

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-13>

УДК 004.9 : 004.78

ГРИЩУК Ілля

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8105-9562>

illia.hryshchuk@gmail.com

ГОВОРУЩЕНКО Тетяна

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>

e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua

КИСІЛЬ Тетяна

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1091-3327>

kysil_tanya@ukr.net

ГНАТЧУК Єлизавета

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2989-3183>

e-mail: hnatchuky@khmnu.edu.ua

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСФУНКЦІЇ КАРДІОСТИМУЛЯТОРА

Пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями, особливо з аритміями, необхідно спостерігати у режимі реального часу, щоб мінімізувати виникнення критичних станів, що можуть призвести до смерті. Діагностика серцево-судинних захворювань в тому числі й аритмій, також потребує постійного довготривалого моніторингу. Найкращим рішенням є постійний моніторинг частоти серцевих скорочень з використанням автоматизованих або автоматичних інструментів та технологій для моніторингу параметрів роботи серця.

На коректність роботи кардіостимулятора може впливати величезна кількість факторів: вік та зношеність кардіостимулятора, електромагнітні перешкоди, проблеми з вбудованим програмним забезпеченням кардіостимулятора, некоректне або погане підключення електродів кардіостимулятора, механічні ушкодження кардіостимулятора, низький заряд батареї кардіостимулятора, вплив високовольтного обладнання, біатрофія, викликана певними медичними процедурами, електростатичні розряди у навколишньому середовищі, інтерференція від бездротових пристроїв, екстремальні температури. Усі ці ризики повинні бути мінімізовані.

Нерозпізані дисфункції кардіостимулятора можуть призвести до серйозних ускладнень в пацієнтів, тому виявлення проблем у ранній стадії є критично важливим для запобігання таких ускладнень.

На сьогодні актуальною є задача розроблення мультимодальної інформаційної технології, яка поєднуватиме декілька шляхів розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора з метою забезпечення високої надійності їх виявлення – опрацюватиме діагностичні дані та повідомлення з кардіостимулятора, виконуватиме моніторинг роботи серця, зчитування електрокардіограми та аналіз серцевого ритму, застосуватиме спеціальні алгоритми для виявлення аномальних ситуацій, які можуть свідчити про дисфункцію кардіостимулятора, використовуватиме сенсори, що здатні виявляти зміни в серцевій діяльності, та автоматично повідомлятиме про будь-які виявлені дисфункції.

Як показав проведений аналіз, відомі на сьогодні рішення не розв'язують задачі розроблення мультимодальної інформаційної технології, яка поєднує всі шляхи розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора з метою забезпечення високої надійності їх виявлення.

Ключові слова: мультимодальні інформаційні технології, дисфункції кардіостимуляторів, способи розпізнавання дисфункцій кардіостимуляторів.

HRYSHCHUK Iliia, HOVORUSHCHENKO Tetiana, KYSIL Tetiana, HNATCHUK Yelyzaveta

Khmelnytskyi National University

ANALYSIS OF KNOWN METHODS AND INFORMATION TECHNOLOGIES FOR RECOGNIZING PACEMAKER DYSFUNCTION

Patients with cardiovascular diseases, especially arrhythmias, need to be monitored in real time to minimize the occurrence of critical conditions that can lead to death. The diagnosis of cardiovascular diseases, including arrhythmias, also requires constant long-term monitoring. The best solution is to continuously monitor heart rate using automated or automated tools and technologies for monitoring heart function.

Many factors can affect the correct functioning of a pacemaker age and wear of the pacemaker, electromagnetic interference, problems with the pacemaker's firmware, incorrect or poor connection of the pacemaker electrodes, mechanical damage to the pacemaker, low pacemaker battery, exposure to high-voltage equipment, biatropy caused by certain medical procedures, electrostatic discharges in the environment, interference from wireless devices, and extreme temperatures. All these risks should be minimized.

Unrecognized pacemaker dysfunctions can lead to serious complications in patients, so detecting problems at an early stage is critical to preventing such complications.

Today, the task of developing a multimodal information technology that will combine several ways to recognize pacemaker dysfunctions in order to ensure high reliability of their detection is relevant: it will process diagnostic data and messages from the pacemaker, monitor heart function, read electrocardiograms and analyze heart rhythm, apply special algorithms to detect

abnormal situations that may indicate pacemaker dysfunction, use sensors that can indicate pacemaker dysfunction, use sensors that can detect changes in cardiac activity, and automatically report any detected dysfunctions.

As the analysis has shown, the solutions known today do not solve the problem of developing a multimodal information technology that combines all the ways to recognize pacemaker dysfunctions in order to ensure high reliability of their detection.

Keywords: multimodal information technology, cardiac pacemaker dysfunction, ways of recognizing cardiac pacemaker dysfunctions.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Медичні інформаційні технології сприяють оптимізації роботи медичних працівників та скороченню часу обслуговування пацієнтів [1]. Впровадження медичних інформаційних технологій сприяє зниженню кількості медичних помилок, забезпеченню більш надійних медичних рішень, а також забезпеченню цілодобового моніторингу стану здоров'я пацієнтів за потреби [2].

В Україні серцево-судинні захворювання є головною причиною смертності населення. Серед серцево-судинних захворювань, які часто призводять до летальних наслідків, є аритмія. Аритмії серця – порушення роботи серця, що характеризуються розладом послідовності, ритмічності та сили скорочень серця. Основні форми аритмії серця є тахікардія - прискорення скорочень серця (більше 100 ударів на хвилину), брадикардія – сповільнення скорочень серця (менше 60 ударів/хвилину) [3].

Пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями, особливо з аритміями, необхідно спостерігати у режимі реального часу, щоб мінімізувати виникнення критичних станів, що можуть призвести до смерті. Діагностика серцево-судинних захворювань в тому числі й аритмій, також потребує постійного довготривалого моніторингу. Найкращим рішенням є постійний моніторинг частоти серцевих скорочень з використанням автоматизованих або автоматичних інструментів та технологій для моніторингу параметрів роботи серця [4].

У сучасній клінічній практиці основним методом лікування брадиаритмій, які виникають при синдромі слабкості синусового вузла або атріовентрикулярних блокадах, а також при серцевій недостатності є електрокардіостимуляція. Кардіостимулятори – це медичні пристрої, що використовуються для регулювання серцевого ритму в пацієнтів, у яких спостерігаються аномалії чи розлади серцевої діяльності. Основна функція кардіостимулятора полягає у тому, щоб забезпечити стабільний ритм серця та відновити правильність серцевих скорочень в разі, якщо природний ритм серця порушений. Кардіостимулятори є важливими, часто життєвонеобхідними, медичними пристроями для управління серцевими аритміями з метою поліпшення якості життя та попередження серйозних ускладнень. Після імплантації кардіостимулятора необхідним є постійне, ретельне, динамічне спостереження пацієнта, необхідним є також ретельне тестування параметрів, запрограмованих під час імплантації, причому оптимізація функціонування кардіостимулятора повинна проводитися у кожного пацієнта індивідуально, з врахуванням його самопочуття та параметрів моніторингу його стану. Жодні автоматичні функції не універсальні і не можуть замінити індивідуальне програмування й тестування, що супроводжуються збиранням анамнезу та оглядом пацієнта [5].

Враховуючи той факт, що для ряду пацієнтів з аритмією кардіостимулятор є життєвонеобхідним приладом, то коректність його роботи є надзвичайно важливою. Якщо кардіостимулятор, який забезпечує регулювання серцевого ритму, дасть збій, це може призвести до погіршення стану здоров'я пацієнта, або навіть і до летальних наслідків. При аритмії неправильна робота кардіостимулятора може призвести до погіршення стану пацієнта та важких ускладнень, при серцевій недостатності – до погіршення функціонування серця та до ще більшої серцевої недостатності [6].

На коректність роботи кардіостимулятора може впливати величезна кількість факторів [7]: вік та зношеність кардіостимулятора, електромагнітні перешкоди, проблеми з вбудованим програмним забезпеченням кардіостимулятора, некоректне або погане підключення електродів кардіостимулятора, механічні ушкодження кардіостимулятора, низький заряд батареї кардіостимулятора, вплив високовольтного обладнання, біатрофія, викликана певними медичними процедурами, електростатичні розряди у навколишньому середовищі, інтерференція від бездротових пристроїв, екстремальні температури. Усі ці ризики повинні бути мінімізовані.

Нерозпізані дисфункції кардіостимулятора можуть призвести до серйозних ускладнень в пацієнтів, тому виявлення проблем у ранній стадії є критично важливим для запобігання таких ускладнень.

На сьогодні актуальною є задача розроблення мультимодальної інформаційної технології, яка поєднуватиме декілька шляхів розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора з метою забезпечення високої надійності їх виявлення – опрацьовуватиме діагностичні дані та повідомлення з кардіостимулятора, виконуватиме моніторинг роботи серця, зчитування електрокардіограми та аналіз серцевого ритму, застосуватиме спеціальні алгоритми для виявлення аномальних ситуацій, які можуть свідчити про дисфункцію кардіостимулятора, використовуватиме сенсори, що здатні виявляти зміни в серцевій діяльності, та автоматично повідомлятиме про будь-які виявлені дисфункції.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСФУНКЦІЇ КАРДІОСТИМУЛЯТОРА

Оскільки кардіостимулятори використовуються відносно давно, то звичайно, що весь цей час паралельно ведуться дослідження щодо розроблення алгоритмів та технологій перевірки валідності роботи кардіостимулятора, адже від цього залежить життя пацієнта. Розглянемо відомі методи та інформаційні технології, які дозволяють виявляти некоректну роботу (дисфункції) кардіостимулятора.

Автори [8] розробили мобільний детектор HeartSync для сповіщення пацієнтів і медичних працівників у разі несправності кардіостимулятора. Їхній детектор HeartSync, використовує iPhone для імітації даних переносного монітора серцевого ритму та кардіостимулятора, порівнює дані між двома наборами параметрів в різні моменти часу. Ця двофакторна система допомагає переконатися, що кардіостимулятор пацієнта функціонує належним чином, а також надсилає цю інформацію на сервер, де пацієнти та медичні працівники можуть переглядати її.

В роботі [9] запропоновано шляхи покращення роботи кардіостимулятора та відстеження ненормальної або неочікуваної роботи кардіостимулятора за допомогою алгоритмів машинного навчання. Ця робота довела, що збої кардіостимулятора можна виявити з високою чутливістю та специфічністю без попереднього знання типу, моделі або інтерфейсу кардіостимулятора, що робить цей алгоритм клінічно значущим у відділеннях невідкладної допомоги, де така інформація про кардіостимулятор може бути недоступною.

Автори [10] доводять, що автоматичне визначення відхилень від норми на електрокардіограмі може допомогти в ранньому виявленні, діагностиці та профілактиці аномалій ЕКГ та дисфункції кардіостимулятора. Ця робота є дорожньою картою для розроблення ефективних алгоритмів для виявлення аномалій ЕКГ за допомогою моделей глибокого навчання.

Стаття [11] стверджує, що оскільки сучасні кардіостимулятори є чутливими до помилок, спричинених, зокрема, зовнішнім випромінюванням, яке може викликати порушення поведінки пристрою, тому потрібно мінімізувати вплив цих факторів на роботу кардіостимулятора.

Автори [12] дослідили, що коли пацієнтам із кардіостимулятором потрібно провести МРТ-обстеження, спочатку лікарі мають підтвердити, чи є пристрій звичайним кардіостимулятором чи умовним МРТ-кардіостимулятором, переглянувши рентгенограми грудної клітини або електронні медичні записи, адже не всі кардіостимулятори можна піддавати дослідженню МРТ. Метою їхнього дослідження було оцінити корисність глибокої згорткової нейронної мережі для виявлення кардіостимуляторів на рентгенограмах грудної клітки, і визначати підкласифікацію пристрою.

У роботі [13] автори спробували покращити якість роботи кардіостимулятора за допомогою технологій моделювання. У цій статті автори використали віртуальну модель серця для дослідження просторових і часових аспектів системи електропровідності серця в замкнутому циклі з моделлю кардіостимулятора. Було використано просторові властивості серця, щоб змодельовати механізм чутливості, а потім на клінічних випадках була перевірена достовірність розробленої моделі чутливості. Така замкнута оцінка роботи кардіостимулятора дозволяє проводити функціональне тестування програмного забезпечення кардіостимулятора, розробляти нові алгоритми для ритмічної терапії, а також слугувати інструментом для розробки нових методів покращення електрофізіології серця.

Автори [14] описали систему для тестування кардіостимуляторів, яка вимірює певні параметри кардіостимулятора, щоб визначити їхню належну роботу або потенційну несправність. Система призначена для простого та універсального вимірювання параметрів кардіостимулятора.

У статті [15] зроблено висновок, що постійне вдосконалення технології та алгоритмів для кардіостимуляторів покращило функціональну надійність і розширило їх діагностичні можливості, а також надано рішення та поради щодо усунення несправностей кардіостимулятора.

Автори [16] описують показання, ускладнення, пов'язані з кардіостимулятором, основні функції/програмування, поширені проблеми, пов'язані з кардіостимулятором, і дистанційний моніторинг з метою виявлення некоректної роботи кардіостимулятора.

Основними шляхами розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора є [12]:

- 1) опрацювання інформації про симптоми пацієнта (запаморочення, відчуття нерегулярного серцебиття, слабкість, втрата свідомості тощо);
- 2) опрацювання діагностичних даних та повідомлень з кардіостимулятора, включаючи автоматичні звіти кардіостимулятора – епізоди аритмій, частоту стимуляції, напругу імпульсів, режим роботи та рівні батареї, а також оцінку внутрішньосерцевих сигналів, що реєструються пристроєм;
- 3) моніторинг роботи серця – запис та розшифрування електрокардіограми (в тому числі тривалий запис ЕКГ для виявлення епізодів аритмії або відхилень у роботі кардіостимулятора протягом декількох днів – моніторинг Холтера), аналіз серцевого ритму та частоти серцевих скорочень, аналіз стимуляційних імпульсів, включаючи затримки або відсутність належної активації серця;
- 4) застосування спеціальних алгоритмів для виявлення аномальних ситуацій, які можуть свідчити про дисфункцію кардіостимулятора, наприклад, тестування під навантаженням – оцінка роботи

кардіостимулятора під фізичним навантаженням для виявлення можливих проблем, які проявляються під час рухової активності;

5) опрацювання інформації з сенсорів, здатних виявляти зміни в серцевій діяльності – сенсори для вимірювання частоти серцевих скорочень, сенсори для вимірювання частоти дихальних рухів, сенсори для вимірювання внутрішньосерцевого тиску, сенсори для виявлення положення тіла, які здатні виявляти зміни в серцевій діяльності та дозволяють пристрою реагувати на фізіологічні зміни серця, забезпечуючи оптимальну стимуляцію серцевого м'яза у відповідь на різні стани.

Проаналізуємо відомі методи та інформаційні технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора за використовуваними шляхами розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора – Таблиця 1.

Таблиця 1

Аналіз відомих методів та інформаційних технологій за використовуваними шляхами розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора

Метод, IT	Шлях 1	Шлях 2	Шлях 3	Шлях 4	Шлях 5
Мобільний детектор HeartSync [8]			+		
Відстеження ненормальної або неочікуваної роботи кардіостимулятора за допомогою алгоритмів машинного навчання [9]		+		+	
Розроблення ефективних алгоритмів для виявлення аномалій ЕКГ за допомогою моделей глибокого навчання [10]			+	+	
Визначення чутливості кардіостимулятора до помилок [11]		+			+
Використання згорткової нейронної мережі для виявлення кардіостимуляторів на рентгенограмах грудної клітки [12]	+	+			
Покращення якості роботи кардіостимулятора за допомогою технологій моделювання [13]			+	+	+
Система для тестування кардіостимуляторів [14]		+			
Постійне вдосконалення технологій та алгоритмів для кардіостимуляторів [15]		+			+
Дистанційний моніторинг з метою виявлення некоректної роботи кардіостимулятора [16]		+	+		

Отже, відомі на сьогодні рішення не розв'язують задачі розроблення мультимодальної інформаційної технології, яка поєднує всі шляхи розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора з метою забезпечення високої надійності їх виявлення.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

На сьогодні актуальною є задача розроблення мультимодальної інформаційної технології, яка поєднуватиме декілька шляхів розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора з метою забезпечення високої надійності їх виявлення – опрацюватиме діагностичні дані та повідомлення з кардіостимулятора, виконуватиме моніторинг роботи серця, зчитування електрокардіограми та аналіз серцевого ритму, застосуватиме спеціальні алгоритми для виявлення аномальних ситуацій, які можуть свідчити про дисфункцію кардіостимулятора, використовуватиме сенсори, що здатні виявляти зміни в серцевій діяльності, та автоматично повідомлятиме про будь-які виявлені дисфункції.

Як показав проведений аналіз, відомі на сьогодні рішення не розв'язують задачі розроблення мультимодальної інформаційної технології, яка поєднує всі шляхи розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора з метою забезпечення високої надійності їх виявлення.

Література

1. Ostermann T. Information Technology and Integrative Medicine: Intimate Enemies or In-Team Mates?. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 2021. Vol. 27, no. 11. P. 897–898. URL: <https://doi.org/10.1089/acm.2021.29100.tos>.
2. Kothandaraman R., Andavar S., Raj R. S. P. A Hybrid Feature Ranking Algorithm for Assisted Reproductive Technology Outcome Prediction. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2022. Vol. 65. URL: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210605>.
3. Cardiac arrhythmias / M. R. Ginks et al. *Oxford Textbook of Medicine* / ed. by J. Dwight. 2020. P. 3350–3389. URL: <https://doi.org/10.1093/med/9780198746690.003.0346>.
4. OUP accepted manuscript. *Europace*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1093/europace/eaac052>.
5. Cardiac Pacemaking Is an Emergent Property of Complex Synchronized Signaling on Multiple Scales / O. Monfredi et al. *Heart Rate and Rhythm*. Cham, 2023. P. 89–108. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33588-4_5.

6. Transient dysfunction of leadless pacemaker system after cardioversion / M. Nies et al. *HeartRhythm Case Reports*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hrcr.2023.04.005>.
7. Yu Z. et al. Risk factors of pacing dependence and cardiac dysfunction in patients with permanent pacemaker implantation. *ESC Heart Failure*. 2022. Vol. 9. Issue 4. Pp. 2325-2335. URL: <https://doi.org/10.1002/ehf2.13918>.
8. Medbery C., Olmsted A. HeartSync: Mobile pacemaker failure detector. *2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, London, United Kingdom, 14–16 December 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/icitst.2015.7412105>.
9. Malinowski M. R. B., Povinelli R. J. Searching for non-sense: identification of pacemaker non-sense and non-capture failures using machine learning techniques. *Computers in Cardiology*, 2003, Thessaloniki Chalkidiki, Greece, 24 September 2003. 2003. URL: <https://doi.org/10.1109/cic.2003.1291088>.
10. Deep learning for ECG Arrhythmia detection and classification: an overview of progress for period 2017–2023 / Y. Ansari et al. *Frontiers in Physiology*. 2023. Vol. 14. URL: <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1246746>.
11. New Insights Into Soft-Faults Induced Cardiac Pacemakers Malfunctions Analyzed at System-Level via Model Checking / G. B. Hamad et al. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 62107–62119. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2876318>.
12. Detection of Pacemaker and Identification of MRI-conditional Pacemaker Based on Deep-learning Convolutional Neural Networks to Improve Patient Safety / Y. Do et al. *Journal of Medical Systems*. 2023. Vol. 47, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s10916-023-01981-w>.
13. Jiang Z., Mangharam R. Modeling cardiac pacemaker malfunctions with the Virtual Heart Model. *2011 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Boston, MA, 30 August – 3 September 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/iembs.2011.6090051>.
14. Vaverka F., Labuda M., Gala M. Apparatus for testing the basic parameters of pacemaker. *2020 ELEKTRO*, Taormina, Italy, 25–28 May 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/elektro49696.2020.9130318>.
15. Lazar S., Huang H., Wissner E. Pacemaker and ICD Troubleshooting. *Interpreting Cardiac Electrograms - From Skin to Endocardium*. 2017. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69998>.
16. Cardiac Pacemakers: Function, Troubleshooting, and Management / S. K. Mulpuru et al. *Journal of the American College of Cardiology*. 2017. Vol. 69, no. 2. P. 189–210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2016.10.061>.

References

1. Ostermann T. Information Technology and Integrative Medicine: Intimate Enemies or In-Team Mates?. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 2021. Vol. 27, no. 11. P. 897–898.
2. Kothandaraman R., Andavar S., Raj R. S. P. A Hybrid Feature Ranking Algorithm for Assisted Reproductive Technology Outcome Prediction. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2022. Vol. 65.
3. Cardiac arrhythmias / M. R. Ginks et al. *Oxford Textbook of Medicine* / ed. by J. Dwight. 2020. P. 3350–3389.
4. OUP accepted manuscript. *Europace*. 2022.
5. Cardiac Pacemaking Is an Emergent Property of Complex Synchronized Signaling on Multiple Scales / O. Monfredi et al. *Heart Rate and Rhythm*. Cham, 2023. P. 89–108.
6. Transient dysfunction of leadless pacemaker system after cardioversion / M. Nies et al. *HeartRhythm Case Reports*. 2023.
7. Yu Z. et al. Risk factors of pacing dependence and cardiac dysfunction in patients with permanent pacemaker implantation. *ESC Heart Failure*. 2022. Vol. 9. Issue 4. Pp. 2325-2335.
8. Medbery C., Olmsted A. HeartSync: Mobile pacemaker failure detector. *2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, London, United Kingdom, 14–16 December 2015. 2015.
9. Malinowski M. R. B., Povinelli R. J. Searching for non-sense: identification of pacemaker non-sense and non-capture failures using machine learning techniques. *Computers in Cardiology*, 2003, Thessaloniki Chalkidiki, Greece, 24 September 2003. 2003.
10. Deep learning for ECG Arrhythmia detection and classification: an overview of progress for period 2017–2023 / Y. Ansari et al. *Frontiers in Physiology*. 2023. Vol. 14.
11. New Insights Into Soft-Faults Induced Cardiac Pacemakers Malfunctions Analyzed at System-Level via Model Checking / G. B. Hamad et al. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 62107–62119.
12. Detection of Pacemaker and Identification of MRI-conditional Pacemaker Based on Deep-learning Convolutional Neural Networks to Improve Patient Safety / Y. Do et al. *Journal of Medical Systems*. 2023. Vol. 47, no. 1.
13. Jiang Z., Mangharam R. Modeling cardiac pacemaker malfunctions with the Virtual Heart Model. *2011 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Boston, MA, 30 August – 3 September 2011. 2011.
14. Vaverka F., Labuda M., Gala M. Apparatus for testing the basic parameters of pacemaker. *2020 ELEKTRO*, Taormina, Italy, 25–28 May 2020. 2020.
15. Lazar S., Huang H., Wissner E. Pacemaker and ICD Troubleshooting. *Interpreting Cardiac Electrograms - From Skin to Endocardium*. 2017.
16. Cardiac Pacemakers: Function, Troubleshooting, and Management / S. K. Mulpuru et al. *Journal of the American College of Cardiology*. 2017. Vol. 69, no. 2. P. 189–210.