

АНОТАЦІЯ

Дивак А.М. Математичне та програмне забезпечення підтримки нейромоніторингу під час операції на щитоподібній залозі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

У дисертаційній роботі розглянуто науково-технічне завдання розробки математичного та програмного забезпечення інформаційної технології та програмно-апаратного комплексу для підтримки нейромоніторингу під час операції на щитоподібній залозі, які розширюють функції програмно-апаратного комплексу для налаштування параметрів електричного струму, залежно від електрофізіологічних властивостей тканин поля хірургічного втручання конкретного пацієнта та забезпечують контроль відстані від точки подразнення на полі хірургічного втручання до ПГН. Метою дисертаційного дослідження є 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.

У вступі, наведено актуальні теми дисертаційного дослідження, мету та основні завдання, а також наукову новизну та практичну значущість.

У першому розділі проведено детальний аналіз сучасних технологій інтраопераційного нейромоніторингу та сформовано практичні аспекти їхнього застосування. За результатами проведеного аналізу встановлено, що електрофізіологічний метод моніторингу є найбільш перспективним підходом для суттєвого зниження ризику травмування поворотного гортанного нерва. Цей

метод передбачає подразнення тканин у зоні хірургічного втручання поблизу поворотного гортанного нерва і подальше оцінювання м'язової реакції шляхом моніторингу скорочення голосових зв'язок. Для цього моніторингу використовується спеціальний звуковий сенсор. Також було встановлено, що частота електричних імпульсів, які використовуються для стимуляції поворотного гортанного нерва, варіюється залежно від конкретного клінічного випадку, проте загалом коливається від кількох одиниць до кількох десятків герц.

Наступна частина розділу містить огляд існуючих програмно-апаратних комплексів, біомедичних приладів та систем, медичних систем інтраопераційного нейромоніторингу. Зауважено, що всі системи націлені на забезпечення безпеки пацієнта та зниження ризику пошкодження ПГН. Розглянуто як універсальні системи моніторингу, системи медичної діагностики, а також системи, орієнтовані виключно на моніторинг поворотного гортанного нерва. Останні, як правило, побудовані на базі одноплатних комп'ютерів та використовують електрофізіологічний метод подразнення та звуковий сенсор, встановлений в ендотрахеальній трубці, для реєстрації реакції. У ході аналізу сформульовано основні недоліки та обмеження цих існуючих програмно-апаратних рішень, що є критично важливим для подальшого проєктування ефективніших систем.

У заключній частині першого розділу, на підставі проведеного аналізу та виявлених недоліків існуючих рішень, здійснено постановку науково-технічного завдання. Сформульовано мету та основні завдання дисертаційного дослідження. Наведені висновки узагальнюють результати огляду літературних джерел та обґрунтовують актуальність розробки нової системи інтраопераційного нейромоніторингу.

У результаті проведеного аналізу існуючих технологій інтраопераційного нейромоніторингу поворотного гортанного нерва, наведеного у розділі першому, виявлено значні обмеження їхнього функціонування. Зокрема, наявні засоби моделювання електрофізіологічних характеристик тканин хірургічного

поля, які базуються на різницевих або алгебричних рівняннях, описують лише розподіл характеристик інформаційного сигналу. Проте, оскільки побудований розподіл не має візуальної прив'язки до конкретних тканин, він не дає можливості хірургу чи його асистенту чітко зрозуміти положення нерва на полі втручання.

Для усунення цього критичного недоліку обґрунтовано доцільність розробки та впровадження в інформаційну технологію інтраопераційного нейромоніторингу нової математичної моделі, яка б дозволяла визначати відстань від точки подразнення тканин електричним струмом до поворотного гортанного нерва. Така модель повинна комплексно відображати процес поширення електричного потенціалу в тканинах хірургічного поля, а також формування акустичного сигналу внаслідок скорочення голосових зв'язок.

У другому розділі наведено результати досліджень процесів електричної стимуляції тканин поля хірургічного втручання та розподілу електричного струму в тканинах. На основі експериментальних досліджень встановлено, що збудження нерва залежить від відстані від точки подразнення на тканинах поля хірургічного втручання до ПГН і відповідно акустичний сигнал, як реакція на подразнення тканин поля хірургічного втручання, який формується внаслідок розтягнення голосових зв'язок та проходження повітря через гортань пацієнта, є індикатором цієї відстані. Визначено основні характеристики акустичного сигналу, від яких залежить ця відстань: амплітуда акустичного сигналу та амплітуда його головної спектральної складової.

У цьому ж розділі, спираючись на припущення, що ґрунтуються на нейрохронаксихній теорії утворення голосу, розроблену Юссоном, запропоновано та обґрунтовано структуру інтервальної математичної моделі поширення електричного потенціалу в тканинах операційної рани під час подразнення їх імпульсним електричним струмом та формування реакції на подразнення голосових зв'язок у вигляді акустичного сигналу. Запропонована структура є інтервальним рівнянням з двома адитивними компонентами: вираз, який описує поширення електричного потенціалу в тканинах поля хірургічного

втручання; вираз у вигляді квадратичної залежності між відстанню від точки подразнення тканин до ПГН та значенням максимальної амплітуди головної спектральної складової акустичного сигналу. Причому, у першому виразі невідомими коефіцієнтами є коефіцієнт α затухання електричного сигналу, який залежить від типу тканин, та коефіцієнт k , який характеризує середовище поширення електричного сигналу та характеристики засобів середовища перетворення електричного сигналу в акустичний. На підставі обґрунтованої структури математичної моделі, наведено підхід до ідентифікації інтервальної математичної моделі поширення електричного потенціалу в тканинах операційної рани під час подразнення їх імпульсним електричним струмом та формування реакції на подразнення голосових зв'язок у вигляді акустичного сигналу, яка на відміну від існуючих моделює інтервальну відстань від точки подразнення до ПГН в залежності від амплітуди акустичного сигналу та амплітуди його головної спектральної складової, і забезпечує зниження ризику пошкодження ПГН в процесі хірургічного втручання на щитоподібній залозі.

