

ГОВОРУЩЕНКО Тетяна

Хмельницький національний університет

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

e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua

ГРИЩУК Ілля

Хмельницький національний університет

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

e-mail: illia.hryshchuk@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСФУНКЦІЇ КАРДІОСТИМУЛЯТОРА

Розробка інформаційних технологій розпізнавання дисфункції кардіостимулятора є пріоритетною темою у сучасній науці та медицині у сфері кардіології. Розробка інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора допоможе підтримувати стан здоров'я пацієнта у належному стані, та запобігати ускладненням, що збільшить якість медичної допомоги та підвищить безпеку пацієнтів. У статті побудована математична модель функціонування інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора, яка дозволяє формалізувати логіку аналізу вхідних даних та ухвалення рішень, а також основні функції інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора. Вона базується на зборі багатокomпонентних медичних даних, їх обробці за допомогою визначених алгоритмів та ухваленні рішень на основі логічних умов або інтелектуальних методів. Створення такої моделі є основою для подальшої реалізації системи у вигляді інформаційної технології та програмного забезпечення, що може допомогти лікарям швидко і точно виявляти несправності в роботі імплантованих пристроїв. Загалом, результати моделювання підтверджують доцільність обраного підходу та демонструють, що розроблювана інформаційна технологія є перспективною для подальшої реалізації та практичного застосування в медичній діагностиці. Очікуваним практичним результатом є інформаційна технологія розпізнавання дисфункції кардіостимулятора, яка працює на інтегрованих алгоритмах аналізу сигналів кардіостимулятора на основі логічних правил, має зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для користувача, який надає інформацію про стан кардіостимулятора та повідомляє про виявлені аномалії, та забезпечує безперервний моніторинг та своєчасне сповіщення про потенційні збої у роботі кардіостимулятора. Така технологія буде знижувати ризики для пацієнтів, оскільки вона дозволить своєчасно виявляти та попереджати про можливі збої у роботі кардіостимулятора, що, в свою чергу, знизить ризик ускладнень та підвищить ефективність лікування за рахунок швидкого реагування на критичні зміни в роботі пристрою.

Ключові слова: інформаційна технологія, функціонування інформаційної технології, математичне моделювання, розпізнавання дисфункції кардіостимулятора.

HOVORUSHCHENKO Tetiana, HRYSHCHUK Illia

Khmelnytskyi National University

MATHEMATICAL MODELING OF FUNCTIONING THE INFORMATION TECHNOLOGY FOR DETECTING THE CARDIAC PACEMAKER DYSFUNCTIONS

The development of information technologies for detecting pacemaker malfunction is a priority topic in contemporary science and medicine in the field of cardiology. The development of information technology for recognizing pacemaker dysfunction will help maintain the patient's health in proper condition and prevent complications, which will improve the quality of medical care and increase patient safety. The article presents a mathematical model of the functioning of information technology for recognizing pacemaker dysfunction, which allows formalizing the logic of input data analysis and decision-making, as well as the main functions of information technology for recognizing pacemaker dysfunction. It is based on the collection of multicomponent medical data, its processing using specific algorithms, and decision-making based on logical conditions or intelligent methods. The creation of such a model is the basis for the further implementation of the system in the form of information technology and software that can help doctors quickly and accurately detect malfunctions in implanted devices. In general, the modeling results confirm the feasibility of the chosen approach and demonstrate that the information technology under development is promising for further implementation and practical application in medical diagnostics. The expected practical result is information technology for recognizing pacemaker dysfunction, which works on integrated algorithms for analyzing pacemaker signals based on logical rules, has a convenient and intuitive user interface that provides information about the status of the pacemaker and reports detected anomalies, and provides continuous monitoring and timely notification of potential pacemaker malfunctions. This technology will reduce risks for patients, as it will allow for the timely detection and warning of possible malfunctions in the pacemaker, which, in turn, will reduce the risk of complications and increase the effectiveness of treatment by responding quickly to critical changes in the device's operation.

