

Голові спеціалізованої вченої ради  
ДФ 58.082.106  
Західноукраїнського національного  
університету  
доктору технічних наук, професору  
Саченку Анатолію Олексійовичу

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технічних наук, доцента,  
завідувача кафедри систем штучного інтелекту  
Національного університету «Львівська Політехніка»  
**Мельникової Наталії Іванівни**  
на дисертаційну роботу Дивака Андрія Миколайовича  
на тему «Математичне та програмне забезпечення підтримки  
нейромоніторингу під час операції на щитоподібній залозі»,  
подану на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення безпеки хірургічних втручань на щитоподібній залозі, зокрема зниження ризику пошкодження поворотного гортанного нерва, що є одним із найбільш поширених і небезпечних ускладнень таких операцій. Пошкодження цього нерва може призводити до стійких порушень голосу, дихання та суттєвого погіршення якості життя пацієнтів, тому розроблення ефективних засобів інтраопераційного контролю його стану є важливим завданням сучасної медичної практики.

Існуючі системи інтраопераційного нейромоніторингу, незважаючи на широке застосування, мають низку обмежень, пов'язаних із недостатньою адаптацією параметрів стимуляції до індивідуальних електрофізіологічних властивостей тканин пацієнта, а також відсутністю засобів кількісного оцінювання відстані від точки подразнення до нерва. Це ускладнює інтерпретацію результатів моніторингу та знижує ефективність прийняття рішень під час операції.

У зв'язку з цим розроблення математичних моделей, методів та програмно-апаратних засобів підтримки інтраопераційного нейромоніторингу, які дозволяють адаптивно налаштовувати параметри електричної стимуляції та оцінювати відстань до поворотного гортанного нерва на основі аналізу акустичних сигналів, є своєчасним і науково обґрунтованим завданням.

Інтеграція математичного моделювання, інтервального аналізу та онтологічного підходу в межах медичних інформаційних систем відповідає

сучасним тенденціям розвитку інженерії програмного забезпечення для біомедичних застосувань. Поєднання методів інженерії програмного забезпечення та біомедичної інженерії надає роботі міждисциплінарного характеру, що підсилює її наукову та практичну значущість.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною як з наукової точки зору, оскільки спрямована на розвиток методів математичного моделювання та інформаційних технологій у біомедичних системах, так і з практичної точки зору, оскільки результати дослідження можуть бути використані для підвищення безпеки хірургічних втручань і зниження ризику післяопераційних ускладнень.

## **2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.**

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням і структурно складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету і завдання дослідження, наведено положення, що характеризують наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації результатів дисертації та публікацій за її матеріалами із зазначенням особистого внеску здобувача.

У першому розділі проведено аналіз сучасних технологій інтраопераційного нейромоніторингу та практики їх застосування. Показано, що електрофізіологічні методи є найбільш перспективними щодо зниження ризику пошкодження поворотного гортанного нерва.

У розділі також здійснено огляд існуючих програмно-апаратних комплексів і медичних систем моніторингу, визначено їх основні можливості та обмеження. На підставі проведеного аналізу сформульовано постановку науково-технічного завдання, визначено мету та основні завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі наведено результати дослідження процесів електричної стимуляції тканин і розподілу електричного струму. На основі експериментальних досліджень встановлено залежність збудження нерва від відстані між точкою подразнення та поворотним гортанним нервом, а також показано, що параметри акустичного сигналу можуть використовуватися як індикатор цієї відстані.

У розділі запропоновано та обґрунтовано структуру інтервальної математичної моделі поширення електричного потенціалу в тканинах операційної рани та формування акустичного сигналу, а також наведено підхід до її ідентифікації. Крім того, розроблено метод ідентифікації інтервальної моделі, що базується на поєднанні аналізу інтервальних даних та онтологічного підходу, який дозволяє скоротити час налаштування моделі та забезпечує можливість її використання у складі програмно-апаратного комплексу інтраопераційного нейромоніторингу.

У третьому розділі розкрито принципи побудови та функціонування запропонованої інформаційної технології інтраопераційного нейромоніторингу.

Технологія передбачає адаптивне налаштування параметрів струму подразнення та оцінювання відстані від точки подразнення до поворотного гортанного нерва на основі математичних моделей, розроблених у попередньому розділі.

У розділі запропоновано й обґрунтовано метод і алгоритм оптимального програмного налаштування частоти слідування імпульсів електричного струму, які враховують електрофізіологічні характеристики тканин пацієнта та сприяють підвищенню чутливості тканин до подразнення і зниженню ризику пошкодження нерва. Також наведено результати удосконалення архітектури програмного та апаратного забезпечення пристрою підтримки інтраопераційного нейромоніторингу.

У четвертому розділі розглянуто особливості побудови програмно-апаратного комплексу інтраопераційного моніторингу поворотного гортанного нерва та організації користувацького інтерфейсу, а також реалізацію його основних функцій. Наведено приклад застосування інтервальної моделі поширення електричного потенціалу та формування акустичного сигналу, що базується на використанні онтологічного опису показів до оперативного втручання.

У завершальній частині розділу подано результати експериментальних досліджень ефективності використання розробленого комплексу, які свідчать про зниження ризику пошкодження поворотного гортанного нерва з 10,6% до 4,5%, тобто приблизно у 2,5 рази.

**Висновки** за результатами дисертаційної роботи повною мірою відображають отримані наукові результати та за своїм змістом і рівнем відповідають вимогам, що висуваються до результатів дисертаційних досліджень.

Структура дисертаційної роботи є логічною, послідовною та повністю відповідає меті дослідження і поставленим завданням.

1. Достовірність і обґрунтованість наукових результатів, запропонованих автором рішень, висновків і рекомендацій забезпечується коректним застосуванням аналітичного та числового апарату досліджень, узгодженістю теоретичних положень із результатами експериментальної перевірки, відповідністю отриманих результатів фізичній суті досліджуваних процесів, а також їх порівнянням з відомими результатами, наведеними в науковій літературі. Отримані результати узгоджуються з поставленими завданнями дослідження та наочно ілюструються таблицями, графіками й рисунками.

2. Запропоновані в дисертації моделі, методи та інформаційні рішення мають наукову новизну, є обґрунтованими та забезпечують розв'язання поставлених завдань, що підтверджено програмною реалізацією розроблених засобів підтримки інтраопераційного нейромоніторингу.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів.**

Основні наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто, мають наукову новизну, є достатньо обґрунтованими та підтверджені результатами проведених комп'ютерних

експериментів, а також апробацією основних положень дослідження на всеукраїнських і міжнародних наукових конференціях.

Достовірність і обґрунтованість сформульованих у роботі наукових положень, висновків і практичних результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, використанням сучасних підходів і методології проектування інформаційних систем, а також успішною програмно-апаратною реалізацією запропонованих моделей і методів.

У процесі виконання дисертаційного дослідження здобувачем отримано низку наукових результатів, що відзначаються науковою новизною, зокрема:

1) вперше розроблено інтервальну математичну модель поширення електричного потенціалу в тканинах операційної рани при їх подразненні імпульсним струмом та формування реакції голосових зв'язок у вигляді акустичного сигналу, яка, на відміну від існуючих, враховує інтервальну відстань від точки подразнення до поворотного гортанного нерва залежно від параметрів акустичного сигналу та забезпечує зниження ризику його пошкодження під час операцій на щитоподібній залозі;

2) вперше розроблено метод ідентифікації інтервальної математичної моделі, що ґрунтується на поєднанні аналізу інтервальних даних та онтологічного підходу, що дозволяє скоротити час налаштування моделі та забезпечує можливість її використання у програмно-апаратному комплексі;

3) запропоновано метод і алгоритм програмного налаштування частоти імпульсного струму, які передбачають адаптацію до електрофізіологічних характеристик тканин пацієнта, що підвищує чутливість тканин до подразнення і знижує ризик пошкодження нерва.

4) удосконалено архітектуру програмного та апаратного забезпечення пристрою підтримки інтраопераційного моніторингу ПГН, яка, на відміну від існуючих, забезпечує адаптивне програмне налаштування частоти імпульсного струму для подразнення тканин і визначення відстані від точки подразнення до ПГН на основі математичної моделі поширення електричного потенціалу та формування акустичного сигналу, що у сукупності підвищує точність класифікації тканин і знижує ризик пошкодження ПГН.

5) удосконалено інформаційну технологію інтраопераційного моніторингу ПГН, яка, на відміну від існуючих, реалізована у вигляді програмно-апаратного комплексу з функціями налаштування частоти імпульсного струму для подразнення тканин і визначення відстані від точки подразнення до ПГН, що у сукупності забезпечує зниження ризику його пошкодження під час операцій на щитоподібній залозі.

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

4.1. Оформлення дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 193 сторінках друкованого тексту, з них 157 сторінок основного тексту, де наведено 36 рисунків та 10 таблиць, список використаних джерел складає 136 найменувань.

Дисертаційну роботу викладено українською мовою грамотно, на належному науковому та стилістичному рівні. Використана в роботі наукова термінологія є коректною та загальноприйнятною, а стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, сформульованих наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує їх зрозумілість і можливість практичного використання. Зміст дисертації є логічно структурованим і дає цілісне уявлення про основні результати, висновки та рекомендації, отримані автором. Оформлення дисертаційної роботи відповідає встановленим атестаційним вимогам.

#### **4.2. Дотримання вимог академічної доброчесності.**

Результати перевірки дисертаційної роботи на наявність академічного плагіату засвідчили достатній рівень її оригінальності. У тексті простежується цілісний авторський стиль викладення матеріалу. Некоректних текстових запозичень, а також використання результатів інших дослідників без належних посилань на джерела не виявлено.

**4.3. Основні результати дисертаційного дослідження достатньо повно викладені в 31 науковій праці, серед яких 21 робота входить до міжнародної наукометричної бази Scopus. 1 стаття входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science і відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank віднесено до квартилю Q2. Ще 2 статті входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та, згідно з класифікацією SCImago Journal and Country Rank, віднесено до квартилю Q3 та Q4. Загалом опубліковано 9 статей у наукових фахових періодичних виданнях, 21 публікація у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій та один патент на корисну модель.**

#### **5. Наукове та практичне значення результатів дисертаційної роботи.**

Наукове значення дисертаційного дослідження полягає в подальшому розвитку математичних моделей, методів та інформаційних технологій інтраопераційного моніторингу, що базуються на використанні інтервальних підходів до аналізу та обробки даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх застосування при створенні та модернізації програмно-апаратних засобів інтраопераційного моніторингу, що дозволяє підвищити точність визначення стану тканин і знизити ризик пошкодження поворотного гортанного нерва під час оперативних втручань.

#### **6. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації.**

1. У вступі та розділі 1 представлено огляд існуючих систем нейромоніторингу, хоча доцільно було б доповнити роботу формалізованим порівняльним аналізом запропонованого рішення з конкретними комерційними системами, у форматі подання структурованої таблиці за ключовими технічними чи функціональними параметрами, що дозволило б більш чітко окреслити практичні переваги розробки.
2. У розділі 2 метод ідентифікації на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу подано переважно концептуально. Для посилення методологічної складової роботи доцільно було б формалізувати онтологічну

модель через представлення структури класів, зв'язків і властивостей у вигляді OWL-схеми, RDF-моделі чи графа знань.

3. У розділі 2, зокрема в формулі 2.14, 76 – 77 ст., для підвищення зрозумілості формалізованих рішень доцільно було б детальніше пояснити процедуру ідентифікації коефіцієнтів моделі та надати їх інтерпретацію з точки зору фізичного або статистичного змісту.
4. У розділі 4, присвяченому клінічній апробації, подано кількісні результати зниження частоти ушкоджень нерва, однак статистична обробка результатів є недостатньо деталізованою. Доцільно було б доповнити результати довірчими інтервалами, зазначити критерії статистичної значущості чи детальніше описати спосіб формування й обсяг вибірок.
5. У роботі зазначено функціонування системи в режимі реального часу, однак для глибшого обґрунтування технічної складової, доцільно було б подати оцінку обчислювальної складності алгоритмів та часових характеристик їх виконання, зокрема показники затримки обробки сигналу.
6. З огляду на міждисциплінарний характер дослідження, для покращення сприйняття матеріалу доцільно було б також додати структурований перелік використаних скорочень у вступній частині роботи.

Загалом дисертаційне дослідження виконано на високому науковому та прикладному рівні. Разом з тим окремі положення роботи мають дискусійний характер, що зумовлено складністю досліджуваної предметної області. У зв'язку з цим доцільно висловити окремі уточнення, зауваження та рекомендації, спрямовані на подальше вдосконалення досліджуваної проблематики.

Однак, наведені вище зауваження не зменшують наукової та практичної цінності дисертаційного дослідження в цілому.

## **7. Висновки.**

7.1. Дисертаційна робота Дивака Андрія Миколайовича є самостійним, оригінальним, завершеним науковим дослідженням, у якій отримано нові науково-обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальне наукове завдання зниження ризику пошкодження ПГН в процесі операції на щитоподібній залозі у спосіб розроблення математичного та програмного забезпечення програмно-апаратного комплексу для підтримки нейромоніторингу під час операції на щитоподібній залозі.

7.2. Одержані в дисертаційній роботі наукові та практичні результати становлять вагомий внесок у розвиток моделей, методів та інформаційних технологій інтраопераційного моніторингу, зокрема із застосуванням інтервальних математичних моделей і методів обробки сигналів, та можуть бути ефективно використані під час розроблення програмно-апаратних засобів підтримки хірургічних втручань на щитоподібній залозі. Зміст дисертаційної роботи відповідає спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення.

7.3. Отже, дисертаційна робота «Математичне та програмне забезпечення підтримки нейромоніторингу під час операції на щитоподібній залозі» за актуальністю обраної теми, обсягом і рівнем проведених досліджень, повнотою розв'язання поставлених наукових і практичних завдань, науковою новизною та обґрунтованістю отриманих результатів, практичною значущістю висновків і

рекомендацій, повнотою їх висвітлення у наукових публікаціях, а також дотриманням вимог академічної доброчесності відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6. – 9 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Дивак Андрій Миколайович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

**Офіційний опонент:**  
завідувач кафедри систем  
штучного інтелекту  
Національного університету  
«Львівська Політехніка»  
доктор технічних наук, доцент

**Наталія МЕЛЬНИКОВА**

*Підпис*  
*Взяв сей*

*Р. Бреславський*