Для спрощення процедури ідентифікації інтервальної моделі, у заключній частині розділу наведено результати розробки нового методу ідентифікації інтервальної математичної моделі поширення електричного потенціалу в тканинах операційної рани та формування реакції на подразнення голосових зв'язок у вигляді акустичного сигналу, який на відміну від існуючих ґрунтується на поєднанні аналізу інтервальних даних та онтологічному підході, що у сукупності знижує час налаштування моделі під особливості тканин операційної рани пацієнта і забезпечує використання цієї моделі в програмно-апаратному комплексі для зниження ризику пошкодження ПГН.

У третьому розділі розкрито суть і принципи організації запропонованої інформаційної технології інтраопераційного нейромоніторингу. У схему технології введено два ключові кроки: адаптивне налаштування параметрів струму подразнення та оцінка відстані від точки подразнення на полі хірургічного втручання до поворотного гортанного нерва.

Процедура оцінки відстані ґрунтується на використанні математичних

моделей, розроблених у другому розділі. Крім того, детально розглянуто питання адаптивного налаштування параметрів імпульсного струму з метою визначення оптимальної частоти слідування імпульсів для стимуляції.

Також у цьому розділі запропоновано та обґрунтовано метод та алгоритм оптимального програмного налаштування частоти слідування імпульсів електричного струму, яким подразнюють тканини поля хірургічного втручання під час інтраопераційного моніторингу ПГН, який на відміну від існуючих адаптує параметри імпульсного струму під електрофізіологічні характеристики тканин поля хірургічного втручання конкретного пацієнта, що забезпечує підвищення чутливості тканин до подразнення і в цілому зниження ризику пошкодження ПГН.

У завершальній частині цього розділу наведено результати удосконалення архітектури програмного та апаратного забезпечення пристрою підтримки інтраопераційного моніторингу ПГН, які на відміну від існуючих забезпечили цілісне функціонування комплексу, реалізацію функцій адаптації параметрів імпульсного струму під електрофізіологічні характеристики тканин поля хірургічного втручання конкретного пацієнта та обчислення відстані від точки подразнення до ПГН, що у сукупності підвищило характеристику ужиткованості користувачем системи підтримки інтраопераційного моніторингу і можливість зниження ризику пошкодження ПГН. Визначено характеристики компонент апаратного забезпечення для пристрою інтраопераційного моніторингу ПГН, які забезпечують цілісне функціонування комплексу в режимі онлайн та наведено їх специфікацію.

У четвертому розділі наведено особливості побудови програмно-апаратного комплексу інтраопераційного моніторингу ПГН та організації користувацького інтерфейсу. Реалізовано програмно основні функції програмно-апаратного комплексу: програмне управління процесом генерування імпульсного електричного струму з метою подразнення тканин поля хірургічного втручання; програмне налаштування оптимальної частоти імпульсного струму, з метою адаптації під електрофізіологічні властивості

тканин поля хірургічного втручання пацієнта та досягнення максимальної чутливості щодо реакції на подразнення у вихідному акустичному сигналі; отримання за допомогою звукового сенсору інформаційного (акустичного) сигналу – реакції на подразнення тканин поля хірургічного втручання, перетворення цього сигналу до цифрового вигляду; виведення акустичного сигналу на гучномовець, з метою грубої оцінки характеру тканин точки подразнення користувачем (хірургом, чи асистентом хірурга); опрацювання інформаційного сигналу, перетвореного до цифрового вигляду, з метою сегментації, визначення амплітуди та основної спектральної складової з максимальною амплітудою; обчислення відстані від точки подразнення на полі хірургічної рани до ПГН та класифікація тканин у точці подразнення; візуалізація результатів опрацювання інформаційного сигналу; запис усіх результатів подразнення тканин у файл, з доступом через веб-сервіс.

У цьому розділі також наведено приклад побудови інтервальної моделі поширення електричного потенціалу та формування акустичного сигналу в інформаційній технології інтраопераційного моніторингу ПГН, який ґрунтується на використанні онтологічного опису показів до оперативного втручання на щитоподібній залозі. Наведено результати моделювання.

У завершальній частині розділу наведено результати дослідження ефективності використання програмно апаратного комплексу інтраопераційного моніторингу ПГН. Порівняльна оцінка кількості парезів гортані та спричинених ними порушень фонації після хірургічного лікування зоба у двох групах за період з 2009 по 2023 рік. Перша група включала пацієнтів, у яких ПГН (поворотний гортанний нерв) визначали лише візуально під час операції на щитоподібній залозі. Друга група включала пацієнтів, яким проводили операції на щитоподібній залозі з використанням ІОНМ ПГН і зовнішніх гілок верхніх гортанних нервів із використанням розробленого програмно-апаратного комплексу. Аналіз кількості ушкоджень гортанних нервів у обох групах показав, що в групі з використанням ІОНМ на основі розробленого програмно-апаратного комплексу вони були в 2,5 раза менші, ніж у групі пацієнтів, яким операції

виконували з візуальною ідентифікацією нервів. Загалом порушення фонації у пацієнтів першої групи спостерігалися у 22 випадках, що становило 10,6% від числа оперованих пацієнтів, а у пацієнтів другої групи спостерігалися у 9 випадках (4,5%) ушкоджень гортанних нервів від числа оперованих пацієнтів. Таким чином, ризик ушкодження ПГН без використання розробленого програмно-апаратного комплексу, обчислений на фіксованій вибірці пацієнтів складає 10,6%, а у випадку його застосування, усього 4,5%, що вказує на зниження ризику, приблизно у 2,5 разів.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