Keywords: information technology, functioning of information technology, mathematical modeling, recognition of pacemaker dysfunctions.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.08.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.08.2025

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

У сучасному світі інформаційні технології набули великого значення в різних галузях, включаючи медицину. Завдяки постійному розвитку цифрових систем інформаційної обробки, медичні працівники та

звичайні люди отримують все новіші та новіші можливості для точної діагностики та моніторингу стану здоров'я пацієнтів [1, 2].

У галузі серцево-судинних хвороб кардіостимулятори стали справжнім проривом свого часу, допомагаючи врятувати або підтримувати в належному стані здоров'я пацієнтів. Завдяки цим пристроям мільйони людей у всьому світі можуть вести повноцінне життя, незважаючи на серцеві проблеми. Кардіостимулятори – це спеціальні імплантовані електронні прилади, що слідкують за електричною активністю серця та за потреби надсилають електричні імпульси для стимуляції серцевих скорочень [3]. Вони використовуються у випадках, коли у пацієнта виникають аритмії – порушення ритму серця, такі як брадикардія або блокади серцевої провідної системи. Основна функція цих медичних пристроїв полягає у тому, щоб забезпечити стабільний ритм серця та відновити правильність серцевих скорочень в разі, якщо природний ритм серця порушений для людей, які мають аномалії чи розлади серцевої діяльності. Кардіостимулятори — це не лише засіб стабілізації серцевого ритму, а й ефективний інструмент для підвищення якості життя.

Коректність роботи кардіостимулятора є надзвичайно важливою, оскільки від цього безпосередньо залежить не лише якість життя, а й загроза життю пацієнта. Будь-який збій у роботі пристрою може призвести до значного погіршення стану здоров'я або навіть мати летальні наслідки.

Неправильне функціонування кардіостимулятора здатне мати різні наслідки, що залежать від конкретного діагнозу, фізіологічного стану пацієнта та наявності супутніх хвороб. Основні ризики некоректної роботи кардіостимулятора при певних патологіях [4]:

- при аритмії – збої у роботі кардіостимулятора можуть спричинити небезпечні порушення ритму серця – як брадикардію, так і тахікардію. Такий дисбаланс в електричній активності серця може викликати напади втрати свідомості, ішемію або навіть зупинку серця в тяжких випадках;
- при серцевій недостатності – неефективна стимуляція може знизити серцевий викид, що призводить до недостатнього кровопостачання органів. Пацієнти можуть страждати від задишки, набряків, зниження толерантності до фізичних навантажень. У важких випадках можливе прогресування до декомпенсованої серцевої недостатності;
- при загальному погіршенні стану здоров'я – симптоми, викликані порушенням ритму серця внаслідок збою роботи пристрою, включають загальну слабкість, запаморочення, втрата орієнтації, відчуття перебоїв у роботі серця, брак кисню, особливо під час фізичної активності;
- під час екстрених медичних втручань – збої у функціонуванні можуть ускладнити перебіг операцій, анестезії чи реанімаційних заходів. У критичних ситуаціях може знадобитися екстрене перепрограмування або навіть повна заміна пристрою, що потребує високої кваліфікації кардіолога або хірурга, та тягне за собою великі ризики.

Крім того, важливо враховувати можливість впливу зовнішніх факторів, таких як електромагнітне випромінювання, на роботу пристрою. Побутові прилади, магнітно-резонансна томографія, деякі види фізіотерапевтичних процедур можуть впливати на функціонування кардіостимулятора і спричиняти його тимчасову або постійну дисфункцію.

