

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

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Ковалика Сергія Васильовича

«Методи та засоби відбору й обробки біосигналів для задачі керування біонічним протезом кисті людини»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 16 – Хімічна та біоінженерія

за спеціальністю 163 – Біомедична інженерія

1. Актуальність теми дисертаційної роботи та зв'язок з науковими напрямками, темами

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена зростаючою внаслідок війни в Україні потребою у створенні високофункціональних біонічних протезів кисті людини для відновлення можливості осіб із ампутаціями виконувати базові повсякденні дії, провадити професійну діяльність та покращити процес їхньої наступної соціальної інтеграції. При цьому важливим є забезпечення виконання протезом значної кількості рухів та захватів, що визначається адекватністю методів обробки біосигналів, які власне використовуються для керування біонічним протезом. Беручи до уваги домінуючу концепцію керування сучасними комерційно доступними біонічними протезами кисті людини, що ґрунтується на реєстрації сигналів поверхневої електроміографії із двох електродів, які розміщуються в куксоприймаючій гільзі, для власне розширення функціональності такого протеза необхідною є реєстрація більшої кількості цих біосигналів (багатоканальних сигналів поверхневої електроміографії), зниження рівня шумів та артефактів. Такі методи обробки мають забезпечувати можливість керування протезом в режимі реального часу або із мінімальними часовими затримками. Також, враховуючи принципи механізму природної соматосенсорної інтеграції, необхідною є інтеграція в структурі системи керування протезом окремого контура сенсорного зворотного зв'язку для забезпечення автоматизації процесу захвату об'єктів протезом, їх утримування тощо.

У цьому контексті актуальним є розроблення нових методів обробки біосигналів та інтеграції сенсорного зворотного зв'язку, що забезпечить підвищення точності та плавності виконання рухів, а також стабільності режимів утримування із можливістю автоматизації функцій керування біонічним протезом кисті.

Дисертаційна робота виконана відповідно до наукових напрямів розвитку ТНТУ ім. Івана Пулюя та кафедри біотехнічних систем у галузі біомедичної інженерії, цифрової обробки біомедичних сигналів та інтелектуальних медичних систем. Тематика дослідження відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки України та

пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт, зокрема Ковалик С.В. є виконавцем науково-дослідної роботи «Біонічний протез кисті руки на основі ендоскелета» (2025–2027 рр., Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, керівник – к.т.н., доц. В.Г. Дозорський). Номер державної реєстрації № 0125U003760.

2. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі отримано нові наукові результати, що полягають у такому:

- **вперше** розроблено методи комплексної обробки сигналів поверхневої електроміографії та п'єзосигналів із застосуванням методу ковзного вікна, що ґрунтуються на виділенні їх огинаючих складових та визначенні узагальнених інформативних параметрів в режимі реального часу для формування сигналів керування біонічним протезом;

- **вперше** запропоновано спосіб формування сигналів керування біонічним протезом на основі застосування результатів опрацювання електроміографічних сигналів і п'єзоелектричних сигналів, який, на відміну від існуючих рішень, передбачає використання контура зворотного зв'язку (формування п'єзосигналів) для забезпечення можливості автоматизації процесу виконання захвату об'єктів протезом, а також підвищення точності, плавності та стабільності власне процесу керування протезом;

- **удосконалено** алгоритм формування сигналів керування шляхом врахування результатів комплексної обробки електроміографічних сигналів і п'єзоелектричних сигналів, що дало змогу забезпечити плавність зміни сигналів керування та підвищити стійкість функціонування системи;

- **набули подальшого розвитку** математичні моделі електроміографічних сигналів та п'єзоелектричних сигналів, які, на відміну від існуючих, забезпечили можливість врахування часової та частотної структури при комплексному опрацюванні таких біосигналів та підвищити адекватність моделювання процесу формування сигналів керування.

Отримані результати є науково обґрунтованими, мають теоретичне та практичне значення і розширюють існуючі підходи до обробки біосигналів для керування біонічними протезами.

3. Практична цінність одержаних результатів

Практична цінність отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у можливості їх використання для підвищення ефективності систем керування біонічними протезами верхніх кінцівок за рахунок застосування розроблених методів та засобів відбору й обробки біосигналів.

Отримані результати можуть бути застосовані:

- при розробленні мультиелектродних систем реєстрації сигналів поверхневої електроміографії для керування високофункціональними біонічними протезами;

- при створенні біонічних протезів із контуром сенсорного зворотного зв'язку для забезпечення адаптивності виконання протезом рухів та захватів;

- при створенні біонічних протезів із реалізацією функції тактильних відчуттів на основі методу вібротактильної стимуляції;

- при проектуванні систем керування біонічними протезами, роботизованими маніпуляторами та іншими біотехнічними системами.

Розроблене програмне забезпечення для реалізації алгоритмів обробки біосигналів може бути використане для подальших наукових досліджень, а також при створенні вбудованих систем керування в реальному часі.

Практичне значення результатів підтверджується наявністю актів впровадження.

Результати роботи також можуть бути використані у навчальному процесі за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія» при викладанні таких дисциплін, як «Роботизоване біопротезування», «Технології проектування та конструювання біопротезів», «Комп'ютерна обробка біомедичних сигналів та даних», «Комп'ютерні 3D-технології в реабілітаційній інженерії» тощо.

4. Повнота викладення результатів дослідження у наукових публікаціях

Основні наукові результати дисертаційної роботи повною мірою відображені у наукових публікаціях здобувача, які відповідають вимогам пункту 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з яких: чотири статті у наукових фахових виданнях України, матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

У публікаціях повністю відображено основні результати дисертації, зокрема: постановку наукового завдання, обґрунтування способу реалізації сенсорного зворотного зв'язку, математичне моделювання сигналів поверхневої електроміографії та п'єзоелектричних сигналів в контурі сенсорного зворотного зв'язку, розроблення методів опрацювання таких сигналів та інтеграцію їх в структуру системи керування біонічним протезом кисті людини, результати експериментальної верифікації.

Особистий внесок здобувача є визначальним і полягає у формулюванні наукової ідеї, розробленні засобів відбору та методів обробки біосигналів, програмній реалізації та аналізі отриманих результатів.

5. Ступінь обґрунтованості та достовірність сформульованих в дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими та достовірними.

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується якісним та кількісним критичним аналізом відомих методів опрацювання сигналів поверхневої електроміографії та способів організації сенсорного зворотного зв'язку в біонічних протезах, коректним використанням сучасного математичного апарату для обробки таких сигналів та узгодженістю запропонованих підходів із відомими теоретичними положеннями у галузі біомедичної інженерії.

Достовірність результатів підтверджується результатами коректного математичного моделювання сигналів поверхневої електроміографії та п'єзоелектричних

сигналів, проведеними експериментальними дослідженнями на реальних сигналах поверхневої електроміографії та п'єзоелектричних сигналах; результатами кількісного оцінювання характеристик системи за показниками точності, плавності, стабільності та сенсорної реакції.

Отримані результати є відтворюваними, узгоджуються з сучасними науковими даними та не суперечать відомим теоретичним положенням.

6. Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота характеризується цілісною структурою, логічною послідовністю викладу матеріалу та достатнім рівнем наукової аргументації. Зміст роботи загалом відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії та забезпечує розкриття поставленого наукового завдання.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, чітко визначено мету, об'єкт, предмет та завдання, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено комплексний аналіз теоретичних основ побудови систем керування біонічними протезами кисті та визначено ключові напрямки їх розвитку. Детально, із наведенням кількісних показників, проведено порівняльний аналіз відомих на поширених сьогодні методів обробки біосигналів для задачі керування комерційно доступними протезами кисті людини, на основі чого підтверджено актуальність теми дослідження.

У **другому розділі** обґрунтовано структурну інтегрованої адаптивної системи керування біонічним протезом кисті, а також розроблено засоби та проведено експериментальну реєстрацію біосигналів. При цьому розроблено удосконалену конструкцію прототипа біонічного протеза із інтегрованими сенсорами тактильних відчуттів та вузлами вібротактильної стимуляції, а також конструкції мультиелектродної системи відбору біосигналів. Основні елементи цих двох конструкцій придатні до виготовлення методами 3D друку, що є особливо позитивним фактором за можливості наступної комерціалізації результатів дослідження.

У **третьому розділі** розроблено метод обробки біосигналів на основі застосування ковзного часового вікна та побудовано інтегровану математичну модель системи керування біонічним протезом кисті, яка поєднує канал моторного наміру користувача та канал сенсорного зворотного зв'язку. Сформовано двоканальну структуру обробки біосигналів та запропоновано модель електромеханічної частини біонічного протеза.

Четвертий розділ присвячений експериментальній верифікації. Автором проведено комплексне експериментальне дослідження розробленої системи керування біонічним протезом кисті в середовищі MATLAB, а також виконано кількісне оцінювання її основних характеристик.

Висновки відповідають змісту роботи, узагальнюють отримані результати та відображають досягнення поставленої мети.

Список використаних джерел є достатньо об'ємним, включає сучасні публікації, у тому числі праці українських і зарубіжних авторів, а також публікації здобувача за темою дисертації.

Додатки є інформативними та доповнюють основний зміст дисертації. Вони містять фрагменти програмного коду реалізованих методів обробки, що підтверджує практичну реалізацію отриманих результатів, а також акти впровадження, які засвідчують практичне застосування розроблених рішень. Наявність додатків підвищує достовірність та прикладну значущість виконаного дослідження.

У цілому зміст дисертації є достатньо повним, логічно узгодженим та свідчить про високий рівень підготовки здобувача. Виявлені зауваження носять рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

7. Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання розроблення методів та засобів відбору та обробки електроміографічних і п'єзоелектричних сигналів для ефективного керування біонічним протезом кисті людини і виконана на належному науково-методичному рівні.

Отримані результати характеризуються науковою новизною, обґрунтованістю та практичною значущістю, що підтверджено теоретичними дослідженнями, результатами моделювання та експериментальною перевіркою.

За змістом, логікою викладення матеріалу, рівнем узагальнення результатів, а також за відповідністю встановленим вимогам до структури та оформлення, дисертаційна робота відповідає вимогам пункту 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії...» (Постанова КМУ № 44 від 12.01.2022).

8. Зауваження до дисертації

1. В роботі занадто детально проаналізовано біомеханіку живої кисті людини та поширені концепції реалізації сенсорного зворотного зв'язку. Натомість варто було б детальніше описати генезис та параметри сигналів поверхневої електроміографії.

2. При реалізації тактильних відчуттів автором запропоновано використати метод вібротактильної стимуляції. Варто було б обґрунтувати параметри та режими роботи віброактуаторів, оскільки від них залежатиме природність відчуттів користувача такого протеза.

3. Варто було б проаналізувати можливості застосування інших типів сенсорів (тензорезистивних, п'єзорезистивних, ємнісних тощо) в контурі сенсорного зворотного зв'язку та порівняти їх із можливостями запропонованого п'єзоелектричного сенсора.

4. Варто було б більш детально описати та обґрунтувати параметри основних елементів мультиелектродної системи відбору сигналів поверхневої електроміографії, зокрема розмірів та форми контактних поверхонь електродів, коефіцієнтів підсилення підсилювачів тощо.

5. Варто було б порівняти розроблені в роботі методи обробки сигналів поверхневої електроміографії та п'єзоелектричних сигналів із відомими методами обробки в плані обчислювальної складності, технічної реалізованості та часових затримок, що додатково підтвердило б вигоду в застосуванні розроблених автором методів в структурі керування комерційно доступними протезами.

6. Результати експериментальних досліджень є переконливими, однак їх можна було б доповнити аналізом чутливості методів обробки до зміни параметрів вхідних даних.

7. Програмна реалізація методу виконана на належному рівні. Для подальшого використання доцільним було б більш детально описати структуру програмного забезпечення.

Проте, зазначені зауваження не знижують наукової та практичної цінності роботи і не впливають на загальну позитивну оцінку наукових результатів, а лише можуть стати стимулом для подальших досліджень у цьому дуже важливому науковому напрямку.

9. Висновки:

1. У дисертаційній роботі Ковалика Сергія Васильовича на тему «Методи та засоби відбору й обробки біосигналів для задачі керування біонічним протезом кисті людини» вирішено актуальне наукове завдання розроблення методів та засобів відбору та обробки електроміографічних і п'єзоелектричних сигналів для ефективного керування біонічним протезом кисті людини.

2. Отримані результати характеризуються науковою новизною, обґрунтованістю та практичною цінністю. Запропоновані методи відбору сприяють зниження рівня завад в реєстрованих сигналах поверхневої електроміографії, а розроблені методи обробки цих сигналів та п'єзоелектричних сигналів контура сенсорного зворотного зв'язку забезпечують виділення інформативних параметрів сигналів в режимі реального часу та формування керуючих впливів із наступним підвищенням стабільності функціонування системи керування біонічним протезом.

3. Результати роботи можуть бути використані при розробленні високоефективних біонічних протезів кисті людини із прямим керуванням та сенсорним зворотним зв'язком, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з біомедичної інженерії.

4. Вважаю, що дисертаційна робота «Методи та засоби відбору й обробки біосигналів для задачі керування біонічним протезом кисті людини» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (із змінами) та Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Ковалик Сергій Васильович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія», галузь знань 16 «Хімічна та біоінженерія».

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри біотехнічних систем
Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя





Євгенія ЯВОРСЬКА