Ключові слова: інформаційна технологія, система, архітектура програмного забезпечення, програмні засоби, програмно-апаратний комплекс, математична модель, моделювання, інтервальний аналіз, онтологічний підхід, ідентифікація, оптимізація, щитоподібна залоза, поворотний гортанний нерв, інтраопераційний моніторинг, контролер, сенсор, надійність, відсутні дані, обробка даних, біомедичні прилади та системи, медичні системи, безпека пацієнта, медична діагностика, сервер, Redis, мікросервіси, веб.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Dyvak M., Melnyk A., Tymets V., Dyvak A., Banasik A., Piotrowski K., Wawryszczuk M. Electromyographic Identification of the Recurrent Laryngeal Nerve Using an Integrated Hardware–Software System During Thyroid Surgery. *Applied Sciences* (Switzerland), 2025, Vol. 15 (18), art. no. 10009. (1,18 д.а. / 0,4 д.а.; особистий внесок: архітектура програмно-апаратного комплексу та оцінка його ефективності).

DOI: <https://doi.org/10.3390/app 151810009> (Scopus, Q2).

2. Шідловський В., Шідловський О., Дивак А., Морозович І., Привроцький В. Оцінка методів ідентифікації та моніторингу нервів гортані. *Клінічна ендокринологія та ендокринна хірургія*, 2025, вип. 1, с. 27 – 34. (0,8 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: підбір матеріалів клінічних досліджень).

DOI: <https://doi.org/10.30978/CEES-2025-1-27> (Scopus).

3. Dyvak M., Deikalo I., Tymets V., Dyvak A., Osadchuk D. Concept of applying EMG for the hardware and software complex recurrent laryngeal nerve identification during thyroid surgery. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2025, p. 678 – 682. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: принципи побудови методу оптимального програмного налаштування частоти слідування імпульсів електричного струму).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185593> (Scopus).

4. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A., Kostyk B., Tyran S., Maslyiak Y. Increasing the Effectiveness of Neural Networks for Recurrent Laryngeal Nerve Identification by Signal Preprocessing. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2025, p. 683 – 687. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: підбір матеріалів та проведення клінічних досліджень).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185581> (Scopus).

5. Дивак А.М., Мельник А.М. Математична модель процесу поширення електричного потенціалу в тканинах поля хірургічного втручання та метод її ідентифікації на основі онтологічного підходу. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Випуск 50, № 2 (грудень 2025), с. 40 – 53. (1 д.а. / 0,8 д.а.; особистий внесок: математична модель процесу поширення електричного потенціалу в тканинах поля хірургічного втручання та метод її ідентифікації на основі онтологічного підходу).

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-40-53>

6. Шідловський В., Шідловський О., Дивак А., Привроцький В., Морозович І. Ідентифікація та моніторинг нервів гортані: технології та проблеми. Огляд літератури. Клінічна ендокринологія та ендокринна хірургія, 2024, вип. 1, с. 56 – 64. (0,9 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: підбір матеріалів, огляд літератури).

DOI: <https://doi.org/10.30978/CEES-2024-1-56> (Scopus).

7. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A. Laryngeal Nerve Identification during

Thyroid Surgery with Automatic Adjustment of Electrical Signal Parameters. International Journal of Computing. Vol. 23 (4), p. 552 – 562, 2024. (1,1 д.а. / 0,4 д.а.; особистий внесок: обґрунтування методу та розробка алгоритму оптимального програмного налаштування частоти слідування імпульсів електричного струму; удосконалена архітектура програмно-апаратного комплексу ІОНМ ПГН).

DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3754> (Scopus, Q3).

8. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A., Shidlovsky V., Osadchuk D., Bukata V. Algorithm and Hardware for Automatic Adjustment of Electric Signal to Identify the Recurrent Laryngeal Nerve. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2024, p. 626 – 630. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: програмне управління частотою слідування імпульсів електричного струму).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712564> (Scopus).

9. Dyvak M., Pasichnyk R., Melnyk A., Dyvak A., Otoo F. Transformation of Mathematical Model for Complex Object in Form of Interval Difference Equations to a Differential Equation. International Journal of Computing. Vol. 22 (2), p. 219 – 224, 2023. (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: постановка задачі ідентифікації інтервальної моделі, та обґрунтування методів її розв'язування).

DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.22.2.3091> (Scopus, Q4).

10. Melnyk A., Dyvak A., Pryvrotsky V., Franko Y., Łysik Ł., Shpak V. Information Technology based on an Ontological Approach for Identification of the Recurrent Laryngeal Nerve during Operations on the Neck Organs. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2023, p. 534 – 538. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: удосконалена інформаційна технологія ІОНМ ПГН).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275656> (Scopus).

11. Shidlovsky V., Shidlovsky O., Dyvak A., Pryvrotsky V., Spivak I. Research of Efficiency of Information Technology of Intraoperative Neuromonitoring in the Prevention of Injuries of Laryngeal Nerves. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2022, p. 406 –

409. (0,4 д.а. / 0,09 д.а.; особистий внесок: дослідження ефективності програмно-апаратного комплексу ІОНМ ПГН під час клінічних випробувань).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913181> (Scopus).

12. Шідловський В.О., Шідловський О. В., Дивак А.М., Привроцький В.М. Інтраопераційний нейромоніторинг у запобіганні травм нервів гортані. Здобутки клінічної і експериментальної медицини. № 2 (Серпень 29, 2022). С. 173 – 177. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: огляд літературних джерел).

DOI: <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2022.v.i2.13148>

13. Dyvak M., Melnyk A., Kopnický M., Dostalek L., Krytskyi I., Dyvak A. Using an ontological approach for improvement of the interval model in the problem of the recurrent laryngeal nerve identification during thyroid surgery. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3038, 2021, p. 317 – 322. (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: застосування онтологічного підходу для методу ідентифікації інтервальної математичної моделі).

<https://ceur-ws.org/Vol-3038/short12.pdf> (Scopus).

14. Dyvak M., Porplytsya N., Dyvak A., Shidlovsky O., Osadchuk D., Pryvrotsky V. Interval Model for Assessing the Position of the Recurrent Laryngeal Nerve at the Site of Surgery Wound during Thyroid Surgery. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2021, p. 117 – 120. (0,4 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: інтервальна математична модель для визначення розміщення ПГН та метод її ідентифікації).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548118> (Scopus).

15. Dyvak M., Dyvak A., Osadchuk D., Tymets V., Shidlovsky V., Kovalska L. Information Technology for Recurrent Laryngeal Nerve Identification with Adaptive Adjustment of the Electrophysiological Method. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2020, art. no. 9209012, p. 297 – 301. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: удосконалена інформаційна технологія ІОНМ ПГН з функцією програмного управління частотою слідування імпульсів електричного струму).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9209012> (Scopus).

16. Дивак М., Тимець В., Дивак А. Багатофункціональний блок подразнення зворотного гортанного нерва у задачі його ідентифікації. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Випуск 38, № 2 (Березень 2020), с. 90 – 99. (1 д.а. / 0,4 д.а.; особистий внесок: апаратна архітектура комплексу).

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-38-2-90-99>.

17. Dyvak A., Shidlovsky V., Lazarchuk T., Bohaichuk V., Bohaichuk L., Mochulska O. Parameters of the Electrophysiological Method of Surgical Wound Tissues Stimulation in the software and Technical System of the Recurrent Laryngeal Nerve Identification. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2019, art. no. 8779942, p. 303 – 307. (0,5 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: електрофізіологічний метод подразнення тканин хірургічної рани та його клінічні випробовування).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779942> (Scopus).

18. Shidlovskiy O.V., Sheremet M.I., Shidlovskiy V.O., Dyvak A.M., Maksymyuk V.V., Tkachuk N.P., Chympoi K.A., Honcharuk L.M., Batig V.M., Rynzhuk V.Y., Gresko M.D., Bulik T.S., Rynzhuk L.V. Clinical application and results of the electrophysiological laryngeal nerves identification in surgeries in case of goiter. Archives of the Balkan Medical Union. Vol. 53 (1), p. 23 – 28. (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: підбір матеріалів та проведення клінічних досліджень).

<https://umbalk.org/wp-content/uploads/2018/03/02.CLINICAL-APPLICATION-AND-RESULTS-OF-THE.pdf> (Scopus).

19. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A., Huhul O. Methods and tools for electrophysiological monitoring of recurrent laryngeal nerve monitoring during surgery on neck organs. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2300, p. 54 – 57. (0,4 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: елементи архітектури програмно-апаратного комплексу).

<https://ceur-ws.org/Vol-2300/Paper14.pdf> (Scopus).

20. Dyvak M., Pukas A., Padletska N., Shidlovsky V., Dyvak A. Mathematical models of informative characteristic of tissues in surgical wound at

monitoring the recurrent laryngeal nerve by electrophysiological method. 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 - Proceedings, art. no. 7916074, p. 8 – 12. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: математичні моделі інформативних характеристик тканин хірургічної рани).

DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM.2017.7916074> (Scopus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

21. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A. Application of Convolutional Neural Network for the Task of Recurrent Laryngeal Nerve Identification. Conference Proceedings - 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2024, p. 504 – 509. (0,6 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: огляд літератури та архітектура програмно-апаратного комплексу).

DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755896> (Scopus).

22. Pukas A., Smal V., Dyvak A., Voytyuk I., Deikalo I., Hrynkiv N. Augmented Reality Simulator for Recurrent Laryngeal Nerve Identification during Thyroid Surgery. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2024, p. 576 – 580. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: концепція віртуального імітатора для використання програмно-апаратного комплексу ІОММ ПГН).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712599> (Scopus).

23. Avrunin O.G., Mustetsova E., Zlepko S.M., Zabolotna N.I., Baranovskiy D.M., Dyvak A.M., Maciejewski M., Bazarbyeva A. Possibilities of apnea diagnostics by fuzzy logic methods. Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, p. 39 – 46. (0,8 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: огляд літератури).

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429057618-6/possibilities-apnea-diagnostics-fuzzy-logic-methods-avrunin-mustetsova->

[zlepko-zabolotna-baranovskiy-dyvak-maciejewski-bazarbayeva?context=ubx&refId=032647ef-fcce-476a-adbc-c5b1f277d425](https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429057618-7/mathematical-simulation-structure-pulsed-arterial-pressure-relations-vascular-damage-factors-patients-arterial-hypertension-vysotska-bespalov-pecherska-koval-lytvynova-dyvak-maciejewski-kalizhanova)

(Scopus).

24. Vysotska O.V., Bespalov Y.G., Pecherska A.I., Koval S.M., Lytvynova O.M., Dyvak A.M., Maciejewski M., Kalizhanova A. Mathematical simulation of the structure of pulsed arterial pressure relations with vascular damage factors in patients with arterial hypertension. Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, p. 47 – 52. (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: огляд літератури).

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429057618-7/mathematical-simulation-structure-pulsed-arterial-pressure-relations-vascular-damage-factors-patients-arterial-hypertension-vysotska-bespalov-pecherska-koval-lytvynova-dyvak-maciejewski-kalizhanova> (Scopus).

25. Dyvak M., Dyvak A., Tymets V., Cegielski M. Information technology for electrophysiological approach of recurrent laryngeal nerve identification during surgery on neck organs. Proceedings of 2018 19th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2018, p. 1 – 4 (0,4 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: базові принципи побудови інформаційної технології ІОМ ПГН).

DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2018.8506940> (Scopus).