Таким чином, будь-які відхилення у роботі кардіостимулятора є серйозною медичною проблемою, яка вимагає невідкладної діагностики та втручання кваліфікованих фахівців. Регулярне спостереження, контроль за параметрами пристрою, а також дотримання рекомендацій щодо способу життя і режиму пацієнта є ключовими чинниками для забезпечення ефективного функціонування кардіостимулятора та профілактики ускладнень. Саме тому розробка інформаційних технологій розпізнавання дисфункції кардіостимулятора є пріоритетною темою у сучасній науці та медицині у сфері кардіології. Розробка інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора допоможе підтримувати стан здоров'я пацієнта у належному стані, та запобігати ускладненням, що збільшить якість медичної допомоги та підвищить безпеку пацієнтів.

Розпізнавання дисфункції кардіостимулятора

Несправність кардіостимулятора може виникати з найрізноманітніших причин, починаючи від відмови обладнання і закінчуючи змінами основного ритму [5]. На функціонування кардіостимулятора впливають різні фактори: зношеність пристрою, проблеми з електродами чи програмним забезпеченням, електромагнітні перешкоди, низький заряд батареї, механічні пошкодження, вплив медичних процедур, екстремальні температури та інші. Усі ці ризики потребують мінімізації [6]. Розширений перелік факторів, які можуть спричинити порушення у роботі кардіостимулятора [7]:

- вік пристрою та зношеність компонентів – як і будь-які інші електронні системи, кардіостимулятори мають обмежений термін служби. Згодом електронні компоненти деградують, а мікросхеми можуть втратити точність функціонування через тепловий стрес, вологість або вібрації;
- електромагнітні перешкоди – сильні електромагнітні поля, що виникають у діапазонах частот медичного та промислового обладнання, наприклад: МРТ, електрохірургічні інструменти, зварювальні апарати можуть викликати некоректну інтерпретацію сигналів пристроєм або навіть його перезавантаження, що може бути критичним для здоров'я пацієнта;

- програмні помилки – кардіостимулятори працюють під керуванням вбудованого програмного забезпечення. Помилки в коді можуть призводити до порушення алгоритму стимуляції, затримок у відповідь на серцеві імпульси або неправильного визначення параметрів стимуляції;
- механічні ушкодження – фізичний вплив на область імплантації, такий як удари або падіння, може пошкодити корпус пристрою, змінити положення електродів або порушити контакт у з'єднаннях;
- вичерпання ресурсу живлення – більшість сучасних кардіостимуляторів мають термін служби акумуляторів від 5 до 15 років. Зниження напруги батареї поступово зменшує ефективність пристрою, а при критичному рівні енергії стимуляція може припинитися повністю;
- вплив потужного електрообладнання – близькість до потужних електричних пристроїв, таких як електрогенератори, зварювальні установки чи трансформатори, може викликати сильні перешкоди, які індукуються в електродах пристрою;
- фармакологічна або біохімічна біатрофія тканин – деякі препарати або медичні процедури можуть спричинити структурні зміни у тканинах навколо електродів, що змінює контакт або провідність, порушуючи ефективність стимуляції;
- електростатичні розряди – у деяких ситуаціях, наприклад, під час зняття одягу з синтетичних матеріалів або контакту з металевими предметами, можуть виникати електростатичні розряди, які можуть мати вплив на електроніку пристрою;
- інтерференція від бездротових пристроїв – мобільні телефони, Bluetooth-гарнітури, Wi-Fi-роутери та інші джерела радіосигналів поблизу кардіостимулятора можуть створювати радіочастотну інтерференцію, особливо у старіших моделях пристроїв;
- неправильне підключення або міграція електродів – електроди можуть зміститися внаслідок фізичної активності, що призведе до зміни параметрів стимуляції або до повної її втрати;
- температурні впливи – як надмірне нагрівання, наприклад, під час тривалого перебування на сонці, так і надмірне охолодження, наприклад, переохолодження тіла, можуть вплинути на характеристики матеріалів пристрою або акумулятора;
- корозія та біологічні реакції організму – у довготривалій перспективі організм може реагувати на чужорідне тіло, навіть біосумісне, що призводить до утворення фіброзної капсули, яка погіршує ефективність контакту електродів з тканинами;
- проблеми з імплантацією або некоректне налаштування – у випадку неточної установки або неправильного програмування параметрів стимуляції при первинному введенні пристрою можливі функціональні збої або надмірне навантаження на серцевий м'яз.

