

Реабілітаційні екзоскелети – сучасність і перспективи застосування

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

Постановка наукової проблеми та її значення. Серед технічних засобів для відновлення стану опорно-рухового апарату (ОРА) людини важливе місце займають механічні, роботизовані системи та екзоскелети, які дають змогу людям з обмеженими фізичними можливостями переміщати своє тіло [1–3; 5]. Незважаючи на існування різноманітних технічних систем і засобів для реабілітації після пошкоджень і захворювань хребта та нижніх кінцівок ще мало задіяні новітні сучасні екзоскелети різних типів, що ефективно забезпечують можливості пересування паралізованої людини, після інсульту, черепно-мозкових травм, при обмежених функціях ходьби тощо.

Постала проблема щодо аналізу функціональних та конструктивних можливостей сучасних і перспективних екзоскелетів різних типів для їх застосування в реабілітаційних технологіях [5, 36]. 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 досліджень цієї проблеми. Проведення ефективної допомоги паралізованим пацієнтам після перенесеного інсульту, пошкоджень хребта, при наявності обмежених функцій ОРА під час лікування та реабілітації за різних захворювань і пошкоджень у пацієнтів – актуальна та важлива проблема.

Для цих завдань застосовують механічні й роботехнічні засоби – роботи, екзоскелети для забезпечення процедур відновлення та реабілітації ОРА компаній: Con-Trex, Biodex, Lokomat [1, 5]; роботи для відновлення суглобів верхніх і нижніх кінцівок [1, 8], екзоскелети [2, 18]; роботизовані костюми-екзоскелети [4, 134; 13; 36] та ін.

Мета дослідження – аналіз функціональних і конструктивних особливостей сучасних і перспективних екзоскелетів для застосування в реабілітаційних технологіях.

Завдання дослідження – розглянути функціональні та конструктивні особливості сучасних і перспективних екзоскелетів різноманітних типів для забезпечення підвищення ефективності відновлення хворих після інсульту, пошкоджень хребта, черепно-мозкових травм за наявності обмеження функцій ОРА під час лікування та реабілітації при різних захворюваннях і пошкодженнях, надання допомоги паралізованим пацієнтам у їх пересуванні.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. Сьогодні роботи відіграють велику роль у розвитку сучасної медицини та фізичної реабілітації. Вони замінюють відсутні кінцівки й органи, відновлюють і покращують фізичні можливості людини, забезпечують зручність, швидкість реагування та комфорт.

Екзоскелет – це зовнішній каркас, що повторює біомеханіку людини для посилення її м'язових зусиль. Вони сприяють підвищенню фізичної сили й допомагають при відновному процесі опорно-рухового апарату (ОРА). Роботизовані протези – імпланти, які замінюють відсутні кінцівки, складаються з механіко-електричних елементів, мікроконтролерів зі штучним інтелектом, що здатні керуватися від нервових закінчень людини [1; 2; 3; 5; 36].

Нові технології комплектуючих, датчиків, мікрокомп'ютерів, нові матеріали використовуються в інтегрованому контролі в реальному часі деяких дуже складних динамічних систем – людиноподібних роботів, які мають до 50 ступенів свободи й керуються контролером за мікросекунди.

Один із найвідоміших медичних пристроїв – роботизований костюм – *екзоскелет*, що дає змогу людям з обмеженими фізичними можливостями переміщати своє тіло. Коли людина намагається поворушити руками або ногами, спеціальні датчики на шкірі зчитують малі зміни в електричних сигналах організму, приводячи в робочий стан механічні елементи екзоскелета [1; 3; 4; 5; 11; 13; 36].

Потрібно зазначити, що перші у світі активні екзоскелети створені під керівництвом Міоміра Вукобратовіча в Белграді в інституті ім. Михайла Пупина у 1970-х роках [1; 2]. Спочатку були реалізовані активні екзоскелети для людей, які страждають на параліч нижніх кінцівок. Активний екзоскелет з електромеханічними двигунами, апаратно програмований, сконструйований і протестований у 1974 р., призначений для оцінки та розвитку електромеханічних двигунів для ортопедичних пристроїв, був «активною рукою» ортопедичної техніки. Останні відкриття в анатомії свідчать про те, що певні групи м'язів відповідають за динамічні рухи конкретних частин тіла (плечі, стегна, хребет), уключаючи комплекс складних обертових суглобів. Людиноподібні роботи повинні моделюватися за

допомогою синовіальних суглобів, урахувавши те, що вони сумарно повинні мати більше 3-х ступенів свободи (обертальних і поступальних). Людиноподібні динамічні суглоби якісно відрізняються їх від суглобів робота (машинних з'єднань), тому в людини вони більш гнучкі, ніж у робота [1; 2; 4; 5; 6].

Створення людиноподібних роботів було націлене на допомогу інвалідам, які самостійно не пересуваються. За визначенням, екзоскелети повинні мати антропоморфну форму. Такі роботи вперше були реалізовані на початку 1980-х років в інституті ім. Михайла Пупина в Белграді. Це був перший приклад екзоскелета для антропоморфічного пересування інвалідів із паралічем нижніх кінцівок [1; 2]. На сьогодні швидко розвиваються людиноподібні роботи та активні екзоскелетні системи. Їх механічна складність і можливості значною мірою схожі з людськими. За типом джерела енергії й принципом приводу роботи-екзоскелети бувають активні та пасивні; за локалізацією – для верхніх і нижніх кінцівок; екзоскелет-костюм; за вагою – легкі (~ 5 кг); середні (5–30 кг); важкі – понад 30 кг; за числом функцій – простого та подвійного призначення, із розширеними функціями; за мобільністю хворого – мобільні та фіксовані (стаціонарні). Реабілітаційні екзоскелети допомагають травмованим людям, інвалідам, літнім хворим, які через свій вік і захворювання мають великі проблеми з ОРА [4; 5; 7; 10; 12; 13; 36].

Одними з популярних екзоскелетів сьогодні такі [1; 3; 5; 6; 10–12, 14–19]: *Walking Assist Device* – допоміжний пристрій для ходьби (Honda, Японія); *реабілітаційний HAL* (Cyberdyne, Японія) – широко використовують у лікарнях; *екзоскелет Indego* (Parker Hannifin, університет Вандербілта) дає можливість рухати суглобами стегон і колін; *потужний NASA XI* для паралізованих людей; *Kickstart* (Cadence Biomedical) використовує кінетичну енергію, генеруєму людиною при ходьбі; *eLEGS* (Eko Bionics); *реабілітаційний REX* (Rex Bionics, Нова Зеландія); *екзоскелети ReWalk* (ARGO, Space Applications Services), що допомагають паралізованим людям; унікальний мозок-машинний інтерфейс (ВМІ) – *екзоскелет для мозку МАНІ-ЕХОІІ* для відновлення рухових функцій зчитуванням мозкових хвиль. Широке їх застосування допомагає багатьом людям відчути себе повноцінними, навіть повністю паралізовані мають можливість ходити.

Екзоскелет Walking Assist Device [12] – допоміжний пристрій для ходьби (Honda, Японія), для надягання якого не потрібно застібати навколо ніг або пояса численні реміні. Досить узутися в черевки (частина пристрою) та підняти сидіння, що вінчає кібер-ноги, і можна рухатися. Екзоскелет дає змогу ходити, підніматися й спускатися сходами або похилою площиною, присідати й уставати (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд екзоскелета *Walking Assist Device*

Екзоскелет слідкує за рухами людини, при цьому він спрямовує своє зусилля так, щоб воно проходило через центр ваги власника, що допомагає йому тримати рівновагу. Більше того, апарат урахує різні пози людини під час регулювання зусилля. Так, під час ходьби мікрокомп'ютер керує двома електромоторами згідно із сигналами із датчиків у підшвах механізму. Машина враховує кут згинання колін. Якщо людина переміщається в напівприсіді або піднімається сходами, зусилля моторів, що підтримують вагу власника, буде збільшено. За її допомогою зменшується навантаження на м'язи й суглоби ніг (стегна, коліна, литки). Основні дані цього екзоскелета [12]: вага – 6,5 кг (уключаючи взуття і літєво-іонний акумулятор), час роботи на одній зарядці становить 2 год. Пристрій може бути виконаний у різних розмірах, при цьому якщо конкретний екзоскелет розрахований на користувачів із «номінальним» зростом 170 см, то це означає, що його зможуть нормально застосовувати люди з ростом 165–175 см. У фізичній реабілітації екзоскелет використовують пацієнти з пошкодженнями нижніх кінцівок або хребтового стовпа.

Екзоскелет із гібридною системою управління Hybrid Assistive Limb (HAL) призначений для реабілітації та фізичних тренувань у медичних цілях, для допомоги інвалідам, полегшення важкої праці на виробництві, проведення рятувальних робіт, особистої зацікавленості людей [1; 5; 6; 11].

Існують два основні прототипи: «HAL-3» (рис. 2–1) для відновлення рухової функції ніг хворого та «HAL-5» – для відновлення роботи верхніх і нижніх кінцівок, торсу пацієнта (рис. 2–2). За допомогою «HAL-5» людина може піднімати й переносити важкі предмети, що в п'ять разів перевищують звичну вагу. Екзоскелети HAL з 2013 р. активно задіяні в клініках Японії для реабілітації та відновлення хворих із набутим парезом, паралічем, у відновному періоді після травм, операцій, інсультів.

Екзоскелети складаються з корпусу, датчиків і механізму з гідравлічним управлінням. Людина поміщається між двома опорними стійками й тримається за них, а датчики прикріплюються до шкіри ніг. Вони мають сервоприводи, що приводяться в дію електричними імпульсами, які виробляються м'язовими волокнами людини й приймаються спеціальними електродами, установленими на шкірі хворого. Датчики вловлюють нервові сигнали, що направляються в бортовий мікрокомп'ютер робота.



1 2
Рис. 2. Екзоскелети HAL-3 і HAL-5

Ці сигнали перетворюються в дії малих двигунів і силових агрегатів, змушуючи м'язи працювати таким самим чином, і людина самостійно переміщає ногу. За допомогою датчиків, приєднаних до шкіри, костюм, імовірно, рухається без зусиль за допомогою м'язів людини, і здатний збільшити силу пацієнта в 10 разів. Живлення – батарея (100В), що прикріплюється до талії хворого, а час його безперервної дії – 2 год 40 хв. Кінцевим результатом є прямий зв'язок між нервовими сигналами й рухом, що ведуть до більш швидкого й кращого відновлення пацієнта.

Екзоскелет Indego [10] фірми Parker Hannifin університету Вандербілта (США) дає можливість рухати суглобами стегон і колін (рис. 3). Ці засоби діють за принципом зовнішнього скелета. Верхня частина щільно прилягає до торса. Міцні підтримувальні елементи огортають ноги від стегна до коліна й від коліна до литок (рис. 3.2). З'єднання на стегні та коліні приводяться в рух керованими мікрокомп'ютером електричними моторами, що живляться від акумуляторів. Пацієнти використовують такі екзоскелети разом із милицями або ходунками, для підтримки рівноваги (рис. 3.1, 3).



1 2 3

Рис. 3. Загальний вигляд екзоскелета *Indego*

Екзоскелет має просте управління, а для того, щоб розпочати рух, людині слід трохи нахилитися вперед. Щоб сісти – нахилитися назад й залишатися в такому положенні декілька секунд. Він дає змогу крокувати та підніматися сходами, має компактні розміри: легко знімається та складається.

Трохи підготовки та балансу – і пацієнти зможуть направити екзоскелет, щоб зігнути коліна й стегна під час ходьби й підніматися сходами. Він важить трохи більше 12 кг, що майже удвічі легше за інші моделі, які важать у середньому 45 кг. Для застосування в реабілітації екзоскелет має дві потенційні переваги: кількість підтримок від робота автоматично адаптується до пацієнтів із залишками м'язової керованості ногами, а це дозволяє їм використовувати власні м'язи під час ходьби.

Якщо пацієнт повністю паралізований, усю роботу виконує екзоскелет; це єдиний робот, якого можна одягнути, містить у собі перевірену реабілітаційну технологію функціональної електростимуляції (ФЕС), що подає слабкі електричні імпульси до паралізованих м'язів, змушуючи їх напружуватись і розслаблятися. Вона може зробити міцнішими ноги в людей із частковим паралічем, у повністю паралізованих пацієнтів покращує кровообіг, змінює щільність кісток і зменшує атрофію м'язів.

Людина має бути фізично готова до використання таких пристроїв. Її вага не повинна перевищувати 100 кг, тіло має бути сильним для використання милиць; мають бути гнучкими плечовий пояс, стегна, колінний та над'ятково-гомількові суглоби, що не завжди просто для людини, яка на місяці (іноді роки) була прикута до інвалідного крісла.

Потужний робот-екзоскелет NASA XI [14] для паралізованих людей створений НАСА та Інститутом Флориди людського і машинного пізнання Пенсакола (США). Екзоскелет вагою 26 кг є носимим людиною та сприяє руху в суглобах ніг (рис. 4).



Рис. 4. Загальний вигляд потужного робот-екзоскелета *NASA XI*

Він забезпечує допомогу паралізованим людям, у режимі блокування автоматизований пристрій можна задіяти як тренажер для руху кінцівок людей з обмеженими функціями ходьби. Спочатку його одягають на ноги людини, далі спеціальне спорядження закріплюють на спині та плечах.

Робот-екзоскелет має 10 ступенів свободи в суглобах, чотири моторизовані з'єднання на стегнах і колінах та шість пасивних з'єднань, які дають змогу ходити, повертатись і згинати ноги, згинатися, підніматися сходами тощо. Він призначений для того, щоб полегшити пересування по різноманітних поверхнях, у тому числі й сходами.

Його потенціал поширюється на реабілітацію, модифікацію ходьби, не навантажуючи людину великою додатковою вагою. Попередні дослідження засвідчили, що він буде більш комфортно й легше пристосовуватися до людини, ніж попередні екзоскелети. Планується покращити його дизайн, додавши більш активні сполуки в литках і стегнах, що збільшить можливості екзоскелета.

Екзоскелет Kickstart [15] використовує кінетичну енергію, що генерується людиною під час ходьби, створений для її поліпшення, мобільності та незалежності людей. Він виключно механічний і працює методом збереження та випуску кінетичної енергії, що генерується людиною під час ходьби, використовує природні пружини, щоб захопити кінетичну енергію та відпустити її, таким чином допомагаючи згинати м'язи стегон, які використовуються для підняття коліна вгору під час ходьби.

Доступний в одній або 2-х конфігураціях ніг, екзоскелет призначений для носіння на зовнішньому одязі людини. Він складається з поясного ремня, двох опорних конструкцій (одна – від стегна до коліна, інша – від коліна до литки), звичайних модельованих устілок для надійного закріплення пристрою на нозі й кінетичної опори, розміщеної трохи вище коліна.

Коли нога з прикріпленим пристроєм спирається на землю, а інша нога нахиляється вперед, екзоскелет розтягується для зберігання кінетичної енергії. Коли людина піднімає ногу з пристроєм, енергія від пружини звільняється, допомагаючи підняти ногу й рухати її вперед.

Екзоскелет призначений на пацієнтів зі слабкими нижніми кінцівками, неврологічними травмами або захворюваннями (інсульт, неповне ушкодження спинного мозку, бічний аміотрофічний склероз, м'язова дистрофія, розсіяний склероз).

Користувачі можуть ходити з екзоскелетом у короткі терміни з мінімальними навчанням. Він приєднується або знімається менш ніж за 5 хвилин, повинен бути показаний лікарем і встановлений техніком-ортопедом.

Екзоскелет-система eLEGS (Berekely Bionics, США) складається з екзоскелета для нижньої частини тіла з «ранцеподібним» управлінням і батарейним блоком живлення [5, 17].

Вона здатна нести вагу паралізованої людини-оператора, дозволяючи їй крокувати за рахунок енергії екзоскелета (рис. 5; 6). Система дає змогу паралізованим людям проводити більше часу поза своїми кріслами.



Рис. 5. Загальний вигляд екзоскелета-системи eLEGS

Роботизовані ноги дають можливість паралізованим знову піти, і навіть краще, ніж раніше. Навіть без безпосереднього контролю із боку eLEGS, що управляється фізіотерапевтом, пацієнт повинен підтримувати рівновагу за допомогою тулуба й рук. Система, яка важить 20 кг, хоч і підтримує свою власну вагу та вагу хворого, але вимагає активної участі останнього для забезпечення успішних дій. Проте більш важливо те, що «ноги» екзоскелета-системи eLEGS здатні зробити прорив саме в галузі фізичної реабілітації.

Чим швидше вдасться змусити пацієнта рухатися, тим меншою буде втрата його м'язової здатності, тим вищими будуть шанси до успішної регенерації й неврологічного відновлення. Ходьба за допомогою системи eLEGS може змінити життя та подарувати надію, але її переваги йдуть набагато далі від емоційних і фізіологічних аспектів. На рис. 6 наведено принцип формування напрямку руху в екзоскелеті-системі, до ліктя приєднані дротики зв'язку (своєрідний «інтерфейс людина-машина»), що діють як індикатор напрямку руху.



Рис. 6. Інтерфейс людина-машина екзоскелета-системи eLEGS

Прямостояння пацієнта з підтримкою спорядженням рекомендовано для поліпшення циркуляції крові, підвищення м'язової опорної здатності, забезпечення регулярної роботи кишечника, відновлення деяких неврологічних функцій у тих, хто постійно прикутий до інвалідного крісла.

Система може допомогти пацієнтам із розсіяним склерозом, артритом, після перенесеного інсульту. На рис. 7 наведено основні компоненти управління екзоскелетом-системою eLEGS, де 1 – «Рюкзак» управління роботою системою та 2 – рідкокристалічний монітор-підвіска екзоскелета.



1

2

Рис. 7. Блоки управління екзоскелетом-системою eLEGS

Реабілітаційний екзоскелет REX (Rex Bionics, Нова Зеландія) – це інноваційний моторизований екзоскелетний костюм для забезпечення фізичної реабілітації людей з обмеженими фізичними можливостями через перенесені травми й операції [5; 16].

Він забезпечує прямоходіння людям із паралічем нижніх кінцівок, для людей, інвалідність яких настала через травму спинного мозку або невдалі операції на хребті – це унікальна розробка, яка є найбільш технічно досконалою з усіх аналогічних (рис. 8).

Показання до застосування бувають такі: після операцій на спинному мозку, травм із пошкодженням або розривом спинного мозку; люди похилого віку з порушеннями рухової функції; спадкові захворювання кісток і суглобів; після перенесеного інсульту; неврологічні порушення (парези, паралічі).



Рис. 8. Загальний вигляд реабілітаційного екзоскелета REX

Переваги застосування екзоскелета для інвалідів – те, що це дає змогу самостійно ходити; під час його використання не потрібно додаткових засобів для стабілізації, руки залишаються вільними; може застосовуватись у людей навіть із повним пошкодженням хребта. Оскільки відсутнє використання милиць, виключена можливість отримати удар або розтягнення плечового суглоба; екзоскелет для нижніх кінцівок дає змогу людині робити різноманітні рухи – устати, присідати, іти вперед і назад, повернутися, стояти на одній нозі, підніматися сходами, ходити по похилих поверхнях; екзоскелет не важкий в управлінні. Усі функції активуються за допомогою спеціального джойстика; незамінний у домашніх умовах, дає змогу людині себе обслуговувати й виконувати звичні справи.

Моторизований екзокостюм ідеально підходить для проходження реабілітації в лікувальних установах, домашніх умовах і на роботі. Принцип роботи екзоскелетів REX заснований на збільшенні сили й швидкості роботи м'язів людини за рахунок використання електроприводу, при цьому пацієнту не потрібні милиці, інші засоби стабілізації, руки залишаються абсолютно вільними.

Можливості пацієнта за використання екзоскелета REX: ходити самостійно, не потрібні засоби стабілізації; виключається ризик пошкоджень у плечовому суглобі; вільно рухатися, можна встати /

присісти, повернутися, йти назад, стояти на одній нозі, йти сходами, ходити різними, навіть похилими поверхнями, екзоскелет позбавляє людину від інвалідного крісла; використовується людьми з повним пошкодженням спинного мозку до рівня C4 / C5; легкий в управлінні, усі функції активуються джойстиком, а якщо екзоскелет одягається вперше, то настройка займає до 10 хв; при постійному використанні достатньо 5 хв, щоб пацієнт стояв на своїх власних ногах; тривалий час роботи забезпечується завдяки високоємному зйомному акумулятору, що може діяти весь день; при невеликій вазі у 38 кг екзоскелет розраховано на пацієнта вагою до 100 кг і зростом 1,42–1,93 м; він оснащений фіксаторами, що не викликають дискомфорту, навіть якщо використовується цілий день; коли пацієнт не рухається, а стоїть – екзоскелет не витрачає заряду акумулятора; можливість ходити сходами без сторонньої допомоги; екзоскелет настільки стійкий, що людина може стояти на одній нозі.

Позитивні ефекти для здоров'я – зменшення жирової тканини, покращення функцій кардіореспіраторної системи, настрою хворого й загального життєвого тону, нормалізація артеріального тиску (АТ), поліпшення вентиляції легенів; запобігає дегенерації м'язових і кісткових тканин, підвищується рухливість суглобів; завдяки спеціально встановленим датчикам, у точності повторює біомеханіку рухів у кульшовому суглобі, знижує навантаження на м'язи й суглоби нижніх кінцівок; системою датчиків визначаються функціональні можливості тіла – кут нахилу, швидкість пересування; покращення функціонування травної та сечовидільної систем; ходьба – важлива умова правильної роботи внутрішніх систем й органів людини, реабілітація за допомогою екзоскелета сприяє поліпшенню з боку тазових органів.

Протипоказання – обмеження в об'ємах рухів, недостатня сила верхніх кінцівок; нестабільність спини або застосування спинних ортопедичних засобів, крім випадків, коли отримано дозвіл лікаря; тромбоз глибоких вен, остеопароз, що не допускає безпечного стояння, неконтрольована автономна дисрефлексія; різниця довжини стегон понад 1,3 см або різниця довжини гомілки перевищує 1,9 см, вагітність, колостома.

Характеристики – зріст пацієнта дорівнює 1,42–1,93 м, а його маса – до 100 кг; максимальна ширина стегон – 38 см; маса екзоскелета (із батареєю) – 38 кг.

Реабілітаційний екзоскелетний костюм REX Rehab [18] – автоматичний пристрій для ходьби пацієнтів із порушеннями ОРА, обмежує навантаження на фахівців за ручного переміщення пацієнта й зменшує надання необхідної допомоги під час реабілітаційних тренувань. Особливості реабілітаційного екзоскелета REX Rehab аналогічні екзоскелету REX.

Екзоскелет ReWalk [5, 18] – «ходити заново» (рис. 9) – створено фірмою ARGO Medical Technologies (Ізраїль) і масачусетською фірмою Solidworks (США) у формі костюма, який пацієнт одягає на нижні кінцівки та пояс. Відмінна особливість – те, що він являє собою єдине ціле з пацієнтом. Екзоскелет призначено для реабілітації людей із паралізованими нижніми кінцівками. Усі його компоненти (із двигуном) легко одягають поверх одягу й знімають. Кріпиться він до тіла за допомогою ременів і спеціальних скоб навколо талії та плечей. Живиться від акумулятора в заплічному рюкзаку, розрахованому на 3,5 год. Дані від сенсорних датчиків надходять й обробляються в центрі управління, за допомогою пульта управління на зап'ясті можна обирати відповідні програми: «стояти», «сидіти», «ходити», «спускатися» та «підніматися».

Пацієнт може сам вибирати потрібний режим роботи екзоскелета, але щоб він почав рух, пацієнт повинен нахилитися вперед і переставити милиці. Він може використовуватися і як тренажер. Існує декілька розробок екзоскелета ReWalk. Так, *екзоскелет ReWalk 2.0* дає змогу коригувати його за зростом пацієнта й враховувати особливості тіла. З'явився режим «новачок», який допомагає пацієнтові швидше звикнути до екзоскелета та освоїти перші кроки з ним. Екзоскелет ReWalk – це розумний пристрій, що сам розуміє, чого хоче пацієнт: піти вперед, сісти, устати й т. ін., підійматися вгору та спускатися вниз сходами. Цей пристрій застосовують у реабілітаційних центрах Ізраїля, Європи та США.



Рис. 9. Загальний вигляд екзоскелета ReWalk

Екзоскелет для мозку МАНІ-ЕХО II пацієнтів [19] для відновлення рухових функцій створили фахівці університетів Райс і Х'юстона (США). Він керується силою думки та дає змогу відновитися людям після інсульту (рис. 10).



Рис. 10. Загальний вигляд екзоскелета для мозку МАНІ-ЕХО II

Розумний пристрій знає, що робити з пацієнтом: якщо він намагається рухатися – робот повинен очікувати, що йому знадобиться допомога. Без складних оперативних втручань хворий повинен фізично рухатися або почати якийсь рух. Розроблено неінвазивний мозок-машинний інтерфейс (ВМІ) – ортопедичний пристрій, що стане особливим для реабілітації верхніх кінцівок. Нові нейротехнології інтерпретуватимуть мозкові хвилі, які дають змогу пацієнтові після інсульту, рухати руками й пальцями.

Створено першу успішну реконструкцію 3-D рук і рухів ходьби від сигналів мозку, записаних неінвазивним способом, за допомогою ЕЕГ, допомагаючи пацієнтам за рахунок їхніх думок управляти роботою ніг і рук нижче ліктя з ампутуваними кінцівками. Цей проект – один із перших, який створить систему ВМІ для людей після інсульту.

Протестовано МАНІ-ЕХО II та роботизований пристрій. Спочатку пристрої ЕЕГ переведуть мозкові хвилі здорових людей для управління цим роботом, а потім у тих, хто переніс інсульт, зі здатністю ініціювати рухи, для включення робота до дії. Це дасть змогу фахівцям уточнити дію інтерфейсу робота, перш ніж перейти до клінічних випробувань пацієнтів без верхніх кінцівок, які перенесли інсульт. Більш рання версія екзоскелета вже у фазі випробувань із відновлення спинного мозку визначила травми пацієнтів стосовно рухових функцій. Вона вміщує вдосконалені технології зворотного зв'язку, даючи змогу пацієнтові працювати з рухом для відновлення сили й точності. Можливість використовувати намір людини за допомогою ЕЕГ нейронних інтерфейсів для керування роботами уможливує участь у реабілітації пацієнта.

Уведення пацієнта безпосередньо в «робота» прискорить процес навчання та підвищить рухову активність. ЕЕГ-технологія в реальному часі надає оцінку пластичності мереж мозку за допомогою роботизованого втручання – важливої інформації для зворотного інжинірингу мозку. Новий пристрій сприятиме реабілітації пацієнтів після інсульту, перетворюючи думки в дії та відновлюючи моторику кінцівок. Американські вчені створюють екзоскелет з ЕЕГ-інтерфейсом.

Застосовуючи робот, пацієнт зможе за допомогою думок ініціювати повторювані дії, що дасть можливість мозку відновити рухові функції.

Екзоскелет Mindwalker фірми Space Applications Services (Бельгія) допоможе паралізованим людям знову ходити [20]. Фахівці тестують вид контрольованого робота-екзоскелета, що дав би змогу повністю паралізованим людям ходити. Проект Mindwalker використовує легко встановлені на голову людини електроди, що можуть зчитувати сигнали мозку, пов'язані з рухом, що може бути перетворено в команди для роботи екзоскелета.

Роботизований костюм, який кріпиться до ніг людини, призначений для більш подібної імітації того, як люди ходять, порівняно з іншими екзоскелетами, що вимагають додаткових пристроїв для ходьби у вигляді палиць для підтримки людини (рис. 11).



Рис. 11. Загальний вигляд екзоскелета Mindwalker

Цей екзоскелет запропоновано як амбітний проект і призначено для дослідження перспективних підходів для використання сигналів мозку під час управління новими протезами, а також розробки й реалізації прототипу системи, що демонструє потенціал технологій. Технологія, створена для Mindwalker, знайде застосування в реабілітації хворих після інсульту, наданні допомоги космонавтам для відновлення м'язової маси після тривалих періодів перебування на орбіті. Дослідники розробили нейронно-машинний інтерфейс (BNCI), що перетворює сигнали ЕЕГ від мозку, або ЕМГ, отримані від м'язів плеча в електронні команди для управління екзоскелетом. Сигнали BNCI повинні бути фільтрованими й обробленими, перш ніж вони будуть використані для контролю екзоскелета.

Щоб домогтися цього, дослідники Mindwalker підживлювали сигнали в динамічній рекурентній нейронній мережі – технології, здатної до навчання та використання динамічного характеру сигналів BNCI. Екзоскелет може підтримувати вагу 100 кг, досить потужний, щоб відновити баланс від нестабільності тулуба хворих під час ходьби за рахунок м'якого поштовху в спину або в бік. Апарат легкий (менше 30 кг без батареї), використовує пружини, установлені всередині суглобів, здатні поглинати й відновлювати частину енергії, розсіяної під час ходьби, аби зробити його більш енерго-ефективним.

На відміну від більшості екзоскелетів, які покликані бути збалансованими та стаціонарними, що робить їх важкими, повільними й вимагає додаткової підтримки під час руху, екзоскелет Mindwalker застосовує контрольовані втрати рівноваги. Такий підхід називається «ходьба з обмеженим циклом», він реалізований із використанням моделі інтелектуального управління, яка передбачає поведінку користувачів й екзоскелета, використовується для управління ним під час прогулянки. Компанія Space Applications Services розробила платформу навчання віртуальної реальності, щоб дати змогу новим користувачам безпечно звикнути до застосування екзоскелета до тестування його в клінічних умовах.

Роботизований екзоскелет для реабілітації плеча [27] центру робототехніки та автоматики (CAR, UPM-CSIC, Іспанія) більш ефективно виконує реабілітаційне лікування хворих із травмами плеча (рис. 12).

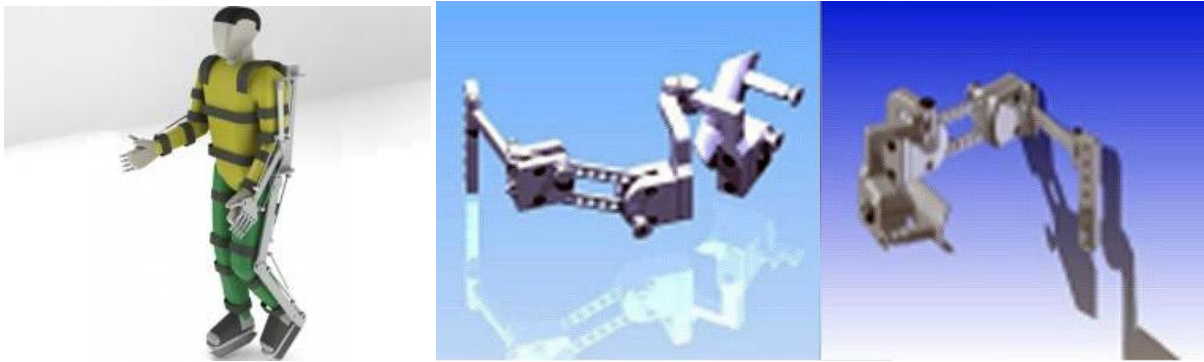


Рис. 12. Роботизований екзоскелет для реабілітації плеча

За допомогою датчиків сили й руху, система оцінює ступінь травми та її зміну в процесі реабілітації, вона проста у використанні та легко адаптується для будь-якого пацієнта. Реабілітаційні процедури у виконанні інтелектуальних роботехнічних систем повинні скорочувати час відновлення пацієнтів. Однак існує дуже мало подібних систем для відновлення після травми плеча. Цей роботизований екзоскелет вигідно відрізняється тим, що, крім скорочення часу відновлення після травми, він оцінює й реєструє плин усього реабілітаційного процесу.

Проте імітації скелетно-кісткової системи не достатньо для розробки такого екзоскелета. Він повинен ще включати як повну кінематичну, так і динамічну моделі, що враховують особливості кісткової системи, м'язів, сухожиль і зв'язок. Ці елементи містять нові інтелектуальні роботехнічні системи. Цей екзоскелет простий у використанні й адаптується до будь-якого пацієнта, урахує взаємодію багатьох компонентів – скелета, м'язів і зв'язок. Створена система може допомогти в удосконаленні реабілітаційних засобів.

Реабілітаційний роботизований костюм Harmony [4, 36] призначений для відновлення пацієнтів після травми хребта (рис. 13). Дотепер реабілітаційні екзоскелети були тільки однорукими й не могли забезпечити одночасне навчання двох рук, що дуже потрібно для пацієнтів, які відновлюють координацію для своїх щоденних завдань. Дослідники Університету штату Техас в Остіні (США) створили цей роботизований дворукий екзоскелет, що використовує механічний зворотний зв'язок і дані датчиків для забезпечення реабілітації пацієнтів із травмами хребта й неврологічними захворюваннями.

Мета екзоскелета – надання повноцінної реабілітації верхній частині тіла з високим ступенем природного руху, таким чином, щоб пацієнти могли вивчати, як робити зрозумілі речі.

Цей роботизований костюм відповідає всій верхній частині тіла, з'єднуючись із пацієнтом у трьох місцях. Він має 14 осей руху й плечовий суглоб, який допомагає природним, скоординованим рухам, таким як плечолопатковий ритм, що є важливим обертальним рухом для плеча, плеча та спини, що важливо для стабільності суглоба.

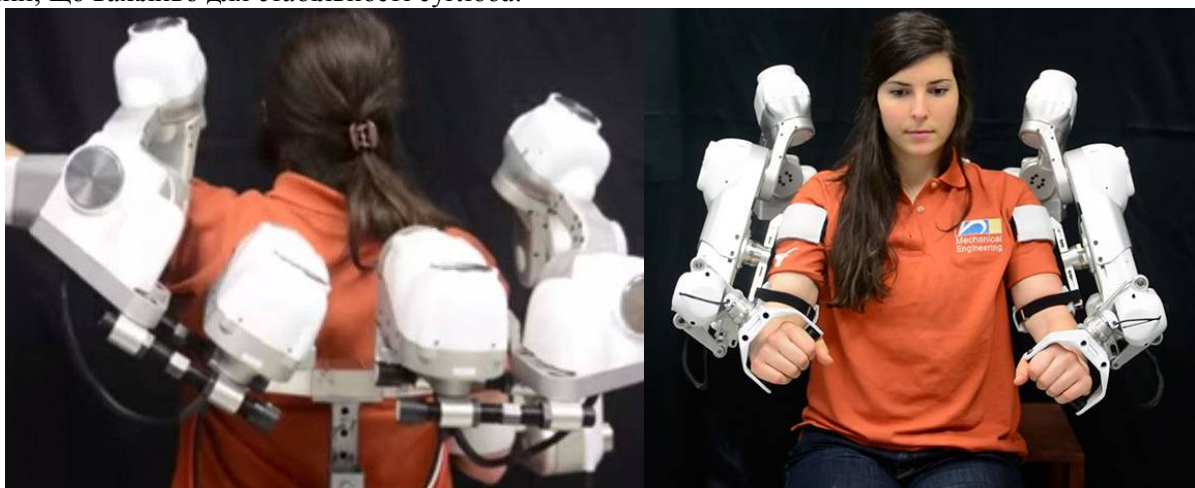


Рис. 13. Реабілітаційний роботизований костюм Harmony

Крім того, роботизований костюм забезпечує індивідуальне налаштування під конкретного пацієнта, має простий та зручний інтерфейс тиску й сили, тому людина відчуває його невагомим під час носіння.

Особливість цього роботизованого костюма – набір датчиків, які записують дані показників із частотою 2 кГц, які реєструються та використовуються програмним забезпеченням (ПЗ) екзоскелета для оперативної оцінки взаємодії роботизованої системи й пацієнта.

Цей пристрій має ПЗ, що дає змогу фахівцю застосовувати більш точну терапію, відстежувати дані щодо процесу відновлення. Під час реабілітації екзоскелет може використовувати та контролювати свої відповідні силові рівні й скрутний момент для виправлення та спрямування рухів пацієнта, забезпечуючи правильний курс фізичних вправ, навантаження яких поступово збільшується від легких до важких і покаже прогрес реабілітації. Екзоскелет не тільки пристосовується до розміру пацієнта, він може бути запрограмований, бути м'яким і ґрунтуватися на потребах індивідуальної особистості кожної людини.

Екзокостюм Superflex компанії SRI International [5, 28] являє собою еластичний роботизований екзокостюм, який може робити все, починаючи від підйому важких предметів і закінчуючи допомогою в пересуванні хворим із проблемами ОРА (рис. 14).

Замість того, щоб створювати жорсткі екзоскелети, як випливає з їхньої назви, компанія SRI застосовує м'яку роботехніку, щоб зробити легкі «екзомускули» та «екзосухожилля», що носяться. Замість наявності жорсткої металевої рами у формі людини, екзокостюм Superflex м'який, піддатливий і розумний. Він учить і адаптується до рухів носія, надаючи йому прискорення за необхідності. Його можна швидко одягти (за 5 хв) і зняти, він має відносно низьке енергоспоживання.

Екзокостюм володіє корисною перевагою: вбудовані датчики фактично вивчають природу пересування кожного окремого користувача й потім застосовує цю інформацію для активації саме в той момент, коли носієві це необхідно. У результаті термін дії акумулятора значно продовжується й на екзокостюмі розміщено менше громіздких пристроїв.



Рис. 14. Загальний вигляд роботизованого екзокостюма Superflex

У 2014 р. екзокостюм Superflex охарактеризовано як антиекзоскелет, оскільки він розміщується під одягом користувача, він тихий, зручний, синергетично співвідноситься з рухами й просто додає трохи енергії в потрібний час, знижуючи загальну кількість енергії, котру витрачає тіло користувача.

Він використовує поєднання сенсорів, електроніки, штучних «м'язів» і «сухожиль» для відстеження руху й надання їм швидких поштовхів, які підтримують руки, ноги або тіло в потрібний час. Він дає змогу літній людині пересуватися без тростини, ходунків або рівно тримати руку, що захоплює предмети – зменшує зусилля, не обмежуючи свободу.

Еластичний роботизований екзокостюм важить кілька кілограмів, із яких третину займає акумулятор, проте, на відміну від підключених екзоскелетів, Superflex не завжди «включений».

Він спрацьовує лише тоді, коли потрібно, що дає змогу батареї діяти довше й навіть коли вона на нулі, Superflex продовжує забезпечувати повну рухливість, на відміну від жорстких моделей екзоскелетів.

Роботизований екзокостюм Superflex може допомогти людям з обмеженими фізичними можливостями, але особам із важкими патологіями, наприклад без ніг, потрібен справжній екзоскелет на заміну інвалідного крісла.

Інноваційний м'який екзоскелет, що полегшує, ходьбу [24], створено в дослідницькому інституті Вісса при Гарвардському університеті (США). Поширеність пристрою полягає в тому, що при своїй невеликій вазі він на 23 % полегшує ходьбу людини, тим самим заощаджує їй чимало енергії (рис. 15). Екзоскелет має грамотно продуманий дизайн, у стабілізації постопи задіяні численні м'язи й сухожилля. У результаті в інженерів вийшла незвичайна теорія, яка задіє спеціальні ремені, схожі на підтяжки, які кріпляться до пояса. У середньому структура економить 23 % енергії людини, але в деякі моменти вона може опускатися чи підвищуватися до 10–38 %. Дослідники стверджують, що потрібно досягти ефективної роботи екзоскелета від убудованих акумуляторів і ретельно опрацювати всі електронні компоненти. Планується використовувати цей екзоскелет для підтримки літніх людей і тих, які страждають від хвороби Паркінсона і подібних захворювань.



Рис. 15. Інноваційний м'який екзоскелет, що полегшує ходьбу

Портативний екзоскелет для літніх людей *Walking Assist Device* [26] компанії Honda (Японія) простий у використанні, одягається як пояс і закріплюється також на стегнах. Цей мініатюрний екзоскелет допомагає пересуватися людям з ослабленими м'язами й проблемами ОРА (рис. 16).

Його мініатюрність – заслуга невеликої та легкої системи управління й плоских безщіткових електромоторів, розроблених самою компанією. Оптимальну допомогу для людини апарат розраховує за показниками датчика кута відхилення стегна.



Рис. 16. Загальний вигляд портативного екзоскелета для літніх людей

Розроблено три варіанти екзоскелета, що трохи відрізняються розмірами, для того, щоб його могли зручно адаптувати до себе люди різного зросту. Середній екзоскелет важить усього 2,8 кг. Два інші – трохи більше й трохи менше. Працює екзоскелет від літєво-іонних батарей, однієї зарядки вистачає на дві години безперервної ходьби зі швидкістю 4,5 км/год.

Носимий робот-екзоскелет *Phoenix* [22] компанії SuitX (США) представлено в лютому 2016 р., він істотно відрізняється від дорогих і масивних аналогів. Пристрій вагою 12 кг дає змогу людині з паралічем нижніх кінцівок самостійно ходити (рис. 17). Ідея, що лягла в основу екзоскелета, означає, що, замість того, аби розміщувати електромотори (актуатори) в кожному зчленуванні (як зроблено в більшості екзокостюмів), розробники Phoenix обмежилися двома моторами на стегнах, відчутно знизивши вагу пристрою. Існує обмеження: пристрій не можна використовувати для підйому сходами.



Рис. 17. Загальний вигляд робота-екзоскелета Phoenix

Модульна структура дає змогу пристосувати пристрій для людини будь-якої ваги, висоти й розміру ноги. Цікавий підхід до управління: замість складних і високотехнологічних рішень з управлінням на основі мозкових хвиль, екзоскелет покладається на контролери, які його власник утримує в руках. Кнопки, що розміщені на двох милицях, сигнали з яких передаються на актуатори, потрібні для того, щоб рухатися, зупинитися, сісти або встати. У цьому він схожий з екзоскелетом REX.

Користувач може управляти кожним кроком окремо або включити режим безперервного руху. Одягнути легкий екзокостюм можна без сторонньої допомоги за 10–15 хвилин. Для фахівця – фізичного терапевта – призначений спеціальний додаток для планшета, що дає змогу калібрувати й налаштовувати екзоскелет. Його потрібно встановити тільки на початку застосування пристрою.

В екзоскелеті можна самостійно пересуватися зі швидкістю в 1,7 км/год до чотирьох годин підряд від однієї зарядки акумулятора. Цей апарат настільки компактний, що, за бажання, його можна носити під одягом.

Не варто його й переоцінювати, оскільки маломобільним людям він не зможе замінити крісло-каталку. Проте він знімає з м'язів частину навантаження, у ньому можна піднятися на ноги й пройти.

Біонічний «робокостюм» для ніг [8] лабораторії біодизайну (Harvard Biodesign Lab) Гарвардського університету (США), яка займається розробкою «м'якої» робототехніки – «одягу», який одягають та роботах, що допомагають людям після інсульту знову встати на ноги (рис. 18).



Рис. 18. Загальний вигляд робокостюма для ніг

Крім медичних і реабілітаційних пристроїв, лабораторія створює «робокостюми», що здатні підвищити витривалість та фізичні можливості людини. Вони відрізняються м'якістю та зручністю в користуванні, допомагають пацієнтам із хворобою Паркінсона, церебральним паралічем, іншими відхиленнями, які знижують мобільність.

Пристрій діє таким чином: навколо литкових м'язів людини обертаються тканинні «браслети», з'єднані тягами з «рюкзаком» на її спині. Коли людина починає піднімати ногу, маючи намір зробити крок уперед, «рюкзак» переміщує тяги, допомагаючи власнику.

Додаткова тяга, що прикріплена до носка черевика, «напружується», щоб утримати ногу в повітрі й не дати їй зачепитися за землю. Основна перевага, заснованої на принципах «софтроботики», порівняно з відомими аналогами, полягає в малій вазі – 4,5 кг, причому цей показник можна скоротити ще більше.

Пристрій оснащений блоками інерційного вимірювання, які швидко аналізують рухи людини (мс), що є дуже хорошим результатом. Біонічний «носимий» робот не допоможе повністю паралізованій людині, на відміну від більш дорогих і важких «жорстких» аналогів, проте є доброю підмогою для літніх людей та осіб з обмеженими фізичними можливостями.

Екзоскелет для реабілітації Ekso [23] компанії Ekso Bionics (США) – це нове покоління в технологіях екзоскелетів, а саме костюм, який дає змогу людям із паралічем нижніх кінцівок устати та йти, допомагаючи переміщати ноги, підтримуючи корпус людини й баланс під час ходьби.

Ekso допомагає вийти на новий рівень можливостей реабілітації людей із наслідками інсульту, ушкоджень спинного мозку, геміпарезу та інших неврологічних захворювань, що вражають нижні кінцівки й функцію ходьби (рис. 19).

Екзоскелет використовують як тренажер для реабілітації пацієнтів із різним ступенем ураження нижніх кінцівок, відновлення навичок переміщення за допомогою апарату або самостійної ходьби.

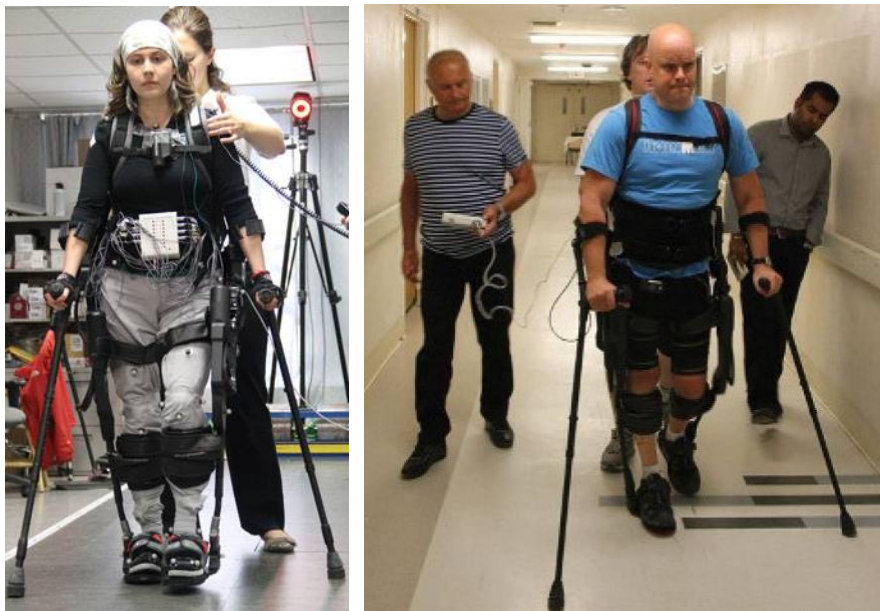


Рис. 19. Загальний вигляд надлегкого екзоскелета Ekso

Відновлення ходьби досягається завдяки самостійному переміщенню центру ваги людини або активації системи сенсорів для активації рухів елементів екзоскелета.

Для застосування екзоскелета пацієнт повинен мати достатню фізичну тренуваність верхньої частини тіла для підтримки балансу за допомогою милиць чи ходунків. Допустимий зріст пацієнта 150–190 см, вага – до 100 кг, обхват стегна – до 46 см. Пацієнт повинен підтримувати баланс сидячи, контролювати імпульси руху тіла й перенесення ваги, слідувати інструкціям і розуміти оператора, давати зворотну інформацію щодо больових та нервових відчуттів.

Перед використанням апарату потрібно проконсультуватися з терапевтом і пройти медичне обстеження. Під час обстеження оцінюють ключові показники для використання пристрою (діапазон руху, сила й тонус м'язів, рефлексія, когнітивні, комунікативні здібностей, стояння та підтримання балансу). Використання екзоскелета найчастіше відбувається під наглядом терапевта. Він одягається поверх одягу й налаштовується під фізичні дані пацієнта за 5 хв. Подібні екзокостюми використовують у реабілітаційних центрах США і Європи, власники особистих апаратів для повсякденного використання.

Існує три режими роботи: *FirstStep* – рух механічних ніг проводять під контролем терапевта за допомогою спеціального пульта. *ActiveStep* і *ProStep* – режими, у яких користувач управляє рухом за допомогою спеціальних датчиків, що приймають сигнали з тіла людини. Кожна з 2-х літій-іонних батарей (зарядка 1 год) дає змогу пристрою діяти 3–6 год залежно від інтенсивності навантаження.

Основні характеристики екзоскелета Ekso – це діапазон підтримки 0–100 % для кожної ноги з роздільним налаштуванням, контроль кроків і балансу людини; не торкається шкіри пацієнта, одягається поверх одягу й взуття; вага системи (23 кг) не лягає на пацієнта, а за допомогою конструкції переноситься на всю площину опори каркаса, стабілізує та підтримує верхню частину тіла.

Стегна екзоскелета незалежні одне від одного, що дає змогу швидко й легко одягати та знімати його; кульшові та колінні приводи, із сервоприводом на стегнах і колінах для імітації дії м'язів.

Датчики забезпечують зворотний зв'язок для регулювання загального згинання та розгинання суглобів, залежно від їх позиції на цей момент; система має два комплекти акумуляторів, що заряджаються для підтримки безперервної роботи не довгий час, є два мікропроцесори для зв'язку, 38 блоків датчиків й елемент управління, який обчислює та обробляє сигнали; над'яtkово-гомiлкові суглоби використовують шарнірні з'єднання з титану. Його конструкція полегшує ходьбу похилою площиною.

Модульний український екзоскелет UniExo [31] допомагає рухатися людям з обмеженими фізичними можливостями (паралізованими кінцівками). Автор – Антон Головаченко – 21-річний

студент 4-го курсу Національного авіаційного університету. Розроблена програма налаштовується під потреби кожної людини й допомагає їй пересуватися. Управляється екзоскелет за допомогою нейрошлема або нейробрасслетів (рис. 20).

У комплектацію екзоскелета входять сенсори, сервоприводи, контролери та ПЗ, яке налаштовується за 5 хв відповідно до особливостей пацієнта. Конструкція UniEхо складається з роботизованих елементів, серводвигунів, датчиків і програмного блоку управління. Саме через блок управління на мові С або NXT відбувається програмування екзоскелета на певну програму реабілітації.



Рис. 20. Автор з українським зразком екзоскелета UniEхо

Основна цінність екзоскелета полягає в тому, що він допомагає людині відтворювати характерні саме для неї біомеханічні функції частин тіла, стимулюються м'язи для відновлення повноцінних рухів кінцівок.

Реабілітаційний екзоскелет Tibion Bionic Leg [29] фірми Tibion Corporation (США) призначений для людей з артритом, порушеннями функції м'язів, після серйозних хірургічних утручань й інсульту, наслідками апоплексичного удару, який може знерухомити людину (рис. 21).

Одним із найбільш прогресивних на сьогодні апаратів для реабілітації є ножний екзоскелет. Програмна платформа, що керує роботизованим апаратом, оптимізована для всіх наведених вище хвороб. У взуттєвій частині конструкції екзоскелета наявні сенсори тиску, що вимірюють навантаження, створене пацієнтом, у кожен проміжок часу.



Рис. 20. Реабілітаційний екзоскелет Tibion Bionic Leg

Ці дані надходять до вбудованого мікрокомп'ютера, що динамічно визначає величину зусилля, необхідного для підтримки й величину кута в колінному суглобі екзоскелета для забезпечення нормального пересування пацієнта.

Екзоскелет-костюм H-Lex для людей з обмеженими здібностями [32] компанії Hyundai, Південна Корея (рис. 21). Його вага не перевищує 60 кг (залежно від комплектації).

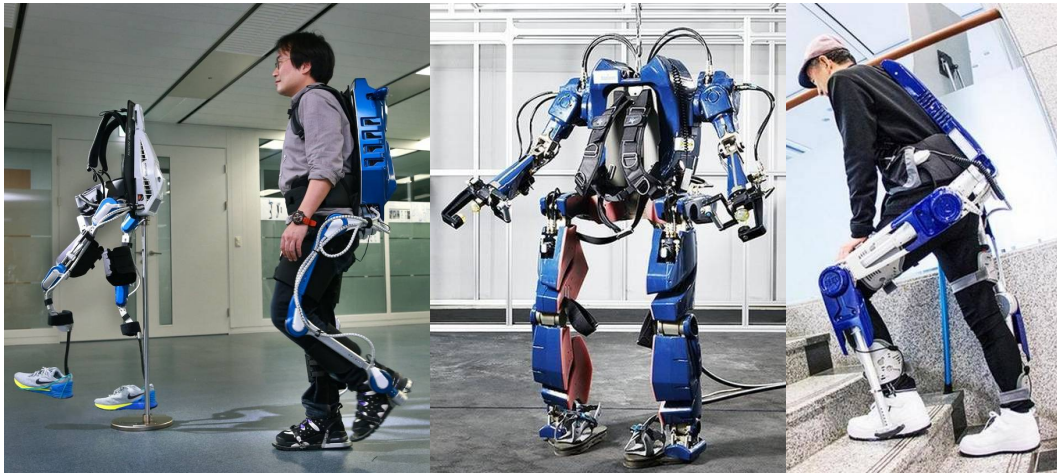


Рис. 21. Реабілітаційний екзоскелет-костюм H-Lex

На сьогодні представлено дві моделі екзоскелета: робоногі надягають на ноги, допомагаючи рухатися людям, які не можуть робити це самостійно; конструкція закриває кінцівки й спину, пристрій виконує багато функцій для забезпечення реабілітаційних технологій для людей після перенесених травм.

Він може використовуватися як помічник із догляду за людьми похилого віку або постраждалими в катастрофах. Екзоскелет H-Lex видається важкуватим, але під час дії ним легко керувати, він повністю повторює рухи людини.

Роботизований екзоскелет UPnRIDE [21] компанії Argo Medical Technologies (Ізраїль) створений для людей, які не володіють кінцівками, а його використання допомагає інвалідам нормально функціонувати в положенні сидячи й стоячи, де б вони не були (рис. 22). Новітній винахід для вертикалізації паралізованих людей від розробника ReWalk – це роботизований інвалідний візок UPgRADE. В епоху розвитку «розумних» і роботизованих інвалідних візків існує безліч інновацій, що дають змогу людям, які позбавлені можливостей рухати нижніми або верхніми кінцівками, перестати відчувати себе неповноцінними.



Рис. 22. Роботизований екзоскелет UPnRIDE

Одна з таких інновацій – роботизований екзоскелет UPgRIDE, винахід ізраїльського вченого Аміта Гофера з компанії Argo Medical Technologies. Передові технології та обробка даних про рух у режимі реального часу дають можливість людині зберігати рівновагу під час переміщень у різних умовах – підйому, спуску, поворотів тощо.

Шарнірні підпірки й ремені забезпечують пацієнтові підтримку під час переходу від положення «сидячи» до положення «стоячи» та назад. Практично повна безпека гарантується, забезпечуючи пересування і в замкнутому, і у відкритому просторі (рис. 23).

Зазвичай паралізованим пацієнтам доводиться вести практично нерухомий спосіб життя, перебуваючи в ліжку або візку. У результаті в них з'являються додаткові проблеми зі здоров'ям, наприклад пролежні. Рух у стоячому положенні за допомогою нового апарату істотно зменшує ризик виникнення таких проблем. Заміна традиційних інвалідних візків на цей пристрій – величезний прорив у цій частині медичного обладнання.

Серед можливостей UPgRIDE є такі: пристрій поліпшує якість життя людям із розсіяним склерозом, ДЦП, спинальними та функціональними порушеннями внаслідок травматичних ушкоджень мозку, допоможе тим, хто не володіє нижніми кінцівками, і тим, хто паралізований вище пояса. Він потрібен для покращення кровообігу й щільності кісткової тканини інвалідів-візочників.



Рис. 23. Роботизований екзоскелет UPgRIDE

Пристрій унікальний тим, що він залишається в стабільному положенні незалежно від поверхні, по якій рухається (нерівна, похила), залишиться вертикально до землі. Таким чином, зберігається центр ваги, що уможливорює повну мобільність людини, котра користується пристроєм у положенні стоячи.

Крім механізму автоматичного балансу, в екзоскелета є подушки безпеки. Пристрій легко трансформується з положення сидячи в положення стоячи й навпаки. Його кріплення надійні та зручні для користувача. Із положення сидячи в положення стоячи крісло трансформується одним натисканням кнопки. Гіроскоп і спеціальне ПЗ допомагає контролювати рух пристрою у вертикальному положенні по поверхні. Роботизований екзоскелет оснащений механізмом автоматичного балансу та пристроями безпеки. Кріплення на ньому відрізняються високою надійністю й зручністю для інваліда. Нині роботизований екзоскелет перебуває на стадії створення прототипу. Його поява на медичному ринку очікується приблизно через два роки.

Stentrode – імплант «Мозок-машина» [9] (Австралія), який управлятиме екзоскелетом (рис. 24). Фахівці багатьох країн працюють над створенням реабілітаційних екзоскелетів і нейромостів, що допомагатимуть інвалідам у реабілітації. Імплант Stentrode дасть змогу допомагати паралізованим людям управляти екзоскелетом, оскільки не всі хворі можуть управляти джойстиком. Та й сила думки куди швидша, ніж механічне управління, тим більше, коли ти людина з обмеженими здібностями.

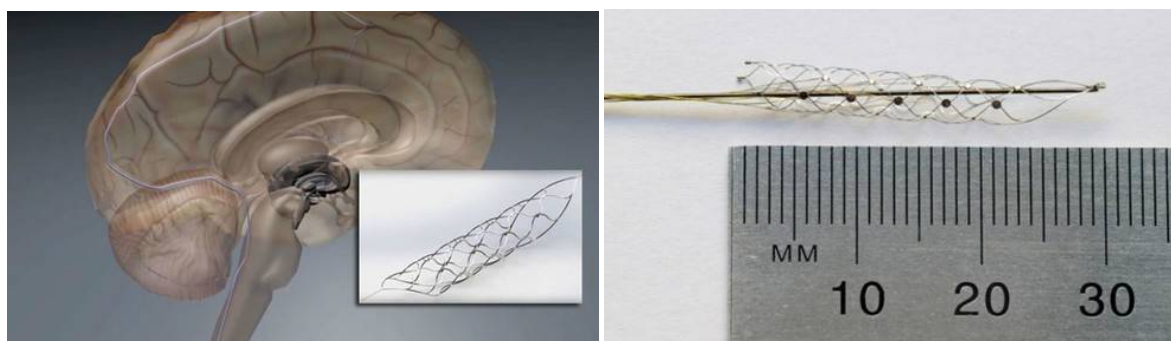


Рис. 24. Stentrode: імплант «Мозок-машина» розміром із сірник (праворуч) імплантується в кровоносну судину

Пристрій, що одержав назву *стентрод*, пережив сотні конструктивних змін, перш ніж усі вимоги виявилися задоволені. Стентрод виготовляється з нітінолу, сучасного сплаву нікелю й титану, складається з електрода на стенті, що імплантується в кровоносну судину пацієнта, та передавача, котрий вводиться під шкіру в передній частині плеча. Пацієнти, які використовують стентрод, зможуть ходити за допомогою екзоскелетів. Пристрій здатний утілювати думки в дії, зчитуючи певні типи сигналів від нервової тканини та передаючи отриману інформацію в процесор. Убудований в екзоскелет мікрокомп'ютер потім передає команди для переміщення кінцівок власника за допомогою екзоскелета або керованого протеза руки чи ноги.

За розміром стентрод, який абсолютно безпечний для людини, можна порівняти із сірником або скріпкою; для його імплантації не потрібна серйозна операція. До місця постійної роботи хірурги доставлять його через катетер, уставлений в артерію ноги. Доклінічні випробування з використанням овець продемонстрували його біологічну сумісність, здатність захоплювати високоякісні (до 190 Гц) сигнали моторної кори мозку. Раніше подібних результатів удавалося досягти лише за допомогою

складних хірургічних імплантацій. Кожен стентрод зчитує електричну активність із ~ 1000 нейронів, а потім транспортує ці сигнали з мозку через шию бездротовою системою до імплантата в передній частині плеча. Потім інформація перетворюється в команди для екзоскелета або протеза. За словами розробників, для руху пацієнтам не потрібно буде докладати особливих зусиль.

Першими пацієнтами стануть молоді люди з важкими травмами спинного мозку, які керуватимуть екзоскелетом для ніг. Вони спостерігатимуться лікарями 0,5–1 року до імплантації. На думку вчених [9], це потрібно, щоб перевірити, як організм впорається з хірургічним утручанням і наскільки складним буде відновний період, а першу імплантацію пристрою планується провести в Мельбурнському королівському шпиталі у 2017 р.

Реабілітаційний екзоскелет Екзоатлет [5, 30] компанії «Екзороботикс» призначений для допомоги людям з обмеженими фізичними можливостями (рис. 25). Він дає змогу вставати, сідати й ходити людям із повним паралічем нижніх кінцівок, може використовуватися для медичної та соціальної реабілітації осіб із порушеннями опорно-рухових функцій.

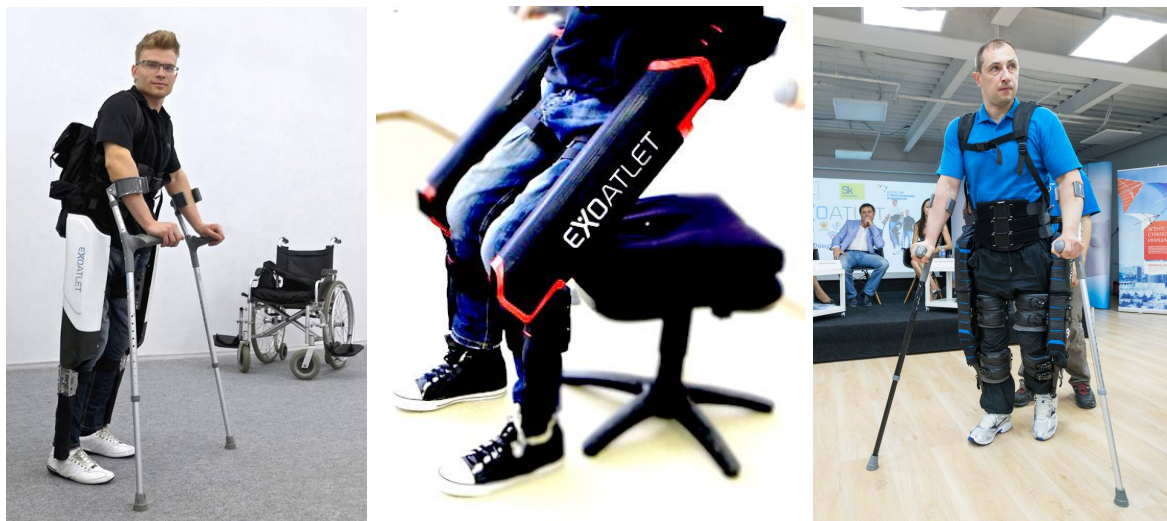


Рис. 25. Реабілітаційний екзоскелет Екзоатлет

Екзоатлет являє собою інтеграцію людини й робота, що призначений для вертикалізації та ходьби пацієнта з локомоторними порушеннями нижніх кінцівок, для пацієнтів широкого спектра захворювань, а систему управління побудовано на сигналах силомоментних датчиків й ЕКГ. Алгоритми управління можна здійснювати в автоматичному режимі пересування пацієнта з повторенням максимально природного патерну ходьби людини, що дає змогу прискорити процес відновлення рухової та нервової активності, допомагає паралізованим пацієнтам навчитися заново тримати рівновагу й почати ходити протягом двох тижнів.

Екзоатлет, котрий управляється за допомогою м'язових сигналів, не єдина модель екзоскелетів. Інша його версія – *ExoAtlet Albert II*. Вона допоможе людям із нижньою параплегією не тільки вставати, але й ходити по похилій поверхні, самостійно сідати. Проводяться доклінічні випробування нового екзоскелета *ExoLite*, а вчені Нижегородського нейронаукового центру, НДІ фізико-технічного інституту ім. М. І. Лобачевського створюють екзоскелет, керований мозко-машинним інтерфейсом – за допомогою сили думки. Створюваний активний ортез кріпиться на колінний суглоб й автоматично згинає-розгинає ногу, тим самим прискорюючи реабілітацію рухових функцій коліна пацієнтів. Розробники використовують гібридний метод для виявлення фази кроку та кута згинання коліна, заснований на датчиках на стопі й *темс*-чіпах (акселерометр, гіроскоп і магнітометр).

Це дає змогу прогнозувати, коли слід управляти приводами ортеза. Сам метод досить універсальний і допомагає з мінімальними настройками адаптуватися під будь-яку людину. Крім того, якщо вчені стикаються з ураженням головного мозку, то їм просто нема звідки взяти потрібні дані для роботи екзоскелета. У всіх інших випадках нервові імпульси можна зчитувати з уцілілих частин нервової системи. При цьому можна створити спеціалізовані прилади для лікування таких хвороб, як хвороба Паркінсона. Хоча дешевше й ефективніше використовувати універсальні конструкції для великого списку хвороб: у цьому випадку прилади зможуть повернути людину до практично повноцінного життя.

Екзоскелет «Attached Robotic Unit Knee-Ankle-Foot Orthothesis» (Японія) для однієї ноги [25] допоможе ходити пацієнтам із травмою коліна. Учені Японії розробили роботизований ортез для людей з травмою коліна. Зовні він нагадує екзоскелет для однієї ноги, а по суті, і є ним (рис. 26).

Він складається з модуля мотора й сенсора, який кріпиться до ортеза, закріпленого на коліні, гомілці та ступні для того, щоб допомагати пацієнтові рухати ногою під час ходьби. На рис. 26 зліва бачимо сам протез і його варіацію з додаванням розробленого модуля.



Рис. 26. Реабілітаційний екзоскелет для однієї ноги

Модуль можна закріпити на будь-якому ортезі відповідного типу, щоб зробити зі звичайного ортеза роботизований, що допомагає ходити. Екзоскелет підходить для використання на будь-якій нозі. Виконуються роботи з модернізації ПЗ пристрою, щоб навчати пристрій різних рухів включаючи підйом і спуск сходами, а також функціонування з різними травмами, включаючи наслідки інсульту, травми хребта, при церебральному паралічі.

Дитячі екзоскелети. Спинальна м'язова атрофія (СМА) є одним із найважчих спадкових дитячих дегенеративних нервово-м'язових захворювань, незважаючи на те, що вона є рідкісним захворюванням, але призводить до високої смертності серед дітей. Фахівці Іспанського національного дослідницького консиліуму створили **унікальний екзоскелет для дітей віком 3–14 років**, які страждають на СМА (рис. 27). Він важить близько 12 кг, виконаний із титану й алюмінію, його каркас складається з опорних стрижнів, довжина яких підбирається індивідуально, залежно від розміру частин тіла дитини [33].

У «суглобах» конструкції встановлено двигуни (по п'ять на кожній нозі), які імітують роботу м'язів людини та задають силу, потрібну для пересування у вертикальному положенні. Екзоскелет оснащений датчиками, контролерами руху й акумулятором, що забезпечує до п'яти годин безперервної роботи.

Головною проблемою під час виготовлення цього дитячого екзоскелета є те, що симптоми захворювання можуть змінюватися з часом, як і пропорції тіла дитини, тому важливо, щоб екзоскелет міг самостійно адаптуватися до цих змін. Модель має інтелектуальні «суглоби», що автоматично змінюють жорсткість й адаптуються до свого власника.



Рис. 27. Реабілітаційний екзоскелет для дітей зі СМА

Конструкція екзоскелета має обмеження, оскільки кожному двигуну потрібний простір для роботи, довжина ноги не може бути меншою від визначеного розміру. Існують обмеження за віком,

оскільки діти віком до трьох років часто здійснюють непередбачувані мимовільні рухи, які можуть бути несумісні з коректною роботою апарату.

Роботизований екзоскелет-повзунок SIPPC [35] допоможе малюкам із ризиком ДЦП. Інженери Університету Оклахоми представили третє покоління експериментального роботизованого пристрою для допомоги немовлятам із ризиком розвитку ДЦП.

Пристрій SIPPC (Self-Initiated Prone Progression Crawler, що перекладається як «автоматичний лежачий повзунок») призначений для розвитку мозку й удосконалення рухових навичок дітей у критичний період розвитку (2–8 місяців). Пристрій допомагає малюкові вдосконалювати свої моторні та когнітивні навички.

Реабілітологи стверджують, що в цьому віці корекція симптомів ДЦП найбільш ефективна, оскільки відбувається інтенсивний розвиток моторної системи й пов'язаних із нею когнітивних процесів. Сам діагноз ставиться дітям лише після одного року (раніше виявити захворювання складно).

Роботизований екзоскелет SIPPC являє собою м'яку підкладку для дитини, яка пересувається за допомогою трьох коліс. Комплект із 12 датчиків руху й набір камер постійно реєструє рухи під час повзання в трьох вимірах (рис. 28). При цьому на голову малюка одягають шолом з електродами, які фіксують активність відповідних областей мозку. Інформація потім надходить на комп'ютер, алгоритм машинного навчання аналізує рухи дитини й допомагає їх виконати, даючи позитивний зворотний зв'язок і закріплюючи моторні навички.

Перші пілотні дослідження цього екзоскелета завершилися успішно. Тепер проводяться клінічні випробування, у яких беруть участь 56 дітей із ризиком розвитку ДЦП віком 4–8 місяців. Експеримент триватиме 6–9 місяців, потім учені приступлять до обробки зібраної інформації.



Рис. 28. Роботизований екзоскелет SIPPC для малюка

Розробники відзначають [38], що після первинного підтвердження ефективності цієї методики до них звертаються батьки з проханням продати їм унікальний «екзоскелет-повзунок».

Мобільна sling-система «ВІТАЛАЙТ» із коригувальним екзоскелетом [36] – це інноваційна технологія з використанням методу кінематичної модуляції (КМ) для навчання самостійної ходьби первинно не вертикалізованих дітей із важкими порушеннями функцій нервової системи й ОРА за умови можливості виконання ними крокових рухів із будь-яким видом підтримки (рис. 29).

Суть методу полягає в тому, що під час здійснення крокових рухів в активному або пасивно-активному режимі в коригувальному екзоскелеті з одночасним впливом регульованого парціального зниження ваги, у ЦНС дитини формуються слідові рухові образи, що наближені до фізіологічних.



Рис. 29. Мобільна sling-система «ВІТАЛАЙТ» з екзоскелетом

Часткове гравітаційне розвантаження сприяє зниженню негативного впливу на довільну рухову активність дитини порушень м'язового тону, своєчасно не скорочених позно-тонічних рефлексів або компонентів примітивних локомоторних патернів при їх переважанні в руховому стереотипі пацієнта. Регульоване вагове розвантаження сприяє також менш значній активації м'язового (stretch-) рефлексу під час корекції екзоскелетом патологічних установок сегментів ОРА – тулуба й нижніх кінцівок. Метод КМ передбачає застосування спеціально розробленої мобільної sling-системи «ВІТАЛАЙТ» в індивідуальному режимі під контролем методиста.

Тривалість одного лікувального тренування становить 20–40 хв залежно від вихідних рухових можливостей та толерантності дитини до фізичного навантаження. Курс лікування включає 15–20 тренувань. Перед кожним тренуванням проводиться сегментарно-диференційований масаж для підготовки м'язової тканини до дії системи. Після тренування потрібні лікувальні укладки із застосуванням ортопедичних виробів та/або обтяжень. У високомотивованих дітей віком п'ять років і старше зі збереженим інтелектом можливе застосування вертикальних лікувальних укладок.

Конструкція системи являє собою рухому стійку із закріпленням на ній жорстким підвісом, який сполучений із корсетом екзоскелета. Дитина поміщається в екзоскелет, що являє собою модульний двосторонній ортопедичний апарат на всю ногу з груднопоперековим корсетом. Апарат коригує патологічні установки тулуба (кіфоз, лордоз, ретро- або антефлексія) і нижніх кінцівок (приведення стегна, торсійні установки та рекурвація гомілки, еквінус, плановальгус, варус стопи) і зберігає можливість руху кожного сегмента нижніх кінцівок у межах регульованого обсягу.

Регулювання ортопедичного апарата проводиться безпосередньо на дитині. Основа стійки системи оснащена колесами зі стопорами. Дитина може вільно пересуватися в системі, за необхідності утримуючись руками за поперечну перекладину стійки. Можлива також установка системи на тренажер – електромеханічну бігову доріжку для ходьби в заданому темпі по її полотну. Висота рухомої стійки вибирається залежно від росту дитини. Підвіс з'єднаний зі стійкою за допомогою регульованого шарніра, який забезпечує обертання екзоскелета навколо вертикальної осі підвісу в межах будь-якої з чотирьох чвертей горизонтальної площини.

Регулюванням довжини підвісу забезпечується ступінь зменшення ваги дитини. Курс лікувальних тренувань у системі в межах методу КМ може бути продовжений в адаптованих дітей у домашніх умовах у режимі періодичного застосування 2–3 рази на тиждень із контролем фахівцем регулювання екзоскелета й ступеня зменшення ваги дитини – не рідше одного разу на чотири місяці. Для коректного регулювання екзоскелета для дітей зі спастичним підвивихом стегна або аддукторним синдромом потрібне регулярне рентгенологічне дослідження кульшових суглобів – рентгенографія в передньозадній проекції – не рідше одного разу на рік.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведення ефективної допомоги паралізованим пацієнтам після перенесеного інсульту, пошкоджень хребта, за наявності обмежених функцій ОРА під час лікування та реабілітації за різних захворювань і пошкоджень у пацієнтів здійснюється за допомогою різноманітних типів екзоскелетів.

Наведений аналіз функціональних і конструктивних особливостей сучасних та перспективних реабілітаційних екзоскелетів дає підставу для висновку про те, що їх застосування підвищить ефективність допомоги паралізованим пацієнтам після перенесеного інсульту, черепно-мозкових травм, пошкоджень хребта, за наявності обмеження функцій ОРА під час лікування й реабілітації в разі різних захворювань і пошкоджень.

Джерела та література

1. Архипов М. В. Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине / М. В. Архипов, В. Ф. Головин, В. В. Журавлев // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 8. – Москва, 2011. – С. 42–50.
2. Вукобратович Миомир. Активная экзоскелетная система и начало развития человекоподобных роботов / Miomir Vukobratović, Director Robotics Center. – Mihailo : Pupin Institute, 2011. – 23 с.
3. Методы биомехатроники тренажера руки человека / А. К. Платонов [и др.] // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2012. – № 82. – 40 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-82>
4. 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.
5. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов / А. А. Воробьев, А. В. Петрухин, О. А. Засыпкина, П. С. Кривоножкина, А. М. Поздняков // СТМ. – 2015 – Т. 7, № 2. – С. 182–197.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.infuture.ru/article/1964> – Экзоскелет HAL-5 Type-B.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://robotics.ua/news/prototypes/5648prodvinutyy_reabilitacionnyj_ekzoskelet_iz_bejhanskogo_universiteta – Реабілітаційний екзоскелет Бейханського університету.

8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://biodesign.seas.harvard.edu/soft-exosuits> – Біонічний «робокостюм» для ніг.
9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://komodo74.com/reabilitaciya/stentrode-implant-mozg-mashina-budet-upravlyat-ekzoskeletom.html> - Stentrode: імплант «Мозок-машина».
10. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://neinvalid.ru/legchajshij-ekzoskelet-poyavitsya-v-prodazhe-uzhe-cherez-god/> – Екзоскелет Indego.
11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://walk-again.ru/reabilitaciya_hal/ - Екзоскелети HAL.
12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.membrana.ru/particle/12486> – Екзоскелет Walking Assist Device.
13. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://travmapedia.ru/news/4759-ekzoskelet-budushhee-kotoroe-uzhe-nastupilo> – Екзоскелет: майбутнє, що вже наступило.
14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.vesti.ru/doc.html?id=933299> – Екзоскелет NASA X1.
15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://robotics.ua/news/health/925kickstart_exoskeleton_of_cadence_biomedical_uses_kinetic_energy_to_help_people_withwalking – Екзоскелет Kickstart.
16. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://dobrinya.tiu.ru/g7237194-reabilitatsionnye-ekzoskelety-dlya> – Екзоскелети REX.
17. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.infuture.ru/article/3677> – Екзоскелет-система eLEGS.
18. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://hi-news.ru/technology/ekzoskelet-rewalk-dlya-paralizovannyh-lyudej-postupil-v-svobodnyu-prodazhu-v-ssha.html> – Екзоскелети ReWalk.
19. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://iscience.ru/2012/08/29/ekzoskelety-upravlyaemye-siloy-mysli-pomogut-lyudyam-posle-insulta/> – Екзоскелет МАНИ-ЕХО II.
20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://robotics.ua/news/prototypes/1798exoskeleton_mindwalker_from_space_applications_services_to_help_paralyzed_people_walk_again – Екзоскелет Mindwalker.
21. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://msgmedical.ru/news/izobreten-robotizirovannyj-ekzoskelet-kotoryj-zamenit-konechnosti-u-invalidov.html> – Екзоскелет UPnRIDE.
22. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://rb.ru/story/suitx-phoenix-exoskeleton/> – Екзоскелет Phoenix.
23. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://med-equip.com.ua/p86032134-ekzoskelet-dlya-reabilitatsii.html> – Екзоскелет для реабілітації Ekso.
24. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://hightech.fm/2017/01/20/soft-robot-exosuits> – Інноваційний м'який екзоскелет, що полегшує, ходьбу.
25. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://geektimes.ru/post/272528/> – Екзоскелет для однієї ноги.
26. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://compvideos.com/device/walking_assist_device_ekzoskelet_ot_honda – Екзоскелет Walking Assist Device.
27. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.robogeeek.ru/ekzoskelety-protezy/robotizirovannyj-ekzoskelet-dlya-reabilitatsii-plecha> – Роботизований екзоскелет для реабілітації плеча.
28. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.gizmonews.ru/2016/06/06/ekzokostyum-superflex-izuchaet-dvizheniya-polzovatelya/> – Екзокостюм Superflex.
29. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://novostey.com/science/news322888.html> – Реабілітаційний екзоскелет Tibion Bionic Leg.
30. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.exoatlet.ru> – Екзоскелет для реабілітації ЕкзоАтлет.
31. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ecotechnica.com.ua/technology/1735-ekzoskelet-ukraintsya-lidiruet-v-konkurse-startapov-robot-launch-2016-video.html> – Український модульний екзоскелет UniExo.
32. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://nbiplus.com/idea/ekzoskelet-h-lex-kostyum-dlya-oblegcheniya-fizicheskogo-truda> – Екзоскелет H-Lex.
33. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2763904&cid=2161> – Іспанський дитячий екзоскелет при СМА.
34. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ogonek.org/sciencebase/Metod-kinematicheskoj-moduljatsii/> – Мобільна sling-система «Віталайт» з екзоскелетом.
35. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2782669> – Роботизований екзоскелет-пластунець.
36. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.mforum.ru/news/article/111578.htm> – Екзоскелети роботизовані.

Анотації

*У статті розглянуто функціональні та конструктивні особливості реабілітаційних екзоскелетів. **Мета роботи** – аналіз функціональних і конструктивних особливостей сучасних та перспективних екзоскелетів для застосування в реабілітаційних технологіях.*

***Ключові слова:** реабілітація, екзоскелет, костюм-екзоскелет, роботи, опорно-руховий апарат, пошкодження, захворювання.*

Юрій Попадюха, Реабилитационные экзоскелеты – современность и перспективы применения. В статье рассмотрены функциональные и конструктивные особенности реабилитационных экзоскелетов. Цель

работы – анализ функциональных и конструктивных особенностей современных и перспективных экзоскелетов для применения в реабилитационных технологиях.

Ключевые слова: реабилитация, экзоскелет, костюм-экзоскелет, роботы, опорно-двигательный аппарат, повреждения, заболевания.

Iurii Popadiukha. Rehabilitation Exoskeletons – Modernity and Prospects of Application. Functional and constructive features of rehabilitation exoskeletons are considered in the article. The aim of the work is to analyze the functional and design features of modern and promising exoskeletons for use in rehabilitation technologies.

Key words: rehabilitation, exoskeleton, exoskeleton suit, robots, musculoskeletal system, injuries, diseases