальним приводом на основі жорстких важільних механізмів і тяг. Обертальний рух вихідного валу сервоприводу трансформується у зворотно-поступальний рух жорсткої тяги, з'єднаної з основою проксимальної фаланги. Жорсткі тяги дозволяють активно керувати як фазою згинання (флексії), так і розгинання (екстензії). У точці з'єднання тяги з приводом використано кульовий шарнір, що компенсує просторову неспіввісність площин обертання та запобігає заклинюванню механізму [3].

Кожен палець є уніфікованою функціональною одиницею та являє собою плоский важільний механізм модульної конструкції. Система фаланг включає проксимальну, середню та дистальну ланки, з'єднані циліндричними шарнірами. Передача руху реалізована через дворівневу систему важелів. Для узгодженого згинання середньої фаланги у вторинному контурі використано пасивну кінематичну ланку – металеву тягу S-подібної форми. Вигнута форма тяги дозволяє їй ефективно обходити вісь суглоба при глибокому згинанні, виключаючи механічну колізію з іншими елементами конструкції.

Для перевірки детермінованості руху модуля пальця та визначення його класу було проведено детальний структурно-кінематичний аналіз. Розрахункова модель базується на структурній схемі плоского важільного механізму з нижчими кінематичними парами (рис. 2). На основі топології ланцюга виділено одну нерухому ланку (стійку 0) та сім рухомих ланок ($n = 7$): кривошип 1 (важіль сервоприводу), шатун 2 (привідна тяга), проксимальна фаланга 4 (коромисло), напрямна S-подібна тяга 3, середня фаланга 6, тяга керування дистальною фалангою 5 та дистальна фаланга 7.

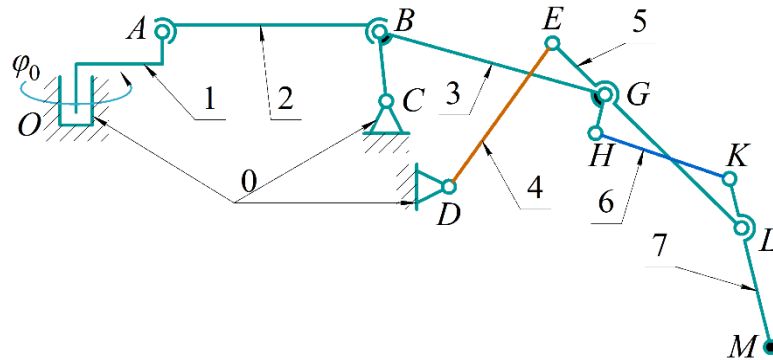


Рисунок 2 – Структурна схема одного з пальців біонічного протезу кисті

Усі з'єднання ланок є обертальними шарнірами, що відносяться до кінематичних пар V класу (p_5) за класифікацією Рело [3]. До них належать три з'єднання зі стійкою та сім міжланкових шарнірів, що загалом дає кількість кінематичних пар $p_5 = 10$. Вищі кінематичні пари (IV класу) у механізмі відсутні ($p_4 = 0$).

Ступінь вільності (рухомості) W плоского важільного механізму визначався за структурною формулою Чебишева [3]. Підставивши визначені значення топологічних параметрів, отримано:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 10 - 0 = 21 - 20 = 1. \quad (1)$$

Отриманий результат $W = 1$ математично доводить, що розроблений багатоланковий механізм пальця має рівно один ступінь вільності. Це означає, що рух усіх трьох фаланг є повністю детермінованим і однозначно залежить від єдиної узагальненої координати – кута повороту валу сервоприводу. Відповідно, запропонована кінематична схема забезпечує можливість точного керування процесом згинання цілого пальця за допомогою одного актуатора.

Для визначення класу механізму виконано розкладання кінематичного ланцюга на групи Ассур (структурні групи з нульовим ступенем вільності) [3]. Встановлено, що до первинного механізму I класу послідовно приєднуються три групи Ассур II класу 2-го порядку: перша забезпечує рух проксимальної фаланги, друга формує контур керування середньою фалангою, а третя узгоджує рух дистальної. Структурна формула має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II_2(2,3) \rightarrow II_2(4,5) \rightarrow II_2(6,7)$. Відповідно, досліджуваний палець класифікується як механізм другого класу.

Висновки

У результаті проведеної роботи розроблено та досліджено концептуальну модель біонічного протеза кисті антропоморфного типу з п'ятьма незалежними ступенями вільності. Обґрунтовано та практично реалізовано використання системи внутрішньої актуації та жорстких важільних механізмів передачі руху (push-rod linkages). Доведено, що запропонована конструкція, на відміну від традиційних тросових систем, забезпечує можливість активного згинання і розгинання фаланг, підвищує жорсткість фіксації об'єктів та повністю усуває проблему механічного гістерезису.

Проведений структурно-кінематичний аналіз розробленого модуля пальця із застосуванням формули Чебишева математично підтвердив наявність одного ступеня вільності ($W=1$) у семиланковому механізмі. Декомпозиція кінематичного ланцюга дозволила класифікувати пристрій як плоский важільний механізм другого класу. Запропонована кінематична схема забезпечує жорстку синхронізацію руху фаланг та дозволяє реалізовувати детерміновану біоміметичну траєкторію захвату з високою точністю за допомогою одного приводу на палець, що робить її ефективним рішенням для подальших досліджень та протезування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попадюха Ю.А. Особливості біонічних протезів верхніх кінцівок. Молодіжний науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Фізичне виховання і спорт. 2017. Вип. 25. С. 26-42.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mnv_2017_25_6
2. Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013. Vol. 50, No. 5. P. 599–618.
URL: https://www.eng.yale.edu/grablab/pubs/Belter_JRRD2013.pdf
3. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. Київ : Наукова думка, 2002. 660 с.
URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Kinitskiy_2004_272.pdf
4. Controzzi M., Clementi C., Peccerillo D., Cipriani C. The SSSA-MyHand: A dexterous lightweight myoelectric hand prosthesis. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2017. Vol. 25, No. 5. P. 459–468.
URL: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2578980>
5. Козбур І.Р., Марущак П.О., Медвідь В.Р., Савків В.Б., Пісьціо В.П. Проектування мікропроцесорних систем керування. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. 324 с.
URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE BIONIC HAND

PROSTHESIS CONCEPT

Vitaliy Korendiy, Maksym Durniak, Ihor Kryvuliak, Bohdan Markovych

Abstract. *The paper discusses the development and investigation of a bionic hand prosthesis conceptual model, classified as a robotic anthropomorphic manipulator with five independent degrees of freedom. Special attention is paid to the mechanical architecture, applying the intrinsic actuation principle with servo drives integrated into the palm's base. An innovative motion transmission system based on rigid push-rod linkages is described. It has significant advantages over traditional tendon-driven mechanisms: providing active flexion and extension of the phalanges, eliminating mechanical hysteresis, and increasing positioning accuracy. A detailed structural and kinematic analysis of the finger module as a planar multi-link mechanism was conducted. Using Chebyshev's structural formula, one degree of freedom for the seven-link design was mathematically confirmed. The decomposition of the kinematic chain into Assur groups allowed classifying it as a second-class mechanism. The kinematic scheme ensures rigid synchronization of motion and deterministic reproduction of biomimetic grip trajectories.*

Keywords: *bionic prosthesis, kinematic analysis, linkage mechanism, degrees of freedom, anthropomorphic manipulator, intrinsic actuation, Assur groups.*

REFERENCES

1. Popadiukha Yu.A. Osoblyvosti bionichnykh proteziv verkhnikh kintsivok. Molodizhnyi naukovi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Fizychno vykhovannia i sport. 2017. Vol. 25. P. 26–42. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mnv_2017_25_6. [in Ukrainian].
2. Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013. Vol. 50, No. 5. P. 599–618. URL: https://www.eng.yale.edu/grablab/pubs/Belter_JRRD2013.pdf
3. Kinytskyi Ya.T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn. Kyiv : Naukova dumka, 2002. 660 p. [in Ukrainian]. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Kinitskiy_2004_272.pdf
4. Controzzi M., Clementi C., Peccerillo D., Cipriani C. The SSSA-MyHand: A dexterous lightweight myoelectric hand prosthesis. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2017. Vol. 25, No. 5. P. 459–468. URL: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2578980>
5. Kozbur I. R., Marushchak P. O., Medvid V. R., Savkiv V. B., Pisttsio V. P. Proektuvannia mikroprotsesornykh system keruvannia. Ternopil: Vyd-vo TNTU imeni Ivana Puliuia, 2022. 324 p. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>. [in Ukrainian].