З огляду на вищенаведене, для забезпечення надійної та безпечної роботи кардіостимулятора необхідне регулярне технічне обслуговування, моніторинг параметрів роботи, дотримання пацієнтом рекомендацій лікаря, а також оновлення програмного забезпечення за потреби. Надійність роботи такого пристрою значною мірою залежить як від якості його інженерного виконання, так і від усвідомленого поведіння пацієнта з пристроєм.

Діагностика несправності кардіостимулятора є складною та часто пов'язана з неспецифічними клінічними симптомами, тоді як зміни на ЕКГ можуть бути незначними або відсутніми [5]. Основними параметрами, що можуть свідчити про дисфункцію кардіостимулятора, є: рівень заряду батареї, електрокардіографічні показники серцевої активності, системні діагностичні повідомлення, стан електродів, метрики роботи пристрою (частота, амплітуда, часові інтервали), скарги пацієнта на симптоми, інформація з програмного забезпечення та аналіз попередніх збоїв. Їх моніторинг дозволяє вчасно виявляти відхилення й підвищувати надійність функціонування системи [8, 9]. Додатково можливо застосування систем на основі штучного інтелекту для автоматичного аналізу даних кардіостимулятора, виявлення аномалій та підготовки рекомендацій для лікарів. Такі підходи підвищують рівень персоналізації лікування та забезпечують додатковий рівень безпеки для пацієнтів.

Ключові елементи та методи, які допомагають ідентифікувати можливі проблеми або збої у роботі цього медичного пристрою [10]:

- сигнали та параметри – це включає аналіз основних сигналів, які висилає кардіостимулятор, такі як електрокардіографічні сигнали, інформацію про серцевий ритм та чутливість пристрою до них, тощо;
- алгоритми розпізнавання – розробка та застосування спеціальних алгоритмів для виявлення ненормальних паттернів у сигналах, які можуть свідчити про дисфункцію кардіостимулятора;
- діагностика за допомогою сенсорів – використання різних типів сенсорів, що здатні виявляти зміни в серцевій діяльності або інші показники, які можуть вказувати на проблеми з пристроєм;
- моніторинг та зв'язок з медичним персоналом – розробка систем, які моніторять роботу кардіостимулятора та автоматично повідомляють про будь-які виявлені дисфункції для швидкої реакції медичних фахівців;
- важливість вчасного виявлення - невідкриті дисфункції кардіостимулятора можуть призвести до серйозних ускладнень для пацієнтів, тому виявлення проблем у ранні стадії є критично важливим для запобігання таких ускладнень та забезпечення відповідного рівня здоров'я пацієнтів;

- моніторинг серцевого ритму – система внутрішнього моніторингу стану серця, яка включає в себе зчитування електрокардіограми та аналіз серцевого ритму, може виявляти неправильності у роботі кардіостимулятора, та сигналізувати про це;
- тестування під час роботи – під час роботи пристрою лікар може проводити спеціальні тести, що дозволяють перевірити правильність роботи кардіостимулятора та виявити можливі дисфункції;
- діагностичні дані та повідомлення – пристрій може передавати діагностичні дані та повідомлення про будь-які помилки, збої або ненормальні показники, які виявлені під час його роботи;
- симптоми та реакція пацієнта – симптоми, які виявляють пацієнти, наприклад, запаморочення, слабкість, чуття пульсації, нестійкість ритму серця, можуть слугувати важливими сигналами про можливі проблеми у роботі кардіостимулятора;
- моніторинг технічних параметрів – певні технічні параметри, такі як заряд батареї, якість сигналу, робота електродів, можуть бути відстежуваними метриками для оцінки працездатності пристрою;
- аналіз історії роботи – інформація про попередні події, реакцію пристрою на певні умови або лікування, може допомогти ідентифікувати причини можливих проблем;
- періодичне технічне обслуговування – регулярні перевірки пристрою за допомогою спеціального програмного забезпечення дозволяють заздалегідь виявити потенційні збої, навіть до появи клінічних симптомів;
- тестування функціональних резервів пристрою – у клінічних умовах проводять навантажувальні тести або зміну режимів роботи для оцінки реакції кардіостимулятора та пошуку латентних дефектів;
- аналіз взаємодії з іншими пристроями – у деяких випадках важливо перевіряти, як кардіостимулятор працює у поєднанні з іншими імплантованими або зовнішніми пристроями, наприклад, дефібриляторами, інсуліновими помпами тощо;
- реєстрація та аналіз подій – сучасні кардіостимулятори можуть записувати короткі фрагменти даних про події порушення ритму, які згодом аналізуються лікарями для визначення причин і наслідків дисфункцій.

