

Голові разової спеціалізованої вченої ради
PhD 15020
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професору
Литвиненку Ярославу Володимировичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата технічних наук, доцента
Білошицької Оксани Константинівни
на дисертаційну роботу **Ковалика Сергія Васильовича**
**«Методи та засоби відбору й обробки біосигналів для задачі керування
біонічним протезом кисті людини»,**
подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії
галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія»
спеціальності 163 «Біомедична інженерія»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної біомедичної інженерії є створення високофункціональних біонічних протезів верхніх кінцівок, здатних забезпечувати виконання рухових функцій, максимально наближене до природного. Особливої актуальності ця проблема набула в останні роки у зв'язку зі зростанням потреби в сучасних засобах протезування та реабілітації осіб, які втратили верхню кінцівку або її частину внаслідок травм, захворювань чи бойових дій.

Дисертаційна робота Ковалика Сергія Васильовича присвячена розв'язанню актуального наукового завдання біомедичної інженерії — розробленню методів і засобів відбору й інтегрованої обробки біосигналів для керування біонічним протезом кисті людини. Обрана проблематика перебуває на перетині цифрової обробки біомедичних сигналів, біомехатроніки, теорії автоматичного керування, сенсорних технологій, реабілітаційної інженерії та людино-машинної взаємодії.

Актуальність дослідження визначається як загальносвітовою потребою у створенні функціональних, надійних і доступних протезів верхніх кінцівок, так і особливо гострою потребою України в сучасних технологіях протезування та реабілітації осіб з ампутаціями. Для біонічних протезів кисті важливим є не лише механічне відтворення рухів, а й забезпечення інтуїтивно зрозумілого керування, стійкого до впливу шумів і артефактів, а також реалізація сенсорного зворотного зв'язку, необхідного для визначення моменту контакту, оцінювання контактної взаємодії з об'єктом та корекції керуючих впливів.

Обґрунтованим є зосередження здобувача на поєднанні двох інформаційних каналів: сигналів поверхневої електроміографії як джерела інформації про моторний намір користувача та п'єзоелектричних сигналів як

джерела інформації про контактну взаємодію протеза з об'єктом. Такий підхід відповідає сучасній парадигмі побудови замкнених систем біокерування та створює передумови для підвищення точності, плавності й стабільності функціонування протезної системи.

Отже, тема дисертаційної роботи є актуальною з наукового і практичного погляду, належно обґрунтованою та відповідає сучасним завданням біомедичної інженерії.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертацію виконано відповідно до наукового напрямку кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та в межах наукової школи «Математичне моделювання та обробка техногенних та природних складних сигналів». Робота пов'язана з науково-дослідною темою «Біонічний протез кисті руки на основі ендоскелета» (номер державної реєстрації 0125U003760). Зміст дослідження узгоджується із завданнями зазначеної теми, оскільки охоплює побудову структури системи біокерування, розроблення засобів реєстрації сигналів, математичне моделювання, алгоритмічну обробку та експериментальну перевірку працездатності запропонованих рішень.

3. Короткий аналіз змісту дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 113 найменувань, і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 223 сторінки, з яких 160 сторінок основного тексту. Дисертація містить 62 рисунки та 11 таблиць. Її структура відповідає логіці інженерного дослідження та забезпечує послідовне розкриття поставленого наукового завдання.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, висвітлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено його об'єкт і предмет, охарактеризовано використані методи, наведено положення наукової новизни та практичне значення одержаних результатів. Подано відомості про особистий внесок здобувача, апробацію, публікації та впровадження результатів дисертаційного дослідження.

У першому розділі проаналізовано біомеханічні особливості кисті людини як об'єкта технічного відтворення, сучасні концепції реалізації сенсорного зворотного зв'язку, методи й засоби реєстрації сигналів поверхневої електроміографії та основні підходи до керування біонічними протезами. Розглянуто пряме амплітудне керування, керування на основі кінцевих автоматів, методи розпізнавання образів і регресійні підходи. Автором здійснено їх порівняння за функціональними можливостями, обчислювальною складністю, часовою затримкою та придатністю до практичної реалізації. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано доцільність поєднання прямого міоелектричного керування з багатоканальною реєстрацією біосигналів і сенсорним зворотним зв'язком.

У другому розділі запропоновано структуру інтегрованої адаптивної системи керування, в якій сигнали тактильних сенсорів використовуються для реалізації сенсорного зворотного зв'язку та корекції керувальних впливів. Обґрунтовано вибір проєкту протеза Kinetic Hand, конструкторська документація якого перебуває у відкритому доступі, виготовлено його прототип і виконано конструктивне удосконалення. Описано розроблену мультиелектродну систему реєстрації поверхневих електроміографічних сигналів, електронний тракт їх підсилення і фільтрації, інтеграцію п'єзоелектричних сенсорів у конструкцію протеза та методику синхронної реєстрації електроміографічних і п'єзосигналів із використанням принципу дзеркальних рухів.

У третьому розділі досліджено часові, статистичні, спектральні та кореляційні властивості зареєстрованих електроміографічних і п'єзосигналів, сформовано їх математичні моделі та побудовано інтегровану модель системи керування. Розроблено метод обробки біосигналів у ковзних часових вікнах, обґрунтовано використання каузального формування огинаючої на основі рекурсивного згладжування та запропоновано алгоритм формування керувальної напруги. Алгоритм ураховує результати інтегрованої обробки біосигналів і динамічні обмеження системи керування, забезпечуючи згладжування та обмеження амплітуди керувальних впливів. Включення до інтегрованої моделі електромеханічної частини протеза дало змогу пов'язати результати обробки біосигналів із модельованою вихідною силою захвату.

У четвертому розділі наведено результати комп'ютерного моделювання запропонованої системи керування в середовищі MATLAB із використанням експериментально зареєстрованих електроміографічних і п'єзосигналів. Проведено кількісне оцінювання точності формування вихідної сили, плавності керування, стабільності режиму утримання та сенсорної реакції системи. Проаналізовано поведінку системи на перехідних і стаціонарних ділянках та встановлено часовий зв'язок між формуванням моторного наміру, виникненням контактної взаємодії і корекцією керувального впливу. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованих методів та алгоритмів у межах розробленої математичної моделі й засвідчують перспективність їх подальшої практичної реалізації. Розділ завершується визначенням можливих напрямів переходу від програмної моделі до вбудованої реалізації алгоритмів і повнофункціонального електромеханічного прототипу.

Загальні висновки відповідають поставленим завданням і відображають основні теоретичні, методичні та прикладні результати дисертаційної роботи. У додатках наведено програмні коди аналізу властивостей біосигналів і моделювання системи керування, документи щодо впровадження результатів та перелік публікацій здобувача за темою дисертації. Наявність програмних реалізацій сприяє відтворюваності проведених обчислювальних досліджень.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Основні наукові положення, висновки та рекомендації, що висвітлені у дисертаційній роботі, є в достатній мірі обґрунтованими та базуються на комплексному використанні сучасних методів біомедичної інженерії, математичного моделювання, цифрової обробки сигналів, теорії автоматичного керування та комп'ютерного експерименту.

Мета дослідження полягає в підвищенні ефективності керування біонічним протезом кисті людини шляхом розроблення методів і засобів відбору та інтегрованої обробки біосигналів, придатних до формування інформативних і завадостійких керувальних впливів у режимі реального часу. Сформульовані шість завдань логічно розкривають шлях до досягнення мети: від системного аналізу сучасних підходів і створення експериментальних засобів до математичного моделювання, розроблення методу віконної обробки, алгоритму керування та кількісного оцінювання характеристик системи.

Об'єкт і предмет дослідження визначено коректно та взаємно узгоджено. Сукупність застосованих методів – системний аналіз, теорія сигналів, цифрова обробка сигналів, математичне моделювання, теорія керування, чисельний експеримент і лабораторна реєстрація біосигналів – відповідає змісту поставлених завдань.

Автором виконано ґрунтовний аналіз наукових джерел, визначено основні недоліки існуючих систем біокерування та обґрунтовано доцільність використання інтегрованого підходу до обробки електроміографічних і п'єзоелектричних сигналів.

Достовірність наукових результатів підтверджується використанням адекватного математичного апарату для опису процесів формування, обробки та використання біосигналів у системі керування біонічним протезом кисті. Запропоновані математичні моделі враховують особливості електроміографічних та п'єзоелектричних сигналів як інформаційних каналів системи керування, що забезпечує належний рівень адекватності проведених досліджень.

Наукові положення дисертації підтверджені результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень, виконаних на розробленому прототипі біонічного протеза кисті. Експериментальна частина має характер перевірки працездатності концептуального прототипу. Отримані результати демонструють узгодженість між теоретичними положеннями, результатами моделювання та експериментальними даними, що свідчить про коректність запропонованих технічних рішень та підтверджує можливість їх практичного застосування.

Важливим аргументом на користь достовірності отриманих результатів є також апробація основних положень дисертаційної роботи на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, а також їх впровадження у науково-дослідну діяльність та освітній процес. Основні результати дослідження

достатньою мірою висвітлені у наукових публікаціях автора, що пройшли фахове рецензування.

Загалом наведені у дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації є логічно взаємопов'язаними, впливають із результатів проведених досліджень і належним чином підтверджуються теоретичними та експериментальними даними, що дозволяє вважати їх достатньо обґрунтованими та достовірними.

5. Наукова новизна отриманих результатів

Сукупність отриманих наукових результатів забезпечує комплексний розв'язок задачі розроблення методів та засобів відбору й інтегрованої обробки електроміографічних і п'єзосигналів для підвищення ефективності керування біонічним протезом кисті людини. У дисертаційній роботі здобувачем отримано наступні нові наукові результати.

1) Вперше розроблено метод інтегрованої обробки електроміографічних та п'єзоелектричних сигналів у ковзних часових вікнах, який базується на формуванні узагальнених інформативних параметрів із подальшим об'єднанням даних різної фізичної природи. На відміну від існуючих методів незалежної обробки сигналів, запропонований підхід забезпечує підвищення інформативності сигналів, зменшення впливу шумів та артефактів і створює передумови для адаптивного функціонування системи керування в режимі реального часу.

2) Вперше розроблено метод формування керуючих впливів у системі біонічного протезування кисті на основі інтегрованого використання електроміографічного та п'єзоелектричного інформаційних каналів, який забезпечує поєднання процесів визначення моторного наміру користувача та оцінювання результатів взаємодії протеза з об'єктами зовнішнього середовища в єдиному контурі керування. На відміну від відомих підходів, запропонований метод реалізує функціональну інтеграцію каналів керування та сенсорного зворотного зв'язку, що дозволяє підвищити точність і стабільність роботи біонічного протеза.

3) Удосконалено алгоритм формування керуючого сигналу виконавчих приводів біонічного протеза, який, на відміну від відомих алгоритмів, враховує результати інтегрованої обробки біосигналів та обмеження динаміки мехатронної системи. Це дозволило забезпечити плавність зміни керуючих впливів, знизити чутливість системи до випадкових коливань біосигналів і підвищити стійкість функціонування протеза.

4) Набули подальшого розвитку математичні моделі електроміографічних та п'єзоелектричних сигналів як взаємопов'язаних інформаційних складових замкненої системи керування біонічним протезом кисті, які, на відміну від існуючих моделей, враховують часову локалізацію сигналів у ковзних вікнах, особливості їх інтегрованої обробки та взаємозв'язок між моторним наміром користувача і моментом тактильного контакту. Це дозволило підвищити адекватність моделювання процесів керування та оцінювання ефективності функціонування біонічного протеза.

6. Практична цінність результатів роботи

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у розробленні методів, алгоритмів та програмно-технічних засобів, призначених для підвищення ефективності керування біонічними протезами верхніх кінцівок на основі обробки біосигналів різної фізичної природи.

Практичне значення підтверджується створенням експериментального прототипу на основі адитивних технологій, розробленням конструкції мультиелектродної системи, електронного тракту реєстрації та фільтрації, інтеграцією п'єзоелектричних сенсорів і вібраційного актуатора, а також реалізацією програмних засобів. Результати проведених досліджень підтвердили можливість використання п'єзоелектричних сенсорів як елементів сенсорного зворотного зв'язку та продемонстрували перспективність їх застосування у складі сучасних біотехнічних систем керування. Використання отриманих результатів дозволяє підвищити інформативність біосигналів, зменшити вплив шумів та артефактів, забезпечити стабільніше формування керуючих дій і покращити якість взаємодії користувача з протезом.

У дисертації наведено відомості про використання результатів у науково-дослідній роботі, у діяльності ТОВ «НВП «ІНФОТЕХМЕД» та в освітньому процесі кафедри біотехнічних систем під час викладання дисципліни «Роботизоване біопротезування». Відповідні акти і довідки подано в додатках. Це свідчить про практичну затребуваність окремих складових дослідження, хоча подальше доведення системи до медичного виробу потребуватиме значно ширшої інженерної, ергономічної, клінічної та регуляторної валідації.

Отримані результати в ході виконання дисертаційного дослідження можуть бути використані під час проектування біонічних протезів верхніх кінцівок, роботизованих маніпуляторів, реабілітаційних комплексів та інших біотехнічних систем, у яких необхідне формування керуючих впливів на основі біосигналів у режимі реального часу.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях.

Структура дисертаційної роботи включає вступну частину, чотири основні розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додаткові матеріали.

Загальний обсяг дисертації становить 223 сторінки, основний текст викладено на 160 сторінках. Робота містить 62 рисунки, 79 формул, 11 таблиць та список використаних джерел із 113 найменувань. Дисертацію оформлено згідно з Вимогами до оформлення дисертації, затвердженими Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 року №0.

Структура дисертаційної роботи є логічною та зв'язною. Основні висновки та рекомендації логічно випливають з отриманих у розділах роботи результатів.

Список використаних джерел містить сучасні джерела, що відповідають предметній області дослідження.

За наведеними в дисертації відомостями, результати дослідження оприлюднено у 9 наукових працях, з яких 4 статті містять основні наукові результати, а 5 праць засвідчують апробацію матеріалів на міжнародних наукових конференціях і воркшопах, у тому числі 2 статті у матеріалах конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus. Тематика статей охоплює конструкцію протеза, структуру системи з сенсорним зворотним зв'язком, інтегровану математичну модель та метод віконної обробки електроміографічних і п'єзоелектричних сигналів, тобто відповідає ключовим розділам дисертації.

За кількісними та якісними показниками наукових публікацій дисертаційна робота повністю задовольняє критерії «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Ключові наукові положення дисертації адекватно представлено в опублікованих наукових працях автора. Відзначено внесок здобувача в опублікованих наукових працях.

Оприлюднення наукових результатів дисертанта в рецензованих наукових виданнях, що здійснюють контроль матеріалів на предмет відсутності неправомірних запозичень, є додатковим свідченням дотримання норм академічної доброчесності.

У дисертації не виявлено текстових запозичень та використання наукових результатів інших науковців без зазначення посилань на відповідні джерела. Використання матеріалів інших дослідників здійснено з дотриманням вимог наукової етики та містить належні посилання на відповідні джерела.

За підсумками аналізу дисертаційної роботи Ковалика С.В. фактів порушення академічної доброчесності не виявлено. Забезпечено дотримання критеріїв щодо кількісних та якісних показників публікацій.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Виклад матеріалу в дисертаційній роботі здійснено українською мовою з дотриманням норм академічного стилю. Текст роботи є логічно структурованим: окремі підрозділи послідовно підпорядковано загальній логіці дослідження, а перехід від теоретичних побудов до експериментальних результатів і прикладних реалізацій виглядає природним. Стиль викладу витриманий, формулювання чіткі, понятійний апарат застосовується послідовно протягом усієї дисертації, що сприяє точному сприйняттю наукових результатів читачем.

Тема, зміст та отримані наукові результати дисертаційної роботи повністю відповідають спеціальності 163 «Біомедична інженерія» галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія».

9. Зауваження до дисертації

До зауважень щодо матеріалів дисертаційної роботи можна віднести наступні:

1) У дисертаційній роботі заявлено підвищення точності та стабільності керування завдяки інтегрованому використанню електроміографічного і п'єзоелектричного каналів. Водночас не наведено достатнього кількісного порівняння запропонованої системи з базовим варіантом прямого міоелектричного керування без сенсорного зворотного зв'язку. Таке зіставлення дало б змогу точніше визначити внесок п'єзочаналу в покращення характеристик системи. Додатково доцільним було б порівняння з одним або кількома альтернативними методами обробки за однакових експериментальних умов і критеріїв оцінювання.

2) Перевірку інтегрованої системи керування здійснено переважно шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB із використанням експериментально зареєстрованих біосигналів. Доцільним було б доповнення роботи результатами функціонування повного замкненого контуру на апаратному електромеханічному прототипі або вбудованій обчислювальній платформі в режимі реального часу. Це дало б змогу оцінити фактичні затримки, обчислювальні витрати, вплив апаратних завад та стійкість системи в умовах практичної експлуатації.

3) У роботі недостатньо повно наведено кількісні й демографічні характеристики експериментальної вибірки, кількість повторних реєстрацій та показники міжсуб'єктної варіабельності електроміографічних сигналів. Оскільки методика ґрунтується на використанні здорової кінцівки та принципі дзеркальних рухів, додаткового дослідження потребує можливість перенесення отриманих результатів на осіб з різними рівнями ампутації, станом залишкових м'язів і розташуванням електродів, зокрема на користувачів, для яких застосування дзеркальних рухів є обмеженим або неможливим.

4) У роботі недостатньо повно наведено кількісні й демографічні характеристики експериментальної вибірки, кількість повторних реєстрацій та показники міжсуб'єктної варіабельності електроміографічних сигналів. Оскільки методика ґрунтується на використанні здорової кінцівки та принципі дзеркальних рухів, додаткового дослідження потребує можливість перенесення отриманих результатів на осіб з різними рівнями ампутації, станом залишкових м'язів і розташуванням електродів, зокрема на користувачів, для яких застосування дзеркальних рухів є обмеженим або неможливим.

5) Практична реалізація сенсорного зворотного зв'язку розглянута переважно на рівні структурної організації системи та використання п'єзосигналу для корекції керувальних впливів. Водночас не проведено експериментального оцінювання сприйняття користувачем тактильної стимуляції, її розпізнаваності, комфортності, просторової локалізації та впливу на ефективність маніпуляцій без постійного зорового контролю.

Дослідження цих характеристик посилює обґрунтування практичної цінності запропонованої системи.

Наведені зауваження мають переважно рекомендаційний та дискусійний характер і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційного дослідження.

Загальний висновок про дисертаційну роботу

Подана дисертаційна робота Ковалика Сергія Васильовича на тему «Методи та засоби відбору й обробки біосигналів для задачі керування біонічним протезом кисті людини» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія», відповідає спеціальності 163 «Біомедична інженерія», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам 6, 7, 8, 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Ковалик Сергій Васильович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія» за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія».

Офіційний опонент

доцент кафедри біомедичної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
кандидат технічних наук, доцент



Оксана БІЛОШИЦЬКА

