

**Авагян А.В.,**

orcid.org/0009-0007-3197-603X,

e-mail: 3941949@stud.kai.edu.ua,

**Пантєєв Р.Л.,** к.т.н.,

orcid.org/0000-0003-4707-4608,

e-mail: roman.pantieiev@npp.kai.edu.ua,

**Яновський Ф.Й.,** д.т.н.,

orcid.org/0000-0002-9529-5969,

e-mail: yanovsky@kai.edu.ua

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АКТУАТОРІВ І АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ В БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗАХ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК

Державний Університет “Київський авіаційний інститут”

### **Вступ**

У сфері біомедичної інженерії біонічні протези відіграють ключову роль у відновленні моторних функцій у пацієнтів з ампутованими кінцівками. На відміну від традиційних пасивних або механічних протезів, біонічні системи забезпечують активну взаємодію з користувачем, використовуючи датчики, процесори та виконавчі механізми, що дозволяє реалізувати точні, гнучкі та адаптивні рухи. Центральним елементом конструкції біонічного протеза є актуатор – пристрій, що перетворює електричну енергію на механічний рух і відповідає за функціональність кінематичної структури протеза.

Залежно від функціональних вимог, компактності, навантажень, джерела живлення та очікуваної швидкості/точності рухів, у біонічних протезах використовуються різні типи актуаторів: електромеханічні (в основному на базі постійного струму), пневматичні, гідравлічні, а також новітні технології, зокрема актуатори на основі форми пам'ятних сплавів (*SMA*), п'єзоелектричних матеріалів і штучних м'язів. Кожен з цих типів має свої переваги й обмеження щодо сили, лінійності, енергоспоживання, швидкодії, а також сумісності з біологічними тканинами. Керування такими актуаторами потребує складних систем зворотного зв'язку та адаптивних алгоритмів, здатних обробляти вхідні сигнали від користувача. Найбільш

розповсюдженим методом керування є електроміографія (ЕМГ) – зчитування електричних сигналів м'язової активності, які подаються на мікроконтролер або вбудовану систему з процесором обробки сигналів (*DSP*). Також активно впроваджуються методи керування на основі нейронних мереж, алгоритмів машинного навчання та нечіткої логіки, що дозволяє підвищити точність і адаптивність рухів протеза в реальному часі.

Дана стаття має на меті систематизувати сучасні підходи до реалізації актуаторів у біонічних протезах верхніх та нижніх кінцівок, провести порівняльний аналіз основних типів привідних систем за ключовими технічними характеристиками, а також розглянути архітектури керування, які забезпечують ефективну взаємодію між людиною та машиною.

### **Мета**

Метою цієї роботи є систематизація сучасних типів актуаторів, які використовуються в біонічних протезах кінцівок, а також аналіз підходів до їхнього керування з урахуванням технічних вимог, зворотного зв'язку та взаємодії з користувачем.

### **Дослідницькі питання**

Які основні типи актуаторів застосовуються в сучасних біонічних протезах і в чому полягають їхні переваги та обмеження?

Які архітектури та алгоритми керування забезпечують найкращу точність і адаптивність рухів протезів?

Які виклики пов'язані з реалізацією систем зворотного зв'язку та інтеграцією інтерфейсів "людина-протез"?

### **Постановка проблеми**

Сучасні біонічні протези потребують виконавчих механізмів, які здатні забезпечити точні, плавні та енергоефективні рухи з урахуванням фізіологічних особливостей користувача. Проблема полягає у відсутності єдиного універсального рішення – існуючі актуатори мають компроміси між компактністю, силою, швидкістю, біосумісністю й енергоспоживанням. Крім того, ефективне керування такими системами ускладнене шумами біологічних сигналів, варіативністю користувачів і потребує адаптивних алгоритмів.

### **Класифікація актуаторів**

Актуатори, які застосовуються в біонічних протезах, класифікуються за принципом перетворення енергії, конструктивними особливостями та функціональним призначенням. Вибір типу актуатора визначається низкою факторів, таких як необхідний крутний момент або лінійне зусилля, швидкість реакції, габарити, маса, енергоефективність, рівень шуму та біосумісність. Нижче подано основні типи актуаторів, що найчастіше використовуються в сучасних біонічних системах.

Пневматичні актуатори функціонують на основі стисненого повітря, що переміщає поршні або гнучкі мембрани. Їх основними перевагами є плавність руху та відносно невелика вага. Вони застосовуються переважно у дослідницьких або експериментальних моделях, де важлива безпека для користувача. Прикладом є протези, що використовують пневматичні м'язи *McKibben*, які імітують поведінку людських м'язів. Основними недоліками є громіздкість компресорів і потреба в джерелі стисненого повітря. Сучасні розробки зосереджуються на мініатюризації компресорів і використанні легких матеріалів, що дозволяє зробити ці системи більш мобільними [1].

Гідравлічні актуатори функціонують за рахунок тиску рідини, що переміщується через циліндри. Вони здатні створювати велику силу, що робить їх корисними для тяжких або індустріальних протезів. Завдяки своїй високій щільності енергії гідравлічні системи використовуються також у військових чи рятувальних застосуваннях. Серед недоліків – складність технічного обслуговування, висока вартість та ризик витоку рідини. В перспективі розвиток герметичних мікрогідравлічних систем може значно підвищити привабливість цього типу актуаторів. Математично їхня дія може описуватись рівнянням (1) рівноваги моментів:

$$\tau = J * \theta'' + b * \theta' + \tau_f, \quad (1)$$

де,  $\tau$  – момент, створений актуатором,  $J$  – момент інерції,  $b$  – коефіцієнт тертя,  $\theta'$  – кутова швидкість,  $\theta''$  – кутове прискорення [2].

Електричні актуатори це найпоширеніший тип у сучасних біонічних протезах. До них належать серводвигуни, безколекторні двигуни (*BLDC*), крокові двигуни та інші електроприводи. Вони забезпечують високий рівень точності, компактність і керованість. Електричні актуатори легко інтегруються з цифровими системами керування, що робить їх ідеальними для складних багатофункціональних протезів руки або ноги. Наприклад, у протезі *i-Limb* використовується кілька малих електродвигунів для індивідуального керування пальцями. Додатково вони забезпечують можливість програмування жестів, а також адаптацію до різних об'єктів за допомогою сенсорного зворотного зв'язку. [3]

Електромеханічні та електром'язові актуатори ця категорія включає інноваційні технології, які використовують розумні матеріали.

Сплави з пам'яттю форми (*SMA*) – змінюють форму під впливом температури. Вони мають високу щільність енергії, проте повільну реакцію. *SMA* все частіше використовуються для мікроприводів у пальцях протезів або в мініатюрних фіксаторах.

Електроактивні полімери (ЕАП) – деформуються при подачі електричного струму. Вони забезпечують м'якість і еластичність, подібну до м'язів, що дає змогу створювати протези, які більш природно виглядають і рухаються. ЕАП мають потенціал для створення «м'яких» роботизованих структур, але потребують високої напруги та спеціального керування.

Недоліки включають обмежений строк служби, труднощі в охолодженні та високу вартість. Сьогодні проводяться активні дослідження щодо їх підвищення енергоефективності та надійності.

На рис. 1 (b) При поданні напруги ЕАП пластини розходяться і захват можна підвести до об'єкта. (c) При знятті напруги ЕАП пластини приймають первісну форму і утримують об'єкт [3].

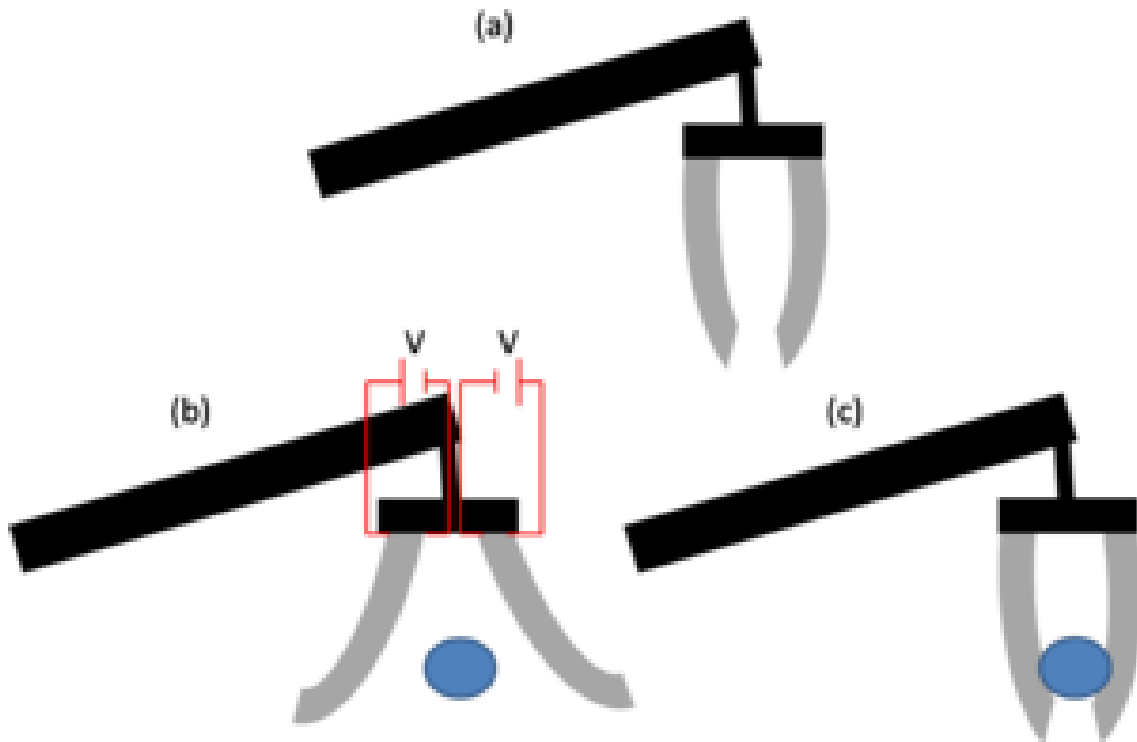


Рис. 1. Принцип роботи ЕАП захвату.

Інноваційні рішення До перспективних рішень належать штучні м'язи на основі вуглецевих нанотрубок, магнітоактивні матеріали, гнучкі текстильні приводи. Ці технології дозволяють створювати надлегкі, адаптивні протези, що можуть підлаштовуватись до анатомії користувача. Наприклад, нові тканинні м'язи здатні витримувати навантаження у 100 разів більше за власну вагу. Більшість із цих технологій поки що перебувають на стадії експериментів, однак мають значний потенціал у майбутньому. У деяких експериментальних моделях використовуються також гідрогелеві приводи, які реагують на

вологість і температуру, і можуть бути інтегровані в шкіроподібні структури [3].

### **Порівняльний аналіз актуаторів**

Для забезпечення ефективної роботи біонічного протеза, актуатор має відповідати низці технічних вимог, таких як достатній крутний момент, компактність, швидкодія та енергоефективність. Кожен тип актуатора має свої переваги та недоліки, які варто враховувати на етапі проектування. У таблиці нижче наведено узагальнений порівняльний аналіз основних типів актуаторів, що використовуються в біонічних протезах, за ключовими експлуатаційними характеристиками.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз основних типів актуаторів, що застосовуються в біонічних протезах

| Тип актуатора | Сила        | Точність      | Швидкість  | Розміри     | Енергоефективність | Надійність     |
|---------------|-------------|---------------|------------|-------------|--------------------|----------------|
| Пневматичний  | Висока      | Середня       | Висока     | Великі      | Середня            | Середня        |
| Гідравлічний  | Дуже висока | Середня       | Середня    | Середні     | Низька             | Висока         |
| Електричний   | Середня     | Висока        | Висока     | Малі        | Висока             | Висока         |
| SMA/EAP       | Середня     | Висока        | Середня    | Малі        | Середня            | Низька         |
| Інноваційні   | Варіюється  | Досліджується | Варіюється | Малі/Гнучкі | Досліджується      | Низька/Середня |

### Системи керування актуаторами

Керування актуаторами є одним із ключових аспектів ефективної роботи біонічних протезів. Системи керування повинні забезпечити точне та адаптивне управління рухами протеза, щоб відновити функціональність втрачених кінцівок, зберігаючи природність та зручність для користувача. Зазначимо основні типи систем керування, які використовуються для керування актуаторами біонічних протезів:

Електроміографія (*EMG*) – це метод вимірювання електричної активності м'язів, який активно використовується для керування біонічними протезами. Сигнали *EMG* зчитуються за допомогою електродів, що розташовуються на шкірі або під нею. Ці сигнали відображають м'язові імпульси, які генеруються при скороченні м'язів залишкової частини кінцівки. Інтерпретуючи ці сигнали, можна отримати команди для активації та управління протезом.

Одно-канальні системи *EMG*: використовують лише один канал для зчитування сигналу, що дозволяє визначати лише загальний рівень активності м'яза.

Багатоканальні системи *EMG*: зазвичай використовуються для більш точного визначення напрямку та сили руху. Вони дозволяють отримувати більш детальну інформацію про м'язову активність, що забезпечує більш точне управління протезом.

Цей підхід має ряд переваг, зокрема високу швидкість реакції та відносно низьку вартість, але також й обмеження, такі

як потенційна не точність при втомленості м'язів.

Електроенцефалографія (*EEG*) – це метод реєстрації електричної активності мозку. Відповідно до цієї технології, за допомогою спеціальних шоломів або імплантатів можна зчитувати сигнали мозкової активності, що використовуються для управління біонічними протезами. Цей підхід дозволяє безпосередньо контролювати протез за допомогою думки, що є великим кроком у розвитку нейроінтерфейсів.

Зараз *EEG*-системи в основному мають низьку точність порівняно з *EMG*, але це перспективний напрямок, оскільки дає змогу розширити можливості керування та забезпечити більше контролю з боку мозку. В основному, *EEG* використовуються в комбінації з іншими методами для покращення точності.

Механічні сенсори, такі як сенсори тиску, положення та натягу, використовуються для забезпечення зворотного зв'язку та точнішого контролю рухів протеза. Наприклад, сенсори тиску на пальцях протеза можуть визначати силу захвату об'єкта і коригувати рухи пальців для забезпечення більш стабільного та природного захоплення.

Механічні сенсори використовуються для забезпечення тактильного зворотного зв'язку, що є важливою частиною реалістичного відчуття при використанні протеза. Вони дозволяють користувачу відчувати об'єкти, з якими він взаємодіє, що підвищує рівень контролю і точності.

На рис.2 можна побачити різницю двох між *EEG* і *EMG* сигналів [4, 5].



Рис. 2. EEG і EMG сигнали

### Алгоритми керування

Для точного управління актуаторами використовуються різноманітні алгоритми, які дозволяють адаптувати рухи протеза до різних умов і потреб користувача. Ось деякі основні типи алгоритмів:

*PID*-регулятори (Пропорційно-Інтегрально-Диференціальні регулятори): Це класичний тип алгоритмів, який активно

застосовується для точного контролю руху. *PID*-регулятори використовують три компоненти: пропорційний, інтегральний і диференціальний. Вони дозволяють точно коригувати положення протеза, компенсуючи різні помилки в системі.

Формула (2) для *PID*-регулятора, що використовуються в системах керуванням біонічними протезами:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2)$$

де,  $e(t)$  – помилка, яка визначається як різниця між бажаним і фактичним значенням,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коефіцієнти регулятора.

*PID*-регулятори використовуються для керування кутовими положеннями, швидкостями або прискореннями протеза [6].

Адаптивне управління: Адаптивні алгоритми змінюють свої параметри в реальному часі, щоб підлаштуватися під змінні умови та стиль руху користувача. Це дозволяє протезу краще реагувати на зміни сили або швидкості, забезпечуючи більш природні рухи.

Машинне навчання та нейронні мережі: З використанням великих даних і алгоритмів машинного навчання можна створити системи, які здатні самостійно вивчати стиль руху користувача. Ці системи можуть оптимізувати керування протезом в залежності від конкретних умов і виконуваних завдань. Нейронні мережі дозволяють розпізнавати складні патерни руху та адаптувати протез до індивідуальних потреб.

Формула (3) для нейронної мережі [7].

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(w^T x + b)}}, \quad (3)$$

де,  $x$  – вектор ознак (наприклад, сигналів *EMG*),  $w$  – ваги,  $b$  – зсув,  $y$  – ймовірність активації руху.

### Інтерфейси «людина-протез»

Інтерфейси між людиною та протезом є критично важливими для забезпечення комфортного використання. Вони повинні забезпечувати високу точність і швидкість реакцій, а також бути простими для користувача.

Інтерфейси можуть бути неінвазивними, як шоломи *EEG* або зовнішні сенсори *EMG*, або інвазивними, де електроди вбудовуються безпосередньо в нервові або м'язові тканини. Наразі найбільш розповсюджені неінвазивні методи, проте з розвитком технологій з'являються нові можливості для більш інтегрованих систем. [8]

### Проблеми та виклики в керуванні актуаторами

Незважаючи на стрімкий розвиток технологій керування біонічними

протезами, наукова й інженерна спільнота продовжує стикатися з низкою суттєвих викликів, які обмежують ефективність та надійність роботи систем. Однією з основних проблем є наявність шумів у біологічних сигналах, зокрема у поверхневій електроміографії (*EMG*) або електроенцефалографії (*EEG*). Ці сигнали є чутливими до артефактів, зовнішніх перешкод і варіацій м'язової активності, що ускладнює точну інтерпретацію намірів користувача і може призводити до хибного або нестабільного керування протезом.

Ще одним важливим викликом є необхідність адаптації системи до індивідуальних особливостей користувача. Стиль руху, залишковий м'язовий тонус, фізіологічні характеристики та навіть психологічні чинники можуть істотно відрізнятися від людини до людини. Це вимагає впровадження складних алгоритмів навчання, часто з використанням методів машинного навчання, які здатні модифікувати поведінку актуаторів у відповідь на зміну входних сигналів і поведінки користувача в режимі реального часу.

Окрім цього, ефективність систем керування часто обмежується питаннями енергоспоживання. У багатьох випадках актуатори та їхні контролери потребують значної кількості енергії, особливо у режимах високої динамічної активності або при постійному обміні даними з датчиками. Це, у свою чергу, зменшує час автономної роботи протеза та підвищує вимоги до джерел живлення, що особливо критично для мобільних систем.

Загалом, успішне подолання зазначених викликів потребує мультидисциплінарного підходу, що поєднує досягнення в галузях біомеханіки, обробки сигналів, штучного інтелекту, енергоменеджменту та нейроінженерії [9].

### **Приклади сучасних біонічних протезів**

*i-Limb Quantum* (*Touch Bionics*) – протез руки з незалежним керуванням кожним пальцем, сенсорним управлінням і кількома режимами хвата (рис. 3).



Рис. 3. *i-Limb Quantum*

*LUKE Arm* (*DEKA*) – протез верхньої кінцівки з багатьма ступенями свободи, що керується через бездротову систему зчитування *EMG* (рис. 4).



Рис. 4. *LUKE Arm*

*Ottobock C-Leg* – протез ноги з мікропроцесорним управлінням, сенсорами навантаження та адаптивною ходьбою.

*Hero Arm* (*Open Bionics*) – доступний біонічний протез для дітей та дорослих з 3D-друкованими компонентами і вбудованим зворотним зв'язком (рис. 5) [10].



Рис. 5. *Hero Arm*

## **Сучасні виклики та перспективи**

Незважаючи на значні досягнення у сфері розробки біонічних протезів, низка критичних проблем і досі залишається актуальною. Одним із ключових бар'єрів на шляху широкого впровадження таких технологій є їхня висока вартість. Високотехнологічні компоненти, складні системи керування, спеціалізоване програмне забезпечення та індивідуальне налаштування створюють значне фінансове навантаження як для виробників, так і для кінцевих користувачів. Це суттєво обмежує доступність біонічних пристроїв для широкого кола пацієнтів.

Ще одним суттєвим викликом є недостатній рівень зворотного зв'язку між користувачем та протезом. Хоча сучасні системи здатні досить точно відтворювати рухи, відсутність сенсорного зворотного сигналу (наприклад, відчуття дотику, тиску або температури) значно ускладнює природну інтеграцію протеза в моторну і сенсорну систему користувача. Це, своєю чергою, впливає на точність і впевненість у виконанні повсякденних дій.

Крім того, актуальним залишається питання обмеженої автономності. Багато біонічних систем мають обмежений час роботи через енергоспоживання, пов'язане як з актуаторами, так і з обчислювальними компонентами. Це ставить додаткові вимоги до розробки більш ефективних елементів живлення та оптимізації споживання енергії на рівні всієї системи.

Окремо варто зазначити, що взаємодія між людиною та протезом усе ще далека від природної. Поточні інтерфейси, хоч і здатні зчитувати наміри користувача, не забезпечують достатньої гнучкості, швидкості та інтуїтивності, які характерні для живих біологічних систем. Це обмежує функціональність протеза і потребує подальшого розвитку біоінтегративних технологій.

У майбутньому прогнозується низка перспективних напрямів розвитку цієї галузі. Активне впровадження штучного інтелекту та машинного навчання дозволить

покращити адаптивність керування та інтерпретацію біосигналів у режимі реального часу. Розвиток нейроінтерфейсів сприятиме тіснішій інтеграції протеза з центральною нервовою системою користувача, наближаючи керування до природного рівня. Паралельно з цим ведуться дослідження у сфері нанотехнологій, зокрема використання наноматеріалів і біоінспірованих структур, які можуть значно покращити функціональні та механічні характеристики протезів.

Ще одним важливим напрямом є зниження вартості виробництва та мініатюризація компонентів, що відкриває шлях до масового виробництва доступних, легких і компактних систем. Окрім того, значну увагу приділено створенню матеріалів із високим ступенем біосумісності, здатних до інтеграції з живими тканинами користувача, що дозволить не лише покращити комфорт і стабільність фіксації протеза, а й відкрити нові можливості для прямого сенсорного зворотного зв'язку [9].

## **Висновки**

Біонічні протези на базі актуаторів стали важливою частиною сучасної медицини та технологій, що дозволяють відновити функціональність втрачених кінцівок і значно покращити якість життя людей, які зазнали ампутацій. Протези, оснащені передовими актуаторами, здатні виконувати складні та точні рухи, максимально наближені до природних функцій живих кінцівок, що досягається завдяки постійному розвитку технологій у галузях механіки, електроніки та біомедичних наук.

Типи актуаторів, використані в біонічних протезах, мають свої переваги та обмеження. Пневматичні та гідравлічні системи відзначаються високою силою та плавністю руху, однак є громіздкими і потребують специфічного обслуговування. Електричні актуатори є найпоширенішими завдяки високій точності, компактності та можливості інтеграції з цифровими системами керування. Водночас, новітні технології, такі як сплави з пам'яттю форми та електроактивні полімери, відкривають нові перспективи для створення протезів,

що володіють гнучкістю, еластичністю та здатністю до адаптації.

Особливу увагу варто приділити системам керування, які є основним елементом для забезпечення точності та адаптивності протезів. Застосування технологій, таких як електроміографія (*EMG*) та електроенцефалографія (*EEG*), дозволяє створювати системи, що забезпечують управління за допомогою сигналів м'язів та мозку користувача. Механічні сенсори, що забезпечують зворотний зв'язок, а також застосування алгоритмів на основі *PID*-регуляторів, адаптивного управління та машинного навчання, значно підвищують точність і гнучкість протезів.

Системи керування біонічними протезами нині зазнають швидкого розвитку завдяки новим досягненням у галузі сенсорних технологій і алгоритмів. Використання машинного навчання та нейронних мереж дозволяє протезам "вчитися" на основі звичок користувача та адаптуватися до змінних умов, що є важливим кроком на шляху до створення інтелектуальних протезів нового покоління.

Однак, попри значний прогрес, існують певні проблеми, що потребують подальшого вирішення. Серед них – висока вартість технологій, обмежена автономність протезів, необхідність покращення зворотного зв'язку між користувачем і протезом, а також вирішення проблем шуму сигналів і адаптації до індивідуальних потреб користувача.

Перспективи розвитку біонічних протезів включають подальшу мініатюризацію компонентів, зниження вартості, удосконалення нейроінтерфейсів, а також інтеграцію штучного інтелекту та біоінспірованих матеріалів, що дозволить створювати протези з високою біосумісністю та адаптивними можливостями. Важливим етапом є досягнення повної інтеграції протезів з нервовою системою людини, що дозволить значно покращити користувацький досвід і забезпечити більш природну взаємодію між людиною та протезом.

У підсумку, біонічні протези є важливим кроком у розвитку технологій

допомоги людям з ампутаціями, але ще потребують удосконалення в аспектах точності, адаптивності та інтеграції з організмом користувача. Проте, з огляду на швидкий прогрес у цій галузі, майбутнє біонічних протезів виглядає надзвичайно перспективним і обіцяє значні зміни в житті людей, що потребують таких технологій.

На відміну від окремих оглядових публікацій, які фокусуються лише на одному типі актуаторів або одному методі керування, дана робота комплексно охоплює як класифікацію актуаторів, так і архітектури систем управління, з урахуванням технічних, біофізичних та експлуатаційних аспектів. Такий підхід дозволяє не лише порівняти ефективність різних технологій, а й сформулювати рекомендації щодо їх доцільного застосування залежно від конкретних вимог до протезів (сила, швидкодія, компактність, адаптація до користувача тощо).

Крім того, у роботі зроблено акцент на проблемах шумів, енергоспоживання та індивідуальної адаптації – аспектах, які часто ігноруються в загальних оглядах. Це дозволяє виявити реальні обмеження при застосуванні тих чи інших рішень і шукати способи їх подолання (наприклад, за рахунок гібридних систем керування або впровадження штучного інтелекту).

Таким чином, запропонований в роботі аналітичний підхід забезпечує ширше бачення проблематики, ніж більшість існуючих робіт, і може бути використаний як методологічна база для вибору оптимальної конфігурації актуаторів і керуючих систем у нових проектах біонічних протезів.

### **Література**

1. Pneumatic Actuators Explained. URL: <https://www.festo.com>.
2. Merritt H. E. Hydraulic Control Systems. Wiley, 2018.
3. Uddin M. N. et al. Smart Actuation and Sensing Systems – Recent Advances. IntechOpen, 2016.
4. Ogata K. Modern Control Engineering. 5<sup>th</sup> ed. Boston : Prentice Hall, 2009. 912 p.

5. LUKE Arm (DEKA Arm). URL: <https://www.mobiusbionics.com>.
6. What is an Actuator? URL: <https://realpars.com/actuator/>.
7. Surgical Robotics: Current Applications. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>.
8. Farina D. et al. The Extraction of Neural Information from the Surface EMG for the Control of Upper-Limb Prostheses. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2014. Vol. 22(4). P. 797–809.
9. Actuator Challenges in Robotics. URL: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2022/09/overcoming-actuator-limitations-in-robotics/19459>.
10. Біонічний протез руки: які вони бувають. URL: <https://protezhub.com/blog/bionichnyy-protez-ruky-yaki-vony-buvayut>.

**Авагян А.В., Пантєєв Р.Л., Яновський Ф.Й.**

## **АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АКТУАТОРІВ І АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ В БІОНІЧНИХ ПРОТЕЗАХ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК**

*У статті розглядаються сучасні типи актуаторів, що застосовуються в біонічних протезах верхніх кінцівок, з акцентом на їхню класифікацію, технічні характеристики, переваги та обмеження. Здійснено порівняльний аналіз пневматичних, гідравлічних, електричних, а також інноваційних електромеханічних актуаторів на основі розумних матеріалів. Особливу увагу приділено системам керування актуаторами: від класичних методів, зокрема PID-регуляторів, до сучасних підходів з використанням нейронних мереж, машинного навчання та адаптивних алгоритмів. Розглянуто інтерфейси «людина-протез» та виклики, пов'язані з шумами в біологічних сигналах і необхідністю індивідуальної адаптації системи керування до користувача. Матеріал має практичне значення для інженерів і дослідників, які займаються розробкою біонічних протезів нового покоління.*

**Ключові слова:** біонічні протези; актуатори; електроміографія (EMG); електроенцефалографія (EEG); PID-регулятор; електроактивні полімери; сплави з пам'яттю форми; машинне навчання; інтерфейс людина-машина; керування протезами.

**Avagyan A.V., Panteev R.L., Yanovsky F.Y.**

## **ANALYTICAL REVIEW OF ACTUATORS AND ADAPTIVE CONTROL IN BIONIC UPPER LIMB PROSTHESES**

*The article considers modern types of actuators used in bionic upper limb prostheses, with an emphasis on their classification, technical characteristics, advantages and limitations. A comparative analysis of pneumatic, hydraulic, electric, as well as innovative electromechanical actuators based on smart materials is carried out. Special attention is paid to actuator control systems: from classical methods, in particular PID controllers, to modern approaches using neural networks, machine learning and adaptive algorithms. The human-prosthesis interfaces and the challenges associated with noise in biological signals and the need for individual adaptation of the control system to the user are considered. The material is of practical importance for engineers and researchers involved in the development of a new generation bionic prostheses.*

**Keywords:** bionic prostheses; actuators; electromyography (EMG); electroencephalography (EEG); PID controller; electroactive polymers; shape memory alloys; machine learning; human-machine interface; prosthesis control.