Отже, розпізнавання дисфункції кардіостимулятора є комплексним процесом, що поєднує клінічні спостереження, технічний моніторинг, аналіз сигналів і використання спеціалізованих алгоритмів. Своєчасне виявлення порушень у роботі пристрою дозволяє запобігти серйозним ускладненням та забезпечити безпеку і якість життя пацієнтів. Подальші світові дослідження у цьому напрямі мають на меті підвищення точності діагностики та ефективності лікування шляхом впровадження новітніх технологій штучного інтелекту та телемедицини.

Невиявлені дисфункції кардіостимулятора можуть спричинити серйозні ускладнення, тому їх рання діагностика є надзвичайно важливою [8, 9]. Основні методи включають: аналіз симптомів пацієнта (запаморочення, слабкість, аритмія), оцінку електрокардіографічних сигналів і параметрів серцевого ритму, моніторинг технічних характеристик пристрою (заряд батареї, робота електродів), тестування в клінічних умовах, використання діагностичних повідомлень пристрою, алгоритмів та сенсорів для виявлення аномалій, а також інформаційні технології моніторингу серцевого ритму, здатні автоматично сигналізувати про збої.

Математичне моделювання інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора

Метою моделювання процесу розпізнавання дисфункції кардіостимулятора є формування структури, функціонування та інформаційних потоків такої інформаційної технології, що дозволяє своєчасно виявляти потенційні збої в роботі кардіостимулятора, забезпечуючи ефективність, надійність і безпеку системи моніторингу. Моделювання спрямоване на побудову цілісної математичної моделі, яка дозволяє описати логіку роботи системи, взаємодію її компонентів, а також правила і критерії прийняття рішень щодо діагностики дисфункції кардіостимулятора і служить основою для розробки, впровадження та вдосконалення інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора.

Функціональні можливості інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора визначають її здатність виконувати конкретні дії, необхідні для аналізу стану пацієнта, виявлення відхилень у роботі імплантованого пристрою та формування відповідних рекомендацій. Від правильно сформульованого функціоналу залежить ефективність розпізнавання критичних ситуацій, швидкість реагування системи та якість медичних рішень. У цьому підпункті описано ключові функції, які реалізує система, з урахуванням джерел вхідної інформації, методів її обробки та способів зворотного зв'язку з користувачами.

Розроблювана інформаційна технологія розпізнавання дисфункції кардіостимулятора поєднує декілька шляхів розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора та виконує такі функції:

- опрацювання інформації про симптоми пацієнта (запаморочення, відчуття нерегулярного серцебиття, слабкість, втрата свідомості тощо);
- 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;

– 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;

– 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;

– 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;

– формування рекомендацій щодо корекції налаштувань кардіостимулятора – у разі виявлення дисфункції налаштування кардіостимулятора змінюються для покращення його роботи, включаючи зміну параметрів стимуляції або режиму роботи;

– автоматичне повідомлення пацієнта, його лікаря та його рідних про будь-які виявлені дисфункції кардіостимулятора.

Математична модель – це формалізоване представлення процесів і взаємодій у системі за допомогою змінних, параметрів, функцій, логічних правил та алгоритмів. Вона дозволяє описати поведінку ІТ, провести обчислення, моделювати різні сценарії і приймати рішення.

Вхідними даними інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора є:

- інформація про симптоми пацієнта;
- діагностичні дані та повідомлення з кардіостимулятора;
- електрокардіограма та дані отримані від моніторингу Холтера;
- інформація з сенсорів, здатних виявляти зміни в серцевій діяльності.

Результуючими даними інформаційної технології є рекомендації щодо корекції налаштувань кардіостимулятора та повідомлення пацієнта, його лікаря та рідних про виявлені дисфункції кардіостимулятора.

На основі цих даних можна визначити вхідний вектор інформаційної технології розпізнавання дисфункцій кардіостимулятора:

$$X = \{C_p, D_c, ECG, H, S_s\}, \quad (1)$$

де X – множина вхідних даних системи;

C_p – коефіцієнт симптомів пацієнта, представлений у величині від 0 до 1, де 0 – відмінне самопочуття, 1 – є скарги на запаморочення, слабкість, біль або подібні;

D_c – структурована множина даних з кардіостимулятора;

ECG – моментне значення електрокардіограми;

H – дискретна послідовність значення електрокардіограми зафіксоване за допомогою методу моніторингу Холтера;

S_s – структурована множина даних з фізіологічних сенсорів пацієнта.

Для більшої зручності та читабельності формул – варто об'єднати складні і громіздкі множини в окремі значення та продемонструвати для них формули окремо. Значення структурованої множини даних з кардіостимулятора представлене нижче:

$$D_c = \{D_c^{hr}, D_c^{volt}, D_c^{mode}, D_c^{bat}, D_c^{epi}\}, \quad (2)$$

де D_c – структурована множина даних з кардіостимулятора;

D_c^{hr} – частота стимуляції;

D_c^{volt} – напруга імпульсів;

D_c^{mode} – режим роботи;

D_c^{bat} – рівень заряду батареї;

D_c^{epi} – дані про епізоди аритмії.

Дискретна послідовність значень сигналу електрокардіограми зафіксована методом моніторингу Холтера являє собою теж множину:

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}, \quad (3)$$

де H – дискретної послідовності значень електрокардіограми зафіксована методом моніторингу Холтера;

$h_1, h_2, \dots, h_n$ – значення електрокардіограми, зафіксовані в різні моменти часу.

Значення структурованої множини даних з фізіологічних сенсорів пацієнта представлені нижче:

$$S_s = \{S_s^{hr}, S_s^{rr}, S_s^{pres}, S_s^{pos}\}, \quad (4)$$

де S_s – структурована множина даних з фізіологічних сенсорів;

S_s^{hr} – частота серцевих скорочень;
 S_s^{rr} – частота дихання;
 S_s^{pres} – тиск серця;
 S_s^{pos} – положення тіла.

Далі слід змоделювати усі заплановані розрахунки для обробки сигналів та прийняття рішення про нормальну роботу або дисфункцію кардіостимулятора у пацієнта. Функціонування системи ґрунтується на послідовній обробці даних через ряд функцій.

Першим етапом є попередня обробка, яка включає в себе нормалізацію, фільтрацію шуму та уніфікацію одиниць виміру для всіх вхідних даних, що представлено нижче:

$$f_1(X) = X', \quad (5)$$

де f_1 – функція фільтрації усіх вхідних даних;
 X' – очищений та уніфікований набір даних.

Другим етапом є аналіз значень електрокардіограми та даних отриманих за допомогою методу Холтера, що продемонстровано нижче:

$$f_2(ECG', H') = R_1, \quad (6)$$

де f_2 – функція аналізу електрокардіограми та даних отриманих з методу Холтера;
 ECG' – моментне значення електрокардіограми;

H' – дискретна послідовