

## Особливості біонічних протезів верхніх кінцівок

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ)

**Постановка наукової проблеми та її значення.** Серед засобів для відновлення стану опорно-рухового апарату (ОРА) людини важливе місце займають механічні, роботизовані системи та екзоскелети, які допомагають людям з обмеженими фізичними можливостями переміщати свої кінцівки та тіло [1–3]. Незважаючи на існування технічних систем і засобів для реабілітації після пошкоджень та захворювань верхніх кінцівок, ще мало застосовуються новітні сучасні біонічні протези різних типів, що забезпечують можливість виконання різноманітних дій людиною, яка втратила через різні причини верхні кінцівки.

Постає проблема аналізу принципів створення, дії, конструктивних та функціональних особливостей сучасних і перспективних біонічних протезів верхніх кінцівок [4–30].

Роботу виконано відповідно до плану НДР «Розробка технологій забезпечення психолого-фізичної реабілітації і оздоровлення людини» (№ держ. реєстрації – 0111U003539) кафедри біобезпеки і здоров'я людини НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського».

**Аналіз дослідження цієї проблеми.** Надання допомоги людям після втрати верхніх кінцівок, забезпечення можливості виконувати різноманітні побутові дії – актуальна соціальна проблема. Для цього застосовують механічні та роботехнічні засоби (роботи для суглобів верхніх кінцівок [1, с. 43], екзоскелети [2, с. 24], роботизовані костюми-екзоскелети [3, с. 134] й ін.).

**Формулювання мети й завдання дослідження.** Мета статті – аналіз принципів створення, конструктивних і функціональних особливостей сучасних та перспективних біонічних протезів верхніх кінцівок.

**Завдання дослідження** – розглянути принципи створення та дії, конструктивні й функціональні особливості сучасних і перспективних біонічних протезів верхніх кінцівок для допомоги людям, які втратили кінцівки.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. Термін «біонічний» походить від назви «біоніка» – прикладний напрям науки про застосування в технічних пристроях і системах принципів організації, властивостей, функцій і структур живої природи, тобто форми живого в природі, та їх промислові аналоги [4]. Біоніка тісно пов'язана з біологією, фізикою, хімією, кібернетикою, електронікою, зв'язком тощо. Біонічні протези та імпланти – один із напрямів, за якими ведуться дослідження, пов'язані з біонікою, але один із найважливіших. Основна особливість біонічних протезів – їх здатність брати на себе функції втрачених органів і кінцівок [4, 5].

**Біонічні протези верхніх кінцівок – біонічна кисть.** Протезування – це заміна втрачених або незворотно пошкоджених частин тіла штучними замінниками – протезами. Залежно від рівня ампутації виділяють *протези пальців, кисті, передпліччя, плеча*, а також протези при виокремленні руки в *лучезап'ястному суглобі* [4, 5, 7]. Усі протези рук розділяють на дві основні групи – *косметичні* (пасивні) й *функціональні* (активні). Протези кистей призначені для пацієнтів із куксами верхніх кінцівок на рівні кисті після виконання одно- або двосторонньої ампутації. Бувають такі протези, згідно [4, 11, 16], косметичними та робочими (функціональними). В останні роки велику увагу приділяють створенню функціональних протезів руки й досягають значного прогресу.

**Функціонування біонічних протезів.** До недавнього часу протези кріпилися до тіла людини механічно та не мали зв'язку з нервовою системою (НС). Вони могли згинатись у своїх залізних шарнірах-суглобах, але для виконання кожного руху їхньому власнику потрібно було певним чином регулювати поведінку протеза, вручну забезпечуючи зворотний зв'язок. Так людина сигналізувала своїй руці, що потрібно акуратно взяти якийсь предмет або, навпаки, міцно затиснути в руці інструмент. Щоб навчити людину керувати новою кінцівкою таким чином, потрібний довгий час. Набір команд також був досить обмеженим, тому дрібну моторику варто зробити кращою.

Учені змогли здійснити неймовірне – приєднати механічну руку до НС людини. Коли людині без руки хочеться поворухнути пальцем, мозок генерує відповідний сигнал, який іде по нервах, що ведуть до м'язів кінцівки. Але, оскільки рука відсутня, то сигнал спрямований «у порожнечу». Проте якщо десь на шляху ці нервові імпульси «перехопити», то після аналізу та обробки даних можна сформулювати команди управління роботизованою рукою – саме цим шляхом ідуть численні наукові групи, прагнучи розробити протези, які зчитують нервові сигнали та перетворюють їх у відповідні рухи [11, 14, 16, 20, 25, 28].

У Х'юстонському університеті та Університеті Райса (США) проводили експерименти зі зняттям моторних сигналів НС методом електроенцефалографії (ЕЕГ) за допомогою електродів, установлених на шкірі голови. Складність полягає в тому, що ЕЕГ – це набір великої кількості різних сигналів і

завдання полягає в тому, щоб виділити серед них ті, що керують рухом кінцівки [28]. Дослідники Технічного університету Чалмерса в Гетеборзі (Швеція) спільно з колегами з консорціуму NEBIAS (проект європейських університетів) пішли іншим шляхом [4, 5]: замість того, щоб мати електроди на поверхні шкіри, де на корисний сигнал впливають різноманітні перешкоди, учені спробували зменшити їх вплив, ушиваючи електроди під шкіру. Але фізіологія людини індивідуальна й не можна заздалегідь сказати, де саме потрібно розміщувати електроди для отримання максимального співвідношення «сигнал-шум».

Нині найбільш перспективним методом управління біонічними протезами вважається зчитування електричних потенціалів із м'язів кукси – електроміографія (ЕМГ). Такі протези виробляють серійно, проте навчити пацієнта правильно управляти біонічним протезом – це складна проблема. Протезування починалося з чисто косметичних протезів, призначених суто для відтворення природного зовнішнього вигляду втрачених кінцівок, проте досягнення сучасних технологій дали змогу розробити протези, що керуються різноманітними методами [6, 28].

*Тягове управління* використовує механічні тяги для передачі руху протеза. *ЕМГ-управління* засноване на зчитуванні біоелектричних потенціалів, що виникають при скороченні м'язів на вцілілій частині руки. *ЕЕГ-управління* використовує зчитування електричних потенціалів із мозку за допомогою ЕЕГ. Сигнали з датчиків, розміщених на поверхні шкіри голови, декодуються комп'ютером і перетворюються в команди, які керують біонічним протезом.

*Управління за допомогою електронних імплантатів* – електродів, імплантованих у кору головного мозку, за допомогою яких здійснюється реєстрація активності коркових нейронів. Фахівці Galvani, Bionix [14, 28] використовують для зчитування електричних потенціалів із м'язів не одну пару електродів, а велику їх кількість, що дає змогу підвищити рівень корисного сигналу й реалізувати алгоритми «самонавчання». Кожна комбінація сигналів, що прийшла з різних електродів, відповідає певній дії рукою, а завдання полягає в тому, щоб скласти базу відповідей, до якої звертатиметься система при отриманні нового набору імпульсів.

Програмне забезпечення (ПЗ) вчиться правильно розпізнавати команди мозку, підлаштовуючись під конкретну людину. Уже вдалося продемонструвати працездатність прототипу системи [14, 27, 28]: людина з ампутованою кінцівкою за допомогою м'язових сигналів здатна переміщати курсор по екрану. Надалі планується використовувати алгоритми машинного навчання для аналізу частоти реєстрації різних комбінацій сигналів і за допомогою цих даних поліпшити процес розпізнавання команд мозку. Чим більше електродів використовується, тим більша вибірка сигналів отримується для подальшого їх аналізу. Таким чином ускладнюється робота комп'ютера, оскільки процесору складніше аналізувати безліч сигналів, але значно спрощується життя пацієнта. Створення штучних рук, які здатні замінити людям їхні природні, – завдання надзвичайної складності, оскільки цей «пристрій» дуже делікатний і здатний виконувати певну кількість найтонших рухів. Це вже не кажучи про те, що на кінчиках пальців у людини розташовуються головні дотикові органи, імітувати які дуже складно. Не дивно, що дотепер жодного 100 % успішного проекту зі створення біонічної верхньої кінцівки (руки) поки що не існує, але є цікаві біонічні рішення. Цікаво те, як працюють *біонічні кінцівки* – найпрогресивніший нині вид протезів, або електронні (мікропроцесорні) прилади, що виготовляються зі штучних матеріалів, але людина може управляти ними за допомогою власної НС за рахунок так званої цільової м'язової реіннервації (targeted muscle reinnervation) в поєднанні з ЕМГ [4–10].

**Принцип функціонування.** Після ампутації кінцівки в організмі залишаються рухові нерви, які її контролювали. Ці залишки нервів можна хірургічним способом з'єднати з маленькою ділянкою якогось великого м'яза (це і є реіннервація) – наприклад, до великого грудного м'яза, якщо йдеться про ампутовану руку [6, с. 28].

У результаті людина думає, що потрібно поворушити пальцем, мозок відправляє сигнал частині грудного м'яза, до якої приєднали нерв, що йшов раніше до пальців, він фіксується електродами, які надсилають його по проводах у процесор усередині роботичної руки, і тут потрібна ЕМГ. Ця технологія дає змогу реєструвати різницю електричних потенціалів, які виникають під час роботи м'яза. Вона вловлює рух реіннервованої частини грудного м'яза, після чого сигнал передається до потрібної частини протеза, і ця частина здійснює відповідні рухи (рис. 1).

Аналогічно чином відбувається цільова *сенсорна реіннервація*. Вона потрібна для того, щоб за допомогою протеза людина могла відчувати дотик, тепло або тиск. У цьому випадку все здійснюється у зворотному порядку. Хірург перешиває чутливий нерв, що залишився, на цей раз до ділянки шкіри на грудях, а сенсори на протезі передають сигнал від дотику до тієї самої кожної ділянки [6, с. 28].

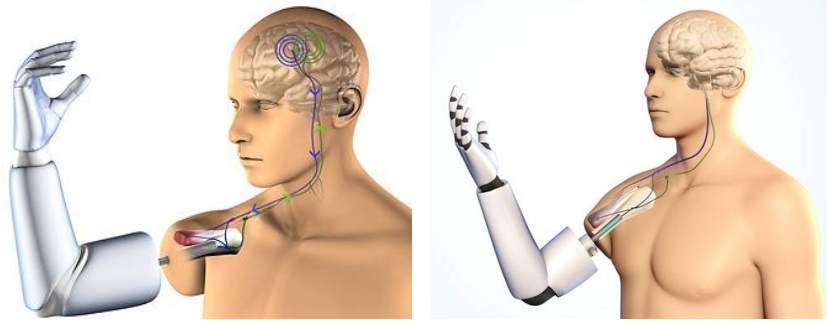


Рис. 1. Схема цільової м'язової реіннервації

**i-Limb** [19, 22, 28] – це проект активних протезів компанії «Touch Bionics» (Великобританія). Вони є міоелектричними пристроями, що «зчитують» біоелектричні потенціали, які виникають при скороченні м'язів уцілілої частини руки. **Модель i-Limb Pulse** (рис. 2) дає змогу виконувати штучною рукою величезну кількість завдань, аж до зав'язування шнурків або застігання ременя. Протез можна налаштовувати спеціально під свій організм і вид діяльності – для цього створене спеціальне ПЗ, із яким пристрій з'єднується за допомогою bluetooth.



Рис. 2. Модель біонічної руки i-Limb Pulse

**Модель i-Limb Pro** переважно розрахована на ветеранів бойових дій, які втратили в бою кінцівки. У цьому випадку про з'єднання протеза з нервами не йдеться. Можна навчитися ним користуватися, але не можна навчити сам протез робити щось, що не прописано в його програмі. **Модель i-Limb Ultra** (рис. 3. 1) дає змогу рухати пальцями окремо, у керуюче ПЗ уписано низку стандартних жестів і захватів, а силу стискання можна регулювати, що допомагає в деяких ситуаціях. Після малого періоду відсутності активності пристрій повертається у вихідний «природний» стан. Існують моделі **i-Limb: Hand, Quantum, Revolution** (рис. 3. 2, 3, 4).



Рис. 3. Моделі біонічних протезів серії i-Limb

Біонічні протези серії i-Limb по-різному реагують на скорочення м'язів, здійснюючи різні рухи. За допомогою цього протеза можна брати й утримувати різні предмети. Хоча протез і не контролюється повністю імпульсами НС, як шведський протез Chalmers [28], але виглядає теж переконливо.

Цим протезом кисті можна керувати за допомогою звичайного iPhone-додатка. Якщо потрібно зайняти руку чимось корисним, носій дістає смартфон, запускає додаток i-Limb та вибирає один із 24 шаблонів позиціонування або руху кисті. Наприклад, можна задати шаблон для роботи на клавіатурі, тримання телефону, ручки, управління мишкою комп'ютера, носіння сумки. У протезі не тільки згинаються пальці, але й можливе його обертання відносно лінії руки. У деяких випадках штучною рукою можна керувати й «силою думки», оскільки при її установці електроди приєднуються до нервових волокон.

**Міоелектрична біонічна рука Vebionic 3** [8] фірми RSL Steeper (Великобританія) аналогічна біонічному протезу i-Limb. Вона забезпечує 14 різних захватів і положень руки, можливість виконувати різні дії, використовувати комп'ютерну мишу й натискати на курок квіткового обприскувача (рис. 4).



Рис. 4. Міоелектрична біонічна рука Vebionic 3

Рука-протез Vebionic створена для здійснення ампутованими кінцівками повсякденних справ, що включають можливість їсти, випити води, написати текст, друк на клавіатурі комп'ютера, поворот ключа в замку й підняття маленьких легких предметів тощо. Налагоджено її серійний випуск.

**Біонічний протез руки Vebionic із використанням технологій формули-1** (рис. 5) першою у світі отримала 29-річна англійка Нікі Ешвелл [15], яка народилася без кисті правої руки й змушена була носити протез, який виконував лише косметичну функцію. Під час свого життя вона навчилася все робити однією рукою, але, завдяки біонічній руці-протезу, може вселяти нитку в голку, кататися на велосипеді й носити предмети вагою до 45 кг. Протез легкий (390 г) і міцний, оскільки зроблений із композитних матеріалів, що використовуються у формулі-1. Біонічний протез руки точно повторює моторику здорової руки людини й оснащений 14 сенсорами захвату для отримання максимально природних рухів. Шарнірний механізм управляється мініатюрними електромоторами, а на кінчиках пальців є спеціальні повітряні подушечки, для того, щоб акуратно брати дрібні предмети.



Рис. 5. Біонічний протез руки Vebionic технології формули-1

**Кисть-протез Vebionic** [18] призначена для протезування пацієнтів із різними рівнями ампутації рук, а також у випадках вродженого недорозвинення верхніх кінцівок. Механізм протеза кисті поєднує в собі електронну начинку й власні нервові імпульси пацієнта (рис. 6).

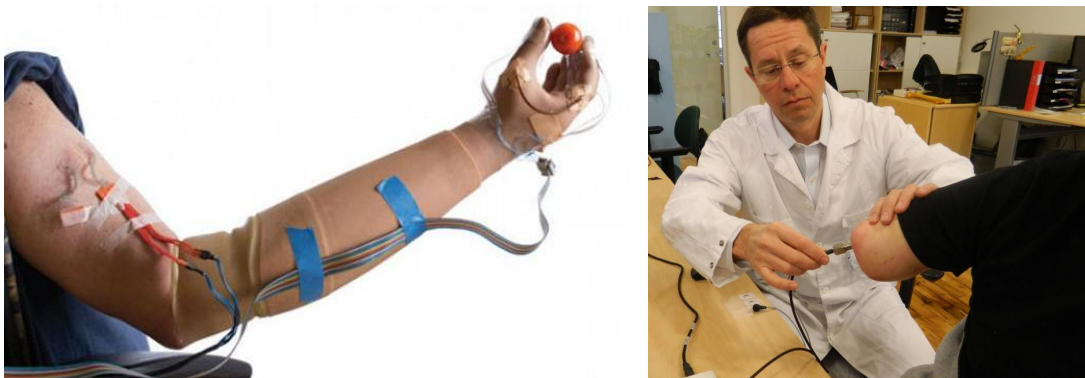




**Рис. 6.** Кисть-протез *Bebionic*

Мозок людини посилає імпульс на м'язи, де встановлено датчик, який зчитує інформацію й передає у мікропроцесор, що міститься в кисті, і там уже здійснюється виконання програм. Існує 14 програм, дев'ять із них закладаються відразу під час виготовлення протеза, інші – індивідуально під конкретну людину. Оновлена біонічна рука другого покоління з'явилась у вересні 2011 р. Поліпшилися швидкість, акуратність, захвату та міцність. Ця версія біонічної руки доступна у двох варіантах (середня й велика). Пристрій має нову внутрішню батареєю високої ємності (2200 mAh) для тривалого використання.

Фахівці Технічного університету Чалмерса (Швеція) у кінці 2014 р. створили протез, керований частково тим самим міоелектричним методом, а частково – НС [6, 7]: імплантовані електроди сприймають біоелектричні сигнали, що надходять по нервах із мозку, а вбудований у протез мікрокомп'ютер декодує їх у команди для керуючих моторів. Протез дає змогу рухати всіма пальцями відразу й кожним окремо. Він легко знімається та одягається, кріпиться до титанового імпланта, що жорстко вбудований у кістку (рис. 7). У руку імплантовано електроди, що передають сигнали від мозку до біонічної руки й назад – від сенсорів протеза до мозку. Рівень інтуїтивності управління протезом значно вищий за інші активні протези. Єдиний на сьогодні носій цього протеза використовує його з початку 2014 р.



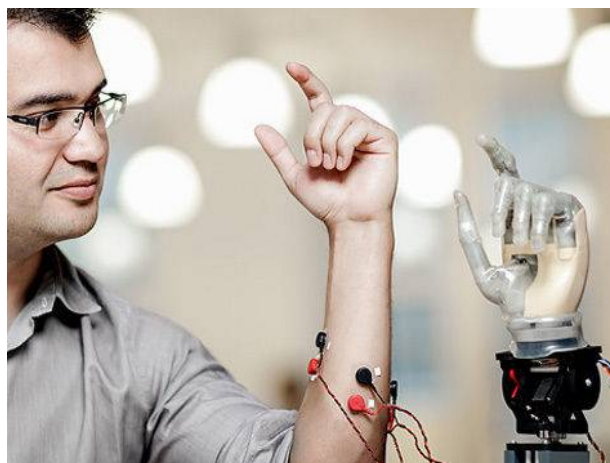
**Рис. 7.** Протез, керований міоелектричним методом і НС

Фахівці Технічного університету Чалмерса (Швеція) представили першу у світі імплантовану роботизовану руку, яку можна контролювати силою думки [6, 28], вони створили перший в історії протез руки, що безпосередньо керується мозком людини (рис. 8). Стандартні системи використовують електроди, які розміщуються на шкірі. Вони вловлюють електричні сигнали, що переводяться в рух протеза. Але процесу передачі сигналу можуть заважати перешкоди – чинники на зразок руху шкірного покриву й поту. Позбутися цих ефектів дала змогу імплантація електродів ближче до нервів і м'язів.

Крім того, щоб зрозуміти, яка сила стискання застосовується при стандартній системі, потрібно дивитися чи слухати роботу моторчиків у протезі. Із новою технологією зворотний зв'язок здійснюється безпосередньо за допомогою стимуляції нервових шляхів у мозку людини. Така технологія називається *остеоінтеграцією*. Якщо раніше людям з ампутуваними кінцівками слід було дивитися на штучну руку, як вона рухається та які зусилля потрібно докласти, то в новому протезі електроди посилають мозку «свою» інформацію, забезпечуючи більшу зручність в управлінні.

Розробники підкреслюють, що така «інтегрована реабілітація» допоможе людям упоратися з посттравматичними відчуттями й переживаннями. Особливо важливо це для молодих людей і фізично активних пацієнтів, які хочуть рухатися так, як вони це робили до операції. Найдосконаліші

нині штучні руки, які керуються виключно нервовими сигналами [6, 28], дослідники зробили можливим відчувати сигнали від 20 сенсорних датчиків, що передають дані про силу впливу на біонічну руку.



**Рис. 8.** Перша у світі шведська імплантована роботизована рука

Уся інформація про те, із якою чутливістю торкаються штучної руки, передається в м'язи передпліччя людини. Дані датчиків пов'язані з чутливими нервовими закінченнями передпліччя пацієнта, створюючи власний інтерфейс між органічними тканинами й штучною рукою.

*Імплантований електрод*, відомий як манжетний мікроелектродний масив (манжетний електрод), є основним компонентом біонічної руки [6]. Він являє собою гнучку пластину з електродами на поверхні, а основна його функція спрямована на електричну стимуляцію м'язів і прийом сигналів від нервових волокон. При цьому небажані впливи на нервові закінчення біонічної руки зводяться до мінімуму. Нові подібні електроди тепер можуть взаємодіяти з групами аксонів (частина нейрона) без проникнення в їхні захисні оболонки.

Процес адаптації електрода не був надскладним. Справжня проблема полягала в підтримці стимуляції різних видів аксонів тривалий час. У передпліччі існує три основні типи нервових закінчень: середній, радіальний і ліктьовий, які з'єднують разом моторні та чутливі нейрони в різноманітні пучки. На сьогодні застосовують один манжетний електрод для одного нерва, щоб установити обмін даними між ним і 20 сенсорними датчиками. При використанні групи електродів з одним і тим самим нервом можливо орієнтуватися на численні нейронні зв'язки. Сигнали, які передає біонічний протез нервовим закінченням, максимально схожі на тактильні відчуття справжньої руки. Медичний журнал «Lancet» (США) у грудні 2013 р. подав матеріал про розробку нейробіолога Ендрю Швартца з Університету Піттсбурга [6], у якому описано, як 53-річний хворий, паралізований від шиї й нижче через важке нейродегенеративне захворювання, імплантовано в мозок крихітні електроди, за допомогою яких вона змогла управляти повністю штучною рукою – протезом, керованим мозком, оскільки система «декодує рухові наміри пацієнта».

**Біонічний протез зі зворотним зв'язком.** Біонічна рука, яка не тільки управляється силою думки, а й уміє відчувати, стала реальністю. Запланована перша операція з біонічною рукою останнього покоління, і досі невідомий пацієнт із Риму, якому імплантують новітню штучну кінцівку [10]. Раніше відносини між біонічною рукою й людиною були односторонніми: реципієнт міг послати сигнал, здатний викликати рух руки, але зворотний зв'язок був відсутнім. Учені Федеральної політехнічної школи Лозанни (Швейцарія) створили перший у світі протез, який поверне людині дотик [10]. Кінцівка за допомогою електродів безпосередньо підключається до двох головних нервів руки – серединного та ліктьового (рис. 9). Доктор Сільвестро Місера з Лозанни давно у 2009 р. показав світу протез, який «відчував» уколи в долоню. Ця модель була тимчасово встановлена пацієнтові, котрий позбувся руки.

Він міг керувати пальцями своєї біонічної руки, стиснути їх у кулак або взяти предмет, а також, за його словами, відчував уколи в долоню протеза.



**Рис. 9.** Біонічний протез зі зворотним зв'язком

Рання версія мала тільки дві сенсорні зони, у той час як новий прототип передаватиме тактильні сигнали від долоні, зап'ястя й кожного з кінчиків пальців. Зараз основне завдання вчених – зробити так, щоб протез міг успішно передавати тактильну інформацію від двох і більше сенсорів. Так, тримаючи трьома пальцями невеликий предмет, пацієнт повинен отримувати відгук від кожного з них, а рухаючи зап'ястям, відчувати його рух.

За допомогою комп'ютерних алгоритмів удалося перетворити електронні сигнали в зрозумілі для нервів імпульси. Після операції з імплантації цього протеза пацієнта і вчених чекає місяць адаптації, за підсумками якої буде видно, наскільки добре в дійсності працює концепція. У процесі операції, що проводилася в Римі, пацієнтові імплантували в нерви руки чотири електроди, які були підключені до сенсорів на пальцях штучної руки [10].

Після операції пацієнт Денніс Аабо Соренсен провів місяць під наглядом лікарів. «Коли я взяв щось у руку, я відчув предмет, і мені не потрібно було на нього дивитися. Я зміг використовувати руку в повній темряві. Рука дуже зручна, і просто неймовірно відчувати – м'який предмет або твердий, круглий або кубічний», – описує пацієнт свої відчуття [10, 21]. Біонічна рука поки що є дослідним зразком і через необхідність дотримання заходів безпеки, що поширюються на клінічні дослідження, сенсори з пацієнта довелося зняти.

Згідно з Паоло Россіні з Університетської клініки Агостіно Джемеллі в Римі [14], до безпосередньої установки біонічної руки людині проведено велику кількість експериментів, щоб точно знати, як установлювати електроди до малих за розміром периферичних нервів верхньої частини руки. Тепер учасники цього проекту сподіваються позбутися зовнішніх проводів, повністю вжививши все обладнання. Для цього потрібно створити мініатюрні імплантовані електроди. Невирішеним є питання щодо того, чи зможе реципієнт носити такий протез постійно або ж його доведеться іноді знімати, даючи відпочинок. Інша проблема – система проводів (рис. 10), яку слід зробити менш помітною, можливо, приховавши під шкірою користувача. Якщо все пройде благополучно, учені обіцяють представити остаточну модель новітньої чутливої біонічної руки протягом двох років [14]. На думку вчених, міне щонайменше 10 років, перш ніж біонічні руки будуть широко застосовуватися [4, 7, 9].



**Рис. 10.** Денніс Аабо Соренсен із новітнім біонічним протезом

Біонічні руки – це роботизовані протези рук. Людина за допомогою таких кінцівок може управляти ними майже як справжніми руками за допомогою скорочення м'язів. Подібні руки виготовляються зі штучних матеріалів, але в протези вставлено електроди, на які подаються імпульси від м'язів, що



скорочуються. Сигнал фіксується й обробляється процесором біонічної руки, після обробки вона робить потрібну дію.

Біонічні протези для рук постійно вдосконалюються. А в дітей і підлітків, які через обставини втратили кінцівки, з'явилася можливість знайти біонічну руку, схожу на руку популярного супергероя. Стартап Біоніка за підтримки компанії «Disney» пропонують дітям адаптацію до протезів через гру в супергероїв [11]. Ця компанія виробляє оригінальні роботизовані протези, роздруковані на 3D-принтері (рис. 11).



**Рис. 11.** Роботизований протез руки компанії «Біоніка» для хлопчиків

Виробники подібних біонічних рук вважають, що дитині буде набагато легше адаптуватися з таким протезом у реальному житті. Головна мета компанії «Біоніка» зробити біонічні руки доступними, щоб полегшити життя якомога більшій кількості дітей, які потребують протезів рук.

**Біонічна рука-протез Handiii** [7] компанії «Ехііі» (Японія) створена за допомогою 3D-принтера. І хоча повністю надрукувати на 3D-принтері її поки що неможливо, оскільки вона використовує електронні датчики, таким способом уже можна отримати основний корпус. Датчики зчитують електричні сигнали з решти руки людини та інтерпретують їх за допомогою смартфона. Біонічній руці не потрібний власний пристрій для обробки інформації. Замість цього, використовується смартфон (рис. 12).



**Рис. 12.** Біонічний протез руки Handiii японської компанії «Ехііі»

Цей біонічний протез дає змогу повертати руку, рухати пальцями й утримувати в долоні предмети. Можливість друку основної частини біонічної руки на 3D-принтері допомагає легко отримувати запасні деталі при поломці частин руки та міняти дизайн біонічної руки.

Біонічні протези стають усе більш уражаючими. У медичному центрі Університету Джона Хопкінса (США) у 2014 р. створили протез обох рук і знайшли для його випробування людину з двома ампутуваними руками [14]. Для керування штучними руками не використовується який-небудь шолом, який зчитує сигнали мозку. Усі сигнали керування зчитуються з грудних м'язів, а щоб це було можливим, цій людині попередньо зробили операцію з іннервації м'язів грудей, щоб за допомогою їх скорочень можна було управляти, наприклад, пальцями штучної руки. Завдяки досягненням у галузі нейрохірургії та робототехніки житель штату Колорадо Лес Боу став першою у світі людиною з ампутуваними на рівні плечей руками, яка отримала можливість керувати своїми двома роботизованими верхніми кінцівками «силою думки». Самі протези рук і технології, що лежать у їх основі, розроблені в Університеті Джонса Хопкінса (рис. 13).

За інформацією Альберта Чи, хірурга-травматолога, команда фахівців використовувала спеціальні алгоритми розпізнавання черговості нервових імпульсів для відстеження окремих м'язів, що скорочуються, аналізували їх взаємодію, амплітуду й частоту скорочення. Згодом уся зібрана інформація перетворювалася в реальні рухи, що здійснюються протезом [14].

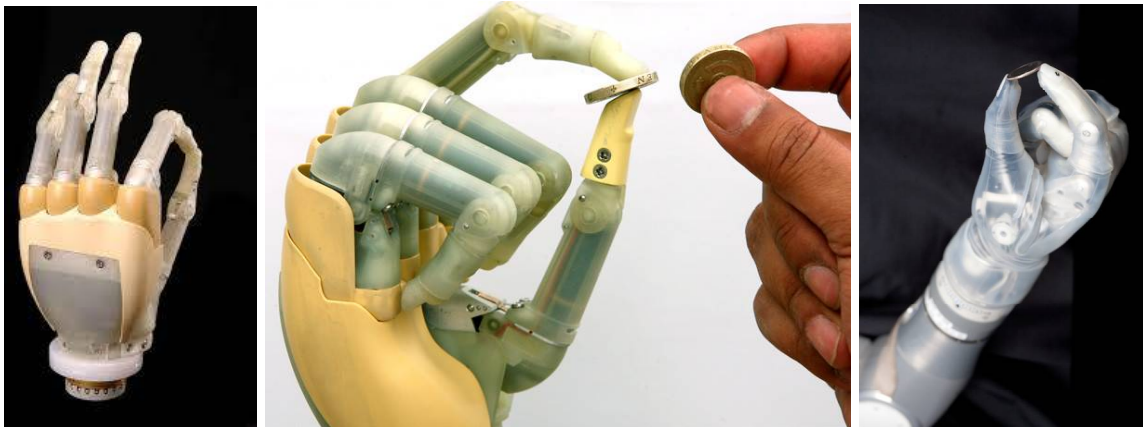




**Рис. 13.** Лес Боу з двома роботизованими верхніми кінцівками

Пацієнт Лес Боу втратив обидві руки 40 років тому внаслідок серйозної травми електричним струмом. Після складної хірургічної операції він проходив реабілітацію й опановував техніку керування протезами за допомогою спеціального комп'ютерного симулятора. Зараз він може виконувати захват і переміщення певних предметів. учені сподіваються, що в майбутньому він зможе здійснювати більш складні маніпуляції з різними предметами та отримає контроль над роботизованими кистями й пальцями [14].

**Силіконовий біонічний протез кисті** (компанія «Touch Bionics», Шотландія) розроблений так, щоб виглядати реалістичним, із рукавичками із силікону високого ступеня деталізації [18]. Досвідчені фахівці можуть додати унікальні функції, такі як вени і татуювання на силіконовій рукавичці протеза (рис. 14). Кілька компаній пропонують біонічні протези руки, проте дотепер залишалася неохопленою найчисленніша категорія людей, які отримали травми кисті, – ті, хто зберіг руку, але позбувся одного або декількох пальців.



**Рис. 14.** Моделі біонічних силіконових протезів кисті

Унікальний біонічний протез «рука Мікеланджело» нового покоління, створений у Німеччині [29], установили пацієнту у Великобританії (рис. 15). Британець Крістофер Тейлор став першим, кому пощастило випробувати унікальну «біонічну руку», що зробила революцію у сфері протезування.



**Рис. 15.** Унікальний біонічний протез «рука Мікеланджело»

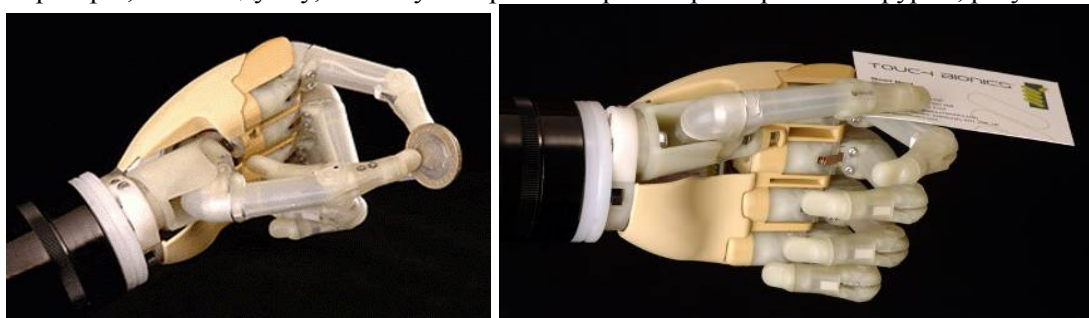
Цей біонічний протез значно полегшує повсякденне життя й дає змогу його власникам повернутися до виконання службових обов'язків. Раніше пацієнтам у Великобританії вже встановлювали біонічні протези, але вони незрівнянні з набагато складнішою «рукою Мікеланджело», яка сприймає сигнали нейронів мозку. Протез виготовлений із різних металів, сплавів і пластику, а пальці повторюють будову людської кисті й рухаються, як справжні.

**Біонічні пальці** (ProDigits) рухаються під управлінням міоелектричних датчиків, які отримують електричні сигнали від м'язів руки [17]. Протез використовує один із двох способів управління: міоелектричні датчики, що реєструють сигнали від м'язів, які керували втраченим пальцем (що залишилися в передпліччі й долоні), або чутливий до тиску своєрідний touch-pad, що спирається на зап'ястя. Пристрій завжди знає, коли пальці охоплюють якийсь об'єкт, і поводить ся так, як того вимагає ситуація (рис. 16).



**Рис. 16.** Моделі біонічних протезів пальців

Учені Швейцарського федерального інституту технологій у Лозанні створили біонічні пальці, які можуть розрізняти текстуру предметів і дозволяють людям, позбавленим рук, відчувати на дотик нерівність об'єктів [17]. Пристрій пройшов тести як на людях з ампутованими кінцівками, так і на звичайних. За словами одного з тих, хто випробував «пальці» на собі і якому ампутували кисть, у 96 % тестів він розрізняв гладку й ребристу поверхні матеріалів (рис. 17). Експерименти за участю здорових людей проводилися за допомогою шапочки для ЕЕГ, яка вловлює імпульси мозку. Учені реєстрували мозкову активність при торканні предметів справжніми пальцями та біонічними. Отже, дослідники змогли довести, що при використанні їхнього винаходу мозок реагує так само, як і у звичайних умовах. Пристрій, на їхню думку, може бути корисним при створенні роботів-хірургів, рятувальників.



**Рис. 17.** Швейцарські біонічні протези пальців

Наповнені гелем пальці здатні забезпечити протезним рукам велику чутливість, навіть дозволяючи їм «інстинктивно» реагувати на предмети, що вислизують із їх захватів. Руки людини автоматично оцінюють мінімальну кількість сили для утримання об'єкта, за допомогою вбудованого рефлексу, який реагує на крихітні вібрації в шкірі, коли об'єкт починає вислизати з пальців. Існуючі штучні руки не мають такого рефлекторного механізму, тому той, хто їх використовує, повинен самостійно оцінювати необхідну силу, що дуже складно. Наконечник складається з гумової шкіри, наповненої силіконовим гелем. Коли об'єкт починає вислизати, коливання в еластичній шкірі пальців передаються через гель до акустичних сенсорів, прикріплених до центральної акрилової «кістки». Це забезпечує миттєву віддачу, керуючи моторами в руці, щоб міцніше стискатися до тих пір, поки припиняться вібрації [17, 28].

Кістки пальців так само покриті крихітними електродами, по яких проходить невелика напруга. Деформації в еластичній шкірі, що викликані утриманням об'єкта, змінюють розподіл гелю в кінчиках пальців, змінюючи кількість електрики, яка проводиться між електродами. Ця інформація

може передаватися манометру, закріпленому на ділянці здорової шкіри оператора руки, допомагаючи їм «відчувати» те, до чого доторкається їхня протезна рука.

**Високотехнологічні біонічні протези пальців ProDigits** компанії «Touch Bionics» надійшли в продаж у Великобританії [17]. Протез придатний для людей із будь-якою кількістю відсутніх пальців (рис. 18). Біонічні пальці протеза здатні здійснювати тонкі, точні та різноманітні рухи, максимально відтворюють функції пальців руки людини: можна піднімати предмети, користуватись авторучкою, ножицями, телефоном, друкувати на клавіатурі, керувати комп'ютерною мишкою. Розмір і форма кожного протеза ProDigits підбирається індивідуально для кожного пацієнта залежно від розміру й форми пошкодженої кінцівки. Покриття штучної руки виконується за бажанням особи: це може бути високотехнологічна прозора або природного кольору шкіра. Управління протезом здійснюється за допомогою міоелектричних датчиків, які реєструють сигнали м'язів у пальцях, що залишилися, або долоні.



**Рис. 18.** Високотехнологічні біонічні протези пальців ProDigits

Пропонується й альтернативний варіант: контролювати пристрій можна натисканням на сенсорну панель (пульт керування), розміщену на вцілілому пальці або тканинах, які оточують п'ясткові кістки. Якщо такої можливості немає, команди можуть сприйматися сенсорами, що зчитують електричну активність м'язів долоні або передпліччя. Спеціальна функція дає змогу вказувати користувачу на об'єкти одним пальцем і робити жести [17].

**Міоелектричний протез руки SensorHand Speed** [23] німецької компанії «Otto Bock System Electric Hand» має високу швидкість розкриття та закриття (300 мм/с), поліпшену обробку сигналу ЕМГ, незрівнянну продуктивність. Нова функція AutoGrasp дає змогу захистити об'єкт від вислизання за допомогою розпізнавання моменту, коли він починає ковзати, з автоматичним збільшенням сили стискання на необхідну величину (рис. 19). Цей протез також сприяє використанню пацієнтом 1–2 вхідних пристроїв та обранню з великого переліку налаштувань управління.

Основна відмінність від решти серії міоелектричних протезів полягає в наявності сенсора великого пальця, який визначає зміну навантаження в процесі стискання предмета і сам зупиняє кисть, коли вважає, що предмет захоплений. У такому випадку пацієнту не потрібно контролювати цілісність тендітних предметів і т. ін. Якщо предмет починає вислизати із захвату, сенсор визначає наявність слабшання зворотного зв'язку й «дотискає» предмет.





Рис. 19. Міоелектричний протез руки SensorHand Speed

Одним із найдосконаліших на сьогодні біонічних пристроїв є протез *SmartHand* (Ізраїль) – винахід фахівців під керівництвом професора Йосі Шахам-Діаманда [24]. Цей імплантат має складний нейронний інтерфейс із 40 датчиками, які сприймають інформацію з протеза та передають її на нервові закінчення передпліччя, плеча, грудей, а потім – у соматосенсорну зону кори головного мозку. Цей пристрій допомагає пацієнтам повернути собі можливість малювати, грати на піаніно та виконувати інші дії (рис. 20).

Протезування верхніх кінцівок в Ізраїлі припускає використання найпередовіших розробок відомого німецького ортопедичного концерну Otto Bock, а також протеза *i-limb ultra revolution* компанії «Touch Bionics» (США). Протезування руки входить до найбільш складних завдань сучасної науки й медицини. Використання передових протезних матеріалів поки що підвищує вартість процедури [24]. Розглянемо, яким чином біонічний протез кріпиться до кульги ампутованої руки. Для успішної інтеграції протеза з куксою важливо ретельно оцінити її стан. До уваги беруть довжину та форму кукси, особливості шкірних покривів і стан рубця. На дуже коротких куксах застосовують кріплення за допомогою спеціальних ременів. В інших випадках перевагу надають вакуумному кріпленню, особливість якого в тому, що культеприймальна гільза максимально точно повторює конфігурацію кукси, забезпечуючи прилягання без зазорів і тривалий період експлуатації.

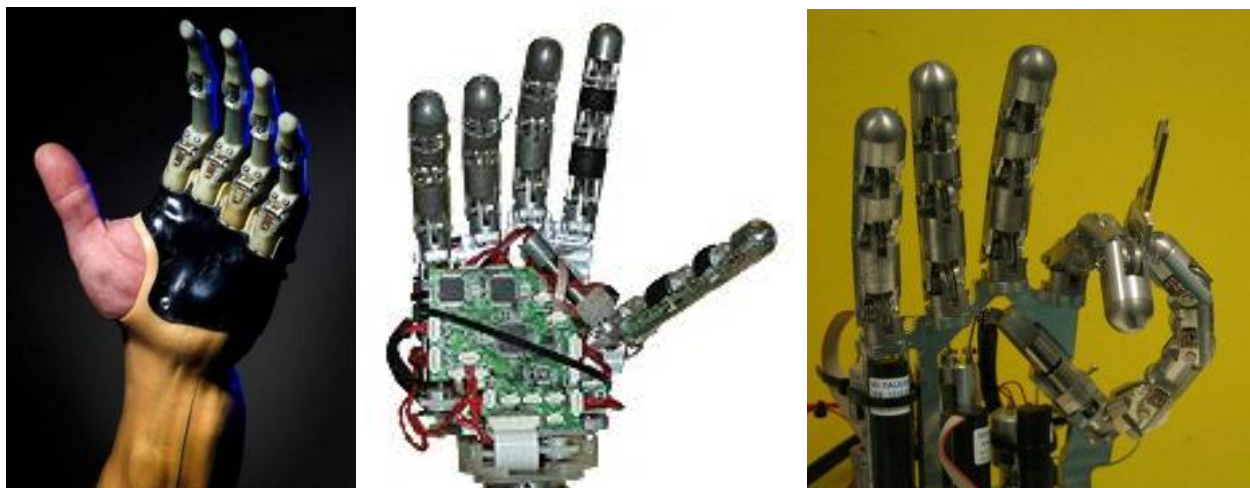


Рис. 20. Високотехнологічний біонічний протез пальців SmartHand

Найбільш сучасні моделі пасивних протезів руки виготовляють із високоміцного силікону. Усередині вони містять каркас й армуючий шар, який підвищує міцність конструкції. У деяких моделях протезів передбачено можливість регулювання положення пальців. Великою популярністю користуються протези бренду Otto Bock (Німеччина). Для досягнення максимальної ідентичності протеза зі справжньою рукою він пропонує унікальні косметичні рукавички. Їхня текстура до найдрібніших нюансів відтворює шкіру людини [24].

**Біонічний протез кисті Vebionic** – єдиний, що здійснює обертальну артикуляцію [25]. У його основі лежить міоелектрична система керування, яка доповнена можливістю тонкого доналаштування самим користувачем – установити силу захвату, реакцію протеза на певні предмети, швидкість



реагування пристрою та низку інших параметрів і передати потім цю інформацію по бездротовому каналу у свою електронну біонічну кисть. Міоелектрична система, зчитуючи м'язові імпульси на здоровій ділянці кінцівки, дає змогу користувачеві легко розпоряджатися біонічним пристроєм як своєю рукою (рис. 21).

Протез управляється за допомогою інтерпретації сигналів, які виникають при скороченні м'язів руки; і людина має можливість самостійно коригувати параметри кібернетичного протеза – програмувати силу стискання штучних пальців для того, щоб без проблем зім'яти бляшанку й при цьому не роздушити крихке яйце. Зв'язок із керуючим комп'ютером реалізується без проводів, на відміну від більшості попередніх пристроїв, оснащених USB-інтерфейсом.



Рис. 21. Біонічний протез кисті Vebionic з обертальною артикуляцією

Зовні протез кисті покритий силіконовою «шкірою», яка надає йому естетичного вигляду. Завдяки цьому біонічна кисть мало відрізняється від звичайної кисті руки людини. Для найбільш непомітної інтеграції протеза в кінцівку користувача пропонується 19 варіантів відтінків зовнішнього виконання.

«Open Bionics» розробляє протези в стилі *Deus Ex* [8, 9, 28]. Виготовлення біонічних протезів на зразок фантастичного виду рукавичок набирає обертів. Зовсім недавно британський геймер Джеймс Янг отримав роботизований протез руки в стилі Metal Gear Solid замість відсутньої. Тепер Square Enix і Eidos-Montréal співпрацюють із Razer і Open Bionics для створення двох варіантів стилізованих протезів (рис. 22). Один являтиме собою точну копію руки Адама Дженсена з гри *Deus Ex: Mankind Divided*, другий – у більш незграбному стилі, натхненний найтемнішим усесвітом *Deus Ex*. За допомогою камери Stargazer, здатної відстежувати рухи, клієнт зможе оцінити можливості протеза. Виробники обіцяють, що пальці й кисть будуть рухливими.



Рис. 22. Біонічні протези в стилі *Deus Ex*

**Міоелектричний протез плеча** [30] концерну Otto Bock (Німеччина) із першим у світі електричним ліктьовим шарніром DynamicArm дає змогу максимально наблизитися до природного стереотипу рухів здорової руки. Гармонійні рухи модуля, які відрізняються високою точністю й швидкістю, надають користувачеві незалежності, що була недосяжною, у повсякденному житті. Низький рівень перешкод у процесі роботи, вільний, із легкою амортизацією й повністю безшумний мах підкреслює непомітність модуля, який створює природне враження (рис. 23, де 1 – протез плеча, 2 – електрокисть SensorHand Speed, 3 – міоелектричний протез передпліччя MyoFacil).

**Переваги міоелектричного протеза плеча.** Швидка й сильна електрокисть SensorHand Speed відкривається та закривається втричі швидше, ніж інші протези кистей. Максимальна швидкість захвату складає 300 мм/с. Протез кисті має спеціальні датчики, які визначають, коли об'єкт, який тримає людина, починає зменшуватися. **Легкість рухів** – двигун ліктьового шарніра DynamicArm удвічі швидший, ніж інші електричні ліктьові системи, – тільки 0,5 с потрібно від початку руху до повного

згинання. Ліктьовий шарнір у русі дає змогу підняти вантаж до 5 кг. Варіатор допомагає робити рухи максимально плавними й природними.

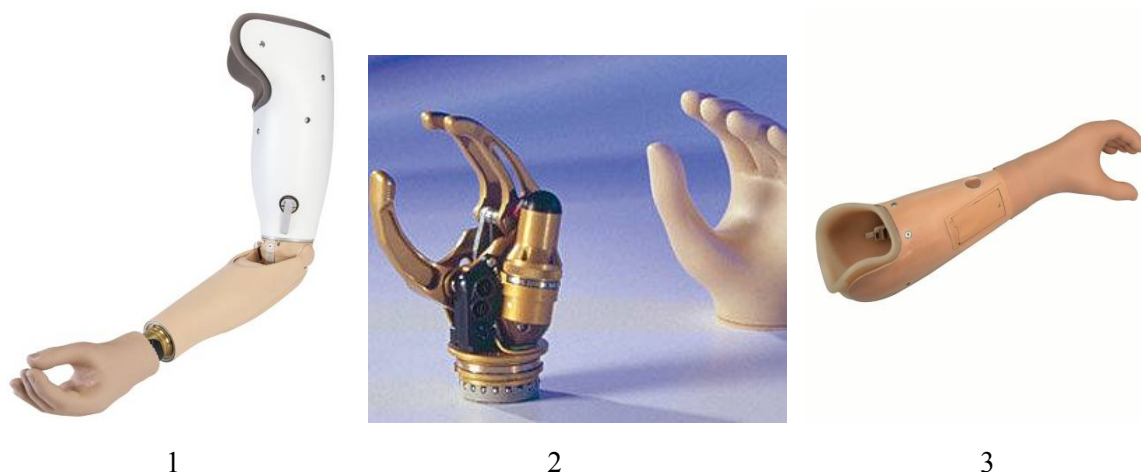


Рис. 22. Міоелектричний протез плеча з компонентами

*Надійність у роботі.* Ліктьовий шарнір легко розкривається, коли рука навантажена, і повертається у вихідне положення без сигналу на розблокування: людина може здійснювати менше компенсаційних рухів і підтримувати більш природне положення. *Комфортне кріплення* – амофіксуюча гільза (із/без внутрішнього змінного вкладиша) виготовляється індивідуально згідно з параметрами людини й забезпечує точну фіксацію на культі руки, підтримуючи надійний зв'язок з електродами, що керують протезом руки. *Природний та ефективний Automatic Forearm Balance* у ліктьовому шарнірі використовує запас енергії, яка накопичується, поки протез руки перебуває у випрямленому стані, і знову використовує її для закінчення руху. Це надає руці рівне, природне коливання коли людина ходить. Літій-іонна батарея забезпечує безперебійну, надійну й високу ефективність роботи ліктьового шарніра, обертання ротора та швидкість захвату предметів протезом кисті [30].

*Міоелектричний протез передпліччя MyoFacil* [30] дає змогу значно розширити діапазон рухів. Він реагує на сигнали м'язів людини й уможливорює керування плавними рухами. Ці сигнали можна виміряти на поверхні шкіри при напруженні певних м'язів передпліччя. Датчики (електроди) в гільзі сприймають сигнали для подальшого перетворення й керують двигуном, що виконує рухи кисті, дозволяючи стискати або розтискати кисть руки. *Надійний у використанні протез руки MyoFacil* ідеально підходить для тих, хто хоче вперше спробувати міоелектричний протез. Він надає користувачеві велику свободу рухів, простоту і надійність. Багато власників косметичних протезів зможуть відчувати це при першому використанні MyoFacil.

Протез руки дає змогу легко стискати й розтискати кисть за допомогою м'язових сигналів, що допомагає легко хапати та утримувати предмети. *Легкість керування протезом* забезпечується за допомогою електричних сигналів, які можна виміряти на поверхні шкіри при напруженні певних м'язів передпліччя. Датчики в гільзі сприймають сигнали для подальшого перетворення й керують двигуном, що виконує стискання та розтискання кисті. Для зарядки акумуляторної батареї потрібно витягти її з протеза й зарядити за допомогою зарядного пристрою. Світлодіоди сигналізують про готовність зарядного пристрою та відображають інформацію про стан зарядки акумуляторної батареї.

При встановленні акумуляторів у відповідну раму в гільзі можна визначити поточний стан зарядки за кольором світлодіодів. Для забезпечення довгострокового користування протезом достатньо простого догляду: гігієнічна обробка внутрішньої гільзи з використанням DermaClean і вологого рушника; догляду за рукавичкою та її гігієнічної обробки (водою й милом) достатньо для вилучення забруднень і підтримання рукавички протеза в чистому стані.

*Незвичну, експериментальну, штучну руку* має 40-річна Аманда Кітс [26], яка може за допомогою одних лише думок керувати своєю штучною кінцівкою, вона розпрямляє лікоть і повертає зап'ястя (рис. 23). Під пластиком тілесного кольору приховані металевий каркас, три мікродвигуни й складна електросистема. Уся конструкція завершується в районі біцепса, де білий пластиковий чохол охоплює куксу, яка залишилася від справжньої руки. Щоб виконати якусь дію, Аманді досить просто цього захотіти.

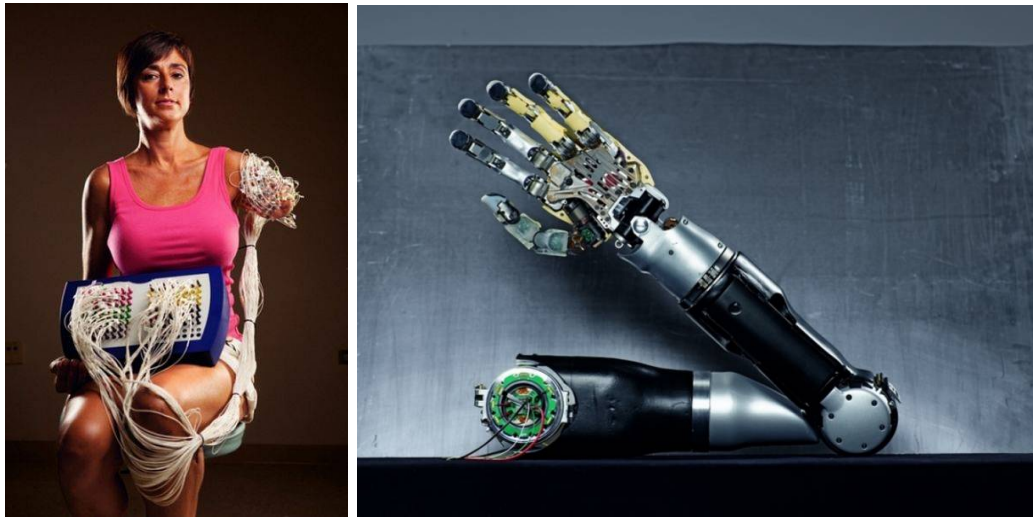


Рис. 23. Унікальна штучна рука Аманди Кімс

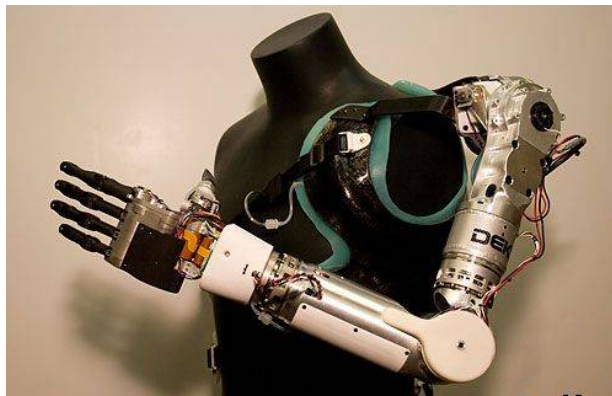
**Біонічний протез руки** – один із найдорожчих протезів світу (6 млн дол) – найвище досягнення на сьогодні. Його автори – фахівці лабораторії прикладної фізики Університету Джона Хопкінса [28]. Власник цього протеза при його використанні може обертати ним на 360°, повертати кисть, а також відчувати дотики, кінчиками пальців розрізняти структуру поверхні й навіть температуру об'єкта (рис. 24). Усе це досягається за допомогою нейроінтерфейса – цей метод дає значно більшу повноту відчуттів і можливостей управління, порівняно з використанням датчиків у міоелектричних протезах. Фінансування здійснюється агенством DARPA – підрозділом Пентагону.



Рис. 24. Біонічний протез руки з можливістю обертання на 360°

**Надсучасний протез руки Luke Arm** [28] – новий крок в області технології розробки штучних рук, створений Майклом Голдфарбом з Університету Вандербільта та компанією «Deka Research». Цей пристрій не протез, а «бомба», оскільки в якості приводу для нього використовується компактний однокомпонентний ракетний двигун, аналогічний за конструкцією тим, які раніше застосовували на космічних шатлах (рис. 25). Як паливо використовують перекис водню: під впливом каталізатора паливо нагрівається і пар, який виділяється, відкриває та закриває клапани, що з'єднані із суглобами протеза. Уся ця конструкція замінює акумулятори й електромотори.





**Рис. 25.** Надсучасний протез руки Luke Arm

*Електричні біонічні протези* – це найактуальніші й перспективні моделі штучних кінцівок. Серед наявного асортименту на увагу заслуговує продукція таких виробників і торгових марок [8, 10, 11, 12, 15, 16, 23]:

«Otto Bock» (Німеччина) – один із найбільш масштабних і старих європейських концернів, який спеціалізується на випуску різноманітних механічних, косметичних й електричних протезів ніг і рук. Він випустив у світ найпопулярніший, простий і надійний протез кисті руки *SensorHand Speed*. «Touch Bionics» (Шотландія) – компанія з випуску біонічних і складних косметичних протезів для компенсації втрачених пальців та кінцівок. Її конкурентом стала компанія «RSLSteeper», оскільки вони займаються створенням і продажем схожих модифікацій протезів *i-LIMB* та *Bebionic*.

Якщо проводити аналогію між *SensorHand* і виробами «Touch Bionics», то потрібно відзначити меншу функціональність «сенсорної руки», її іншу ціну й нехитру конструкцію. *Електричні біонічні протези* – на сьогодні найоптимальніший варіант компенсації ампутованих кінцівок і доступний широкому колу споживачів. До їхніх *негативних сторін* слід віднести високу ціну, низьку швидкість дії, труднощі з управлінням, малу силу стискання, дороге обслуговування, сприйнятливість до електромагнітних полів, залежність від температури навколишнього середовища й заряду акумуляторів.

**Висновки й перспективи подальших досліджень.** Наведений аналіз функціональних і конструктивних особливостей сучасних та перспективних біонічних протезів верхніх кінцівок дає підставу зробити висновок про те, що їх застосування підвищить ефективність допомоги пацієнтам, які втратили верхню кінцівку.

#### *Джерела та література*

1. Архипов М. В. Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине / М. В. Архипов, В. Ф. Головин, В. В. Журавлев // *Механотроника, автоматизация, управление*. – № 8. – Москва, 2011. – С. 42–50.
2. Методы биомехатроники тренажера руки человека / А. К. Платонов [и др.] // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. – 2012. – № 82. – 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-82>
3. Попадюха Ю. А. Применение роботизированного костюма-экзоскелета Harmony для обеспечения физической реабилитации пациентов с травмами позвоночника и неврологическими заболеваниями / Ю. А. Попадюха // *Современные здоровьесберегающие технологии*. – № 1. – 2017. – С. 131–148.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.computerra.ru/56032/bionic/> – Бионические протезы.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://yvek.ru/киборнизация/бионические-протезы-5-органов-которые-можно-заменить-на-электронные>.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://theoryandpractice.ru/posts/2353-kak-rabotayut-bionicheskie-konechnosti> – Как работают бионические конечности.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.livemd.ru/tags/bionicheskie\\_protazy/](http://www.livemd.ru/tags/bionicheskie_protazy/) – Бионические протезы.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Bebionic> – Рука-протез.
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lifenews.ru/news/109812> – Рука – бионический протез.
10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://argumentua.com/stati/kak-rodnaya-bionicheskii-protaz-ruki-s-obratnoi-svyazu> – Бионический протез руки с обратной связью.
11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://itc.ua/tag/bionicheskie-protazy/> – Детские бионические протезы рук.
12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.pravda.ru/news/science/29-06-2015/1264981-bionika-0/> – Бионический протез для женщин.
13. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://telebudka.com.ua/ictv/28703-boycy-ato-poluchili-sverhsovremennye-bionicheskie-protazy-ruk.html> – Бойцы АТО получили сверхсовременные бионические протезы рук.
14. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.robo-geek.ru/roboty-v-meditsine/bionicheskii-protaz-ruki-upravlyaetsya-soznaniem> – Бионический протез руки управляется сознанием.



15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ua-today.com/news-from-ukraine/60613> – Британцы сделали био-нический протез руки.
16. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://geektimes.ru/post/277032/> – Обзор рынка бионических рук на 2016 год.
17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.membrana.ru/particle/14446> – Бионические протезы пальцев.
18. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://neinvalid.ru/v-permi-prezentovan-unikalnyj-bionicheskiy-protiez-kisti/> – Бионический протез кисти.
19. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.tehnari.ru/fl57/t98034/> – Бионический протез руки i-Limb Ultra Revolution.
20. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.bbc.com/ukrainian/science/2016/02/160211\\_protheses\\_ukraine\\_ko](http://www.bbc.com/ukrainian/science/2016/02/160211_protheses_ukraine_ko) – Як в Україні освоюють хай-тек протези.
21. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.3dnews.ru/785662> – Владелец бионической руки сможет ощущать прикосновения к ней.
22. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://roboting.ru/1170-bionicheskaya-ruka-i-limb-pulse.html> – Бионический протез i-Limb Pulse.
23. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ottobock-export.com/ru/prosthetics/upper-limb/solution-overview/myoelectric-devices-speedhands/> – Протезы кисти SensorHand Speed и VariPlus Speed.
24. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rusmedserv.com/prostheticsextremities/sensitive-prosthesis-hand-smarthand/> – Протез SmartHand.
25. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://pidmoga.info/oleksandr-stetsenko-kosmety-chni-z-tyago/> – Олександр Стеценко, протезна майстерня «Ортотех-Сервіс».
26. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nat-geo.ru/science/35023-vtoroy-shans/> – Искусственная рука Аманды Китс.
27. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://fastsaltimes.com/sections/technology/429.html> – Холодная красота бионических рук.
28. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://itc.ua/articles/covremennye\\_tehnologii\\_protizirovaniya\\_kak\\_it\\_pomogaet\\_lyudyam\\_zhit\\_48171/](http://itc.ua/articles/covremennye_tehnologii_protizirovaniya_kak_it_pomogaet_lyudyam_zhit_48171/) – Современные технологии протезирования.
29. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dni.ru/tech/2013/2/18/248391.html> – Бионический имплант «рука Микеланджело».
30. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ottobock.ru/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/dynamicarm/> – Міоелектричний протез плеча.

#### **Анотації**

*У статті розглянуто принципи розробки, конструктивні та функціональні особливості біонічних протезів верхніх кінцівок. **Мета роботи** – аналіз принципів створення, конструктивних і функціональних особливостей сучасних та перспективних біонічних протезів верхніх кінцівок.*

***Ключові слова:** біонічний протез, верхня кінцівка, роботи, імплантація, м'язова реіннервація, електроміографія, електроенцефалографія, сенсорна реіннервація, керування мозком, остеоінтеграція, зворотний зв'язок.*

***Юрій Попадюха. Особенности бионических протезов верхних конечностей.** В статье рассмотрены принципы разработки, конструктивные и функциональные особенности бионических протезов верхних конечностей. **Целью работы** является анализ принципов создания, конструктивных и функциональных особенностей современных и перспективных бионических протезов верхних конечностей.*

***Ключевые слова:** бионический протез, верхняя конечность, роботы, имплантация, мышечная реиннервация, электромиография, электроэнцефалография, сенсорная реиннервация, управление мозгом, остеоинтеграция, обратная связь.*

***Yuriy Popadiukha. Peculiarities of Bionic Prostheses of Upper Extremities.** In the article the principles of development, constructive and functional peculiarities of bionic prostheses of upper extremities are considered. The **aim of the work** is to analyze the principles of creation, constructive and functional peculiarities of modern and prospective bionic prostheses of upper extremities.*

***Key words:** bionic prosthesis, upper limb, robots, implantation, muscle reinnervation, electromyography, electroencephalography, sensory reinnervation, brain control, osteointegration, feedback*