26. Dyvak M., Tymets V., Brych V., Dyvak A., Shidlovsky V. Tools for the recurrent laryngeal nerve stimulation in the tasks of its monitoring. International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, p. 215 – 218. (0,4 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: обґрунтування вибору апаратних складових програмно-апаратного комплексу ІОМ ПГН).

DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365736> (Scopus).

27. Дивак А.М. Особливості передачі електричних сигналів нервовими тканинами та їх моніторинг в процесі хірургічних операцій. Матеріали

Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології», Тернопіль 2017, с. 19 – 20. (0,1 д.а.; результати досліджень проходження електричних імпульсів в нервових тканин).

<https://api.dspace.wunu.edu.ua/api/core/bitstreams/9b7d0e97-54d8-475d-b342-7830d58b8916/content>

28. Krepych S., Dyvak A., Dyvak M., Spivak I. The method of providing of functional suitability of elements of the device of formation of signal in electrophysiological way of classification tissues surgical wound. 2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings, art. no. 7937562, p. 183 – 186. (0,4 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: дослідження надійності елементів програмно-апаратного комплексу ІОНМ ПГН).

DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937562> (Scopus).

29. Дивак М.П., Дивак А.М., Шідловський О.В. Електричні властивості зворотного гортанного нерва та його моніторинг в процесі операції на щитоподібній залозі. Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів ACIT'2016. Тернопіль: ТНЕУ 2016, с. 33 – 34. (0,1 д.а. / 0,04 д.а.; особистий внесок: моделі електричних властивостей тканин хірургічної рани).

<https://api.dspace.wunu.edu.ua/api/core/bitstreams/8d68f7f0-6909-44c6-bdd6-0b40d19f6f34/content>

30. Дивак М.П., Падлецька Н.І., Дивак А.М., Ковальська Л.Й. Модель електропровідності тканин хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі у вигляді замісної електричної схеми. Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів ACIT'2015. Тернопіль: ТНЕУ 2015, с. 18 – 20. (0,1 д.а. / 0,02 д.а.; особистий внесок: електрична модель електропровідності тканин хірургічної рани під час операції на щитоподібній).

https://acit.tech/Download/Tezy_ACIT'2015.pdf

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати
дисертації*

31. Дивак М.П., Пукас А.В., Тимець В.І., Дивак А.М. Спосіб ідентифікації гортанного нерва з інших тканин хірургічної рани при проведенні хірургічних операцій на щитоподібній залозі. Патент України на корисну модель № 124989 від 25.04.2018. Бюл. № 8. (особистий внесок: інформаційна технологія ідентифікації гортанного нерва з інших тканин хірургічної рани при проведенні хірургічних операцій на щитоподібній залозі).

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/330460/>

ANNOTATION

Dyvak A.M. Mathematical and software support for neuromonitoring during thyroid surgery. – Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 – Software Engineering – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The research was carried out at the Department of Computer Sciences of the West Ukrainian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation addresses the scientific and technical task of developing mathematical and software support for the information technology and hardware-software complex for intraoperative neuromonitoring during thyroid surgery. This system extends the functions of the hardware-software complex for adjusting electrical current parameters based on the electrophysiological properties of tissues in the surgical field of a specific patient and provides control of the distance from the stimulation point to the recurrent laryngeal nerve (RLN). The aim of the research is to reduce the risk of RLN injury during thyroid surgery through the development of mathematical and software support for the hardware-software complex for intraoperative neuromonitoring.

The introduction presents the relevance of the dissertation topic, its aim and main objectives, as well as the scientific novelty and practical significance.

The first chapter provides a detailed analysis of current intraoperative neuromonitoring technologies and practical aspects of their application. The analysis showed that the electrophysiological monitoring method is the most promising approach to significantly reduce the risk of RLN injury. This method involves stimulation of tissues in the surgical field near the RLN and subsequent evaluation of the muscular response by monitoring vocal cord contractions using a specialized sensor. It was also found that the frequency of electrical pulses used for RLN stimulation varies depending on the clinical case, generally ranging from a few to several tens of hertz.

The chapter further reviews existing hardware-software complexes, biomedical

devices and systems, and intraoperative neuromonitoring systems. It is noted that all systems aim to ensure patient safety and reduce the risk of RLN injury. Both universal monitoring systems and medical diagnostic systems, as well as systems specifically focused on RLN monitoring, are considered. Most of these systems are based on single-board computers and use electrophysiological stimulation with a sound sensor integrated into the endotracheal tube to detect responses. The main limitations of these existing solutions were identified, which are critical for designing more effective systems.

At the end of the first chapter, based on the analysis and identified shortcomings of existing solutions, the scientific and technical task was formulated, defining the aim and main objectives of the dissertation. The conclusions summarize the literature review results and justify the relevance of developing a new intraoperative neuromonitoring system.

The analysis of existing RLN neuromonitoring technologies in the first chapter revealed significant limitations. Specifically, current methods of modeling the electrophysiological properties of surgical field tissues, which are based on difference or algebraic equations, only describe the distribution of information signal characteristics. Since this distribution lacks visual reference to specific tissues, it does not allow the surgeon or assistant to accurately determine the nerve's location in the surgical field.

To address this critical limitation, the development and implementation of a new mathematical model in intraoperative neuromonitoring technology was justified. This model enables the determination of the distance from the stimulation point in the tissues to the RLN and should comprehensively represent both the propagation of electric potential in the surgical field tissues and the formation of an acoustic signal due to vocal cord contraction.

The second chapter presents the results of studies on the electrical stimulation of tissues and the distribution of electrical current. Experimental results show that nerve excitation depends on the distance from the stimulation point to the RLN, and the resulting acoustic signal generated by vocal cord contraction serves as an indicator

of this distance. The key signal characteristics affecting this distance are the amplitude of the acoustic signal and the amplitude of its main spectral component.

Based on assumptions from the neural chronaxie theory of voice formation (Yusson), the structure of an interval mathematical model was proposed and justified for the propagation of electric potential in the surgical tissues during pulse stimulation and for the generation of the acoustic response of vocal cords. The proposed structure consists of an interval equation with two additive components: one describing the propagation of electric potential in the surgical field tissues, and another representing a quadratic relationship between the distance from the stimulation point to the RLN and the maximum amplitude of the main spectral component of the acoustic signal. In the first component, the unknown coefficients are α (signal attenuation, depending on tissue type) and k (describing the propagation medium and the conversion characteristics of the signal to an acoustic response). Based on the proposed model structure, an approach for identification of the interval mathematical model was developed. Unlike existing models, it simulates the interval distance from the stimulation point to the RLN based on the amplitude of the acoustic signal and its main spectral component, thus reducing the risk of RLN injury during thyroid surgery.

To simplify model identification, a new method was developed that combines interval data analysis with an ontological approach, reducing the time required to adapt the model to the patient-specific tissue characteristics and enabling its use in the hardware-software complex to reduce RLN injury risk.

The third chapter describes the principles and organization of the proposed information technology for intraoperative neuromonitoring. The technology involves two key steps: adaptive adjustment of stimulation current parameters and estimation of the distance from the stimulation point to the RLN. The distance estimation procedure is based on the mathematical models developed in chapter two. Additionally, adaptive adjustment of pulse frequency is considered to determine the optimal stimulation parameters.

A method and algorithm for optimal software adjustment of stimulation pulse frequency were proposed. Unlike existing methods, it adapts pulse parameters to the

electrophysiological properties of the patient's surgical tissues, improving tissue sensitivity to stimulation and reducing RLN injury risk.

The final part of the chapter presents improvements to the architecture of the hardware-software complex for RLN intraoperative monitoring. These improvements ensure integrated functioning of the system, adaptation of pulse parameters to tissue characteristics, and calculation of the distance from the stimulation point to the RLN, increasing usability and reducing RLN injury risk. Specifications of the hardware components are provided.

The fourth chapter details the design of the hardware-software complex and the user interface. The software implements key functions: control of pulse generation for tissue stimulation, adaptive adjustment of pulse frequency for maximum sensitivity, acquisition of the acoustic signal via the sensor, digital conversion, visualization, and storage of all results accessible via web services.

An example of building an interval model of electric potential propagation and acoustic signal formation is presented, based on the ontological description of surgical indications. The results of modeling are shown.

The final section presents the evaluation of the system's effectiveness. A comparative analysis of RLN paresis and resulting voice disorders was conducted in two patient groups from 2009 to 2023. The first group underwent thyroid surgery with visual identification of the RLN, while the second group used IONM with the developed hardware-software complex. RLN injuries in the IONM group were 2.5 times lower than in the visual identification group: 10.6% vs. 4.5%. This demonstrates that using the developed system reduces RLN injury risk by approximately 2.5 times.

Evaluation of the developed system showed a reduction in RLN injury: in a comparison of two patient groups (2009–2023), RLN injuries in patients monitored with the proposed system were 4.5% versus 10.6% in the visually identified group, demonstrating a 2.5-fold risk reduction.

Keywords: information technology, system, software architecture, software tools, hardware-software complex, mathematical model, modeling, interval analysis, ontological approach, identification, optimization, thyroid gland, recurrent laryngeal

nerve, intraoperative monitoring, controller, sensor, reliability, missing data, data processing, biomedical devices and systems, medical systems, patient safety, medical diagnostics, server, Redis, microservices, web.

LIST OF PUBLISHED PAPERS BY THE TOPIC OF THESIS

*Scientific papers in which the main scientific results of the
dissertation were published*

1. Dyvak M., Melnyk A., Tymets V., Dyvak A., Banasik A., Piotrowski K., Wawryszczuk M. Electromyographic Identification of the Recurrent Laryngeal Nerve Using an Integrated Hardware–Software System During Thyroid Surgery. *Applied Sciences* (Switzerland), 2025, Vol. 15 (18), art. no. 10009. (1.18 p.s. / 0,4 p.s.; personal contribution: architecture of the hardware-software system and evaluation of its efficiency).

DOI: <https://doi.org/10.3390/app151810009> (Scopus, Q2).

2. Shidlovskiy V.O., Shidlovskiy O.V., Dyvak A.M., Morozovych I.I., Pryvrotskyy V.M. Evaluation of methods for identifying and monitoring laryngeal nerves. *Clinical Endocrinology and Endocrine Surgery*, 2025, vol. 1, p. 27 – 34. (0,8 p.s. / 0,2 p.s.; personal contribution: selection of materials for clinical studies).

DOI: <https://doi.org/10.30978/CEES-2025-1-27> (Scopus).

3. Dyvak M., Deikalo I., Tymets V., Dyvak A., Osadchuk D. Concept of applying EMG for the hardware and software complex recurrent laryngeal nerve identification during thyroid surgery. *Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT*, 2025, p. 678 – 682. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: principles of designing a method for optimal software-based adjustment of the repetition frequency of electric current pulses).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185593> (Scopus).

4. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A., Kostyk B., Tyran S., Maslyiak Y. Increasing the Effectiveness of Neural Networks for Recurrent Laryngeal Nerve Identification by Signal Preprocessing. *Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT*, 2025, p. 683 – 687. (0,5 p.s. /

0,1 p.s.; personal contribution: selection of materials and conduct of clinical studies).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185581> (Scopus).

5. Dyvak A. M., Melnyk A. M. Mathematical Model of the Electric Potential Propagation Process in the Tissues of the Surgical Field and a Method for Its Identification Based on an Ontological Approach. Optical and Electronic Information and Energy Technologies, Issue 50, No. 2 (December 2025), p. 40 – 53. (1 p. s. / 0.8 p. s.; personal contribution: development of the mathematical model of the electric potential propagation process in the tissues of the surgical field and the method for its identification based on an ontological approach).

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-40-53>

6. Shidlovskiy V.O., Shidlovskiy O.V., Dyvak A.M., Pryvotskiy V.M., Morozovych I.I. Identification and monitoring of laryngeal nerves: technologies and problems. Review. Clinical Endocrinology and Endocrine Surgery, 2024, vol. 1, p. 56 – 64. (0,9 p.s. / 0,3 p.s.; personal contribution: selection of materials, literature review).

DOI: <https://doi.org/10.30978/CEES-2024-1-56> (Scopus).

7. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A. Laryngeal Nerve Identification during Thyroid Surgery with Automatic Adjustment of Electrical Signal Parameters. International Journal of Computing. Vol. 23 (4), p. 552 – 562, 2024. (1,1 p.s. / 0,4 p.s.; personal contribution: justification of the method and development of an algorithm for optimal software-based adjustment of the repetition frequency of electric current pulses; improved architecture of the IONM PNG hardware - software system).

DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3754> (Scopus, Q3).

8. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A., Shidlovsky V., Osadchuk D., Bukata V. Algorithm and Hardware for Automatic Adjustment of Electric Signal to Identify the Recurrent Laryngeal Nerve. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2024, p. 626 – 630. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: software control of electric current pulse repetition frequency).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712564> (Scopus).

9. Dyvak M., Pasichnyk R., Melnyk A., Dyvak A., Otoo F. Transformation of Mathematical Model for Complex Object in Form of Interval Difference Equations

to a Differential Equation. International Journal of Computing. Vol. 22 (2), p. 219 – 224, 2023. (0,6 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: formulation of the problem of interval model identification and justification of methods for its solution).

DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.22.2.3091> (Scopus, Q4).

10. Melnyk A., Dyvak A., Pryvrotsky V., Franko Y., Łysik Ł., Shpak V. Information Technology based on an Ontological Approach for Identification of the Recurrent Laryngeal Nerve during Operations on the Neck Organs. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2023, p. 534 – 538. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: improved information technology of the IONM PNG system).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275656> (Scopus).

11. Shidlovsky V., Shidlovsky O., Dyvak A., Pryvrotsky V., Spivak I. Research of Efficiency of Information Technology of Intraoperative Neuromonitoring in the Prevention of Injuries of Laryngeal Nerves. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2022, p. 406 – 409. (0,4 p.s. / 0,09 p.s.; personal contribution: investigation of the effectiveness of the IONM PNG hardware - software system during clinical trials).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913181> (Scopus).

12. Shidlovskiy V.O., Shidlovskiy O.V., Dyvak A.M., Pryvrotskiy V.M. Intraoperative neuromonitoring in the prevention of laryngeal nerve injuries. Achievements of Clinical and Experimental Medicine, No. 2 (August 29, 2022), p. 173–177. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: literature review).

DOI: <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2022.v.i2.13148>

13. Dyvak M., Melnyk A., Kopnický M., Dostalek L., Krytskyi I., Dyvak A. Using an ontological approach for improvement of the interval model in the problem of the recurrent laryngeal nerve identification during thyroid surgery. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3038, 2021, p. 317 – 322. (0,6 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: application of the ontological approach to the method of interval mathematical model identification).

<https://ceur-ws.org/Vol-3038/short12.pdf> (Scopus).

14. Dyvak M., Porplytsya N., Dyvak A., Shidlovsky O., Osadchuk D., Pryvrotsky V. Interval Model for Assessing the Position of the Recurrent Laryngeal Nerve at the Site of Surgery Wound during Thyroid Surgery. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2021, p. 117 – 120. (0,4 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: interval mathematical model for determining the placement of PGN and the method of its identification).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548118> (Scopus).

15. Dyvak M., Dyvak A., Osadchuk D., Tymets V., Shidlovsky V., Kovalska L. Information Technology for Recurrent Laryngeal Nerve Identification with Adaptive Adjustment of the Electrophysiological Method. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2020, art. no. 9209012, p. 297 – 301. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: enhanced information technology of the IONM PNG system with a software-based control function for the electric current pulse repetition frequency).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9209012> (Scopus).

16. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A. Multifunctional stimulation unit for the recurrent laryngeal nerve in the task of its identification. Opto-Electronic Information and Power Technologies, Issue 38, No. 2 (March 2020), p. 90 – 99. (1 p.s. / 0,4 p.s.; personal contribution: hardware architecture of the system).

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-38-2-90-99>.

17. Dyvak A., Shidlovsky V., Lazarchuk T., Bohaichuk V., Bohaichuk L., Mochulska O. Parameters of the Electrophysiological Method of Surgical Wound Tissues Stimulation in the software and Technical System of the Recurrent Laryngeal Nerve Identification. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2019, art. no. 8779942, p. 303 – 307. (0,5 p.s. / 0,2 p.s.; personal contribution: electrophysiological method of stimulation of surgical wound tissues and its clinical trials).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779942> (Scopus).

18. Shidlovskiy O.V., Sheremet M.I., Shidlovskiy V.O., Dyvak A.M., Maksymyuk V.V., Tkachuk N.P., Chympoi K.A., Honcharuk L.M., Batig V.M.,

Rynzhuk V.Y., Gresko M.D., Bulik T.S., Rynzhuk L.V. Clinical application and results of the electrophysiological laryngeal nerves identification in surgeries in case of goiter. Archives of the Balkan Medical Union. Vol. 53 (1), p. 23 – 28. (0,6 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: selection of materials and conduct of clinical studies).

<https://umbalk.org/wp-content/uploads/2018/03/02.CLINICAL-APPLICATION-AND-RESULTS-OF-THE.pdf> (Scopus).

19. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A., Huhul O. Methods and tools for electrophysiological monitoring of recurrent laryngeal nerve monitoring during surgery on neck organs. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2300, p. 54 – 57. (0,4 p.s. / 0,2 p.s.; personal contribution: elements of the hardware–software system architecture).

<https://ceur-ws.org/Vol-2300/Paper14.pdf> (Scopus).

20. Dyvak M., Pukas A., Padletska N., Shidlovsky V., Dyvak A. Mathematical models of informative characteristic of tissues in surgical wound at monitoring the recurrent laryngeal nerve by electrophysiological method. 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 - Proceedings, art. no. 7916074, p. 8 – 12. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: mathematical models of informative characteristics of surgical wound tissues).

DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM.2017.7916074> (Scopus).

Scientific works certifying the approval of the dissertation materials

21. Dyvak M., Tymets V., Dyvak A. Application of Convolutional Neural Network for the Task of Recurrent Laryngeal Nerve Identification. Conference Proceedings - 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2024, p. 504 – 509. (0,6 p.s. / 0,3 p.s.; personal contribution: literature review and architecture of the hardware - software system).

DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755896> (Scopus).

22. Pukas A., Smal V., Dyvak A., Voytyuk I., Deikalo I., Hrynkiv N. Augmented Reality Simulator for Recurrent Laryngeal Nerve Identification during

Thyroid Surgery. Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2024, p. 576 – 580. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: concept of a virtual simulator for the use of the IONM PNG hardware - software system).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712599> (Scopus).

23. Avrunin O.G., Mustetsova E., Zlepko S.M., Zabolotna N.I., Baranovskiy D.M., Dyvak A.M., Maciejewski M., Bazarbyeva A. Possibilities of apnea diagnostics by fuzzy logic methods. Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, p. 39 – 46. (0,8 p.s. / 0,2 p.s.; personal contribution: literature review).

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429057618-6/possibilities-apnea-diagnostics-fuzzy-logic-methods-avrunin-mustetsova-zlepko-zabolotna-baranovskiy-dyvak-maciejewski-bazarbayeva?context=ubx&refId=032647ef-fcce-476a-adbc-c5b1f277d425> (Scopus).

24. Vysotska O.V., Bespalov Y.G., Pecherska A.I., Koval S.M., Lytvynova O.M., Dyvak A.M., Maciejewski M., Kalizhanova A. Mathematical simulation of the structure of pulsed arterial pressure relations with vascular damage factors in patients with arterial hypertension. Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, p. 47 – 52. (0,6 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: literature review).

<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429057618-7/mathematical-simulation-structure-pulsed-arterial-pressure-relations-vascular-damage-factors-patients-arterial-hypertension-vysotska-bespalov-pecherska-koval-lytvynova-dyvak-maciejewski-kalizhanova> (Scopus).

25. Dyvak M., Dyvak A., Tymets V., Cegielski M. Information technology

for electrophysiological approach of recurrent laryngeal nerve identification during surgery on neck organs. Proceedings of 2018 19th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2018, p. 1 – 4 (0,4 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: basic principles of designing the IONM PNG information technology).

DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2018.8506940> (Scopus).

26. Dyvak M., Tymets V., Brych V., Dyvak A., Shidlovsky V. Tools for the recurrent laryngeal nerve stimulation in the tasks of its monitoring. International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, p. 215 – 218. (0,4 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: justification of the selection of hardware components for the IONM PNG hardware–software system).

DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365736> (Scopus).

27. Dyvak A.M. Peculiarities of electrical signal transmission by neural tissues and their monitoring during surgical procedures. In: Proceedings of the All-Ukrainian Conference with International Participation «Advanced Computer Information Technologies», Ternopil, 2017, p. 19 – 20. (0,1 p.s.; studies of the propagation of electrical impulses in nervous tissues)

<https://api.dspace.wunu.edu.ua/api/core/bitstreams/9b7d0e97-54d8-475d-b342-7830d58b8916/content>

28. Krepych S., Dyvak A., Dyvak M., Spivak I. The method of providing of functional suitability of elements of the device of formation of signal in electrophysiological way of classification tissues surgical wound. 2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings, art. no. 7937562, p. 183 – 186. (0,4 p.s. / 0,2 p.s.; personal contribution: reliability study of the components of the IONM PNG hardware - software system).

DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937562> (Scopus).

29. Dyvak M.P., Dyvak A.M., Shidlovskiy O.V. Electrical properties of the recurrent laryngeal nerve and its monitoring during thyroid surgery. In: Advanced Computer Information Technologies: Proceedings of the VI All-Ukrainian School-

Seminar of Young Scientists and Students ACIT'2016, Ternopil: TNEU, 2016, p. 33 – 34. (0,1 p.s. / 0,04 p.s.; personal contribution: models of the electrical properties of surgical wound tissues).

<https://api.dspace.wunu.edu.ua/api/core/bitstreams/8d68f7f0-6909-44c6-bdd6-0b40d19f6f34/content>

30. Dyvak M.P., Padletska N.I., Dyvak A.M., Kovalska L.Y. A model of electrical conductivity of surgical wound tissues during thyroid surgery in the form of an equivalent electrical circuit. In: Advanced Computer Information Technologies: Proceedings of the V All-Ukrainian School-Seminar of Young Scientists and Students ACIT'2015, Ternopil: TNEU, 2015, p. 18 – 20. (0,1 p.s. / 0,02 p.s.; personal contribution: electrical model of the conductivity of surgical wound tissues during thyroid gland surgery).

https://acit.tech/Download/Tezy_ACIT'2015.pdf

Scientific publications that additionally reflect the research results of the dissertation

31. Dyvak M.P., Pukas A.V., Tymets V.I., Dyvak A.M. Method for identification of the laryngeal nerve from other tissues of the surgical wound during thyroid surgery. Utility Model Patent of Ukraine No. 124989 dated April 25, 2018. Bulletin No. 8. (personal contribution: information technology for identifying the laryngeal nerve among other tissues of the surgical wound during thyroid gland surgery).

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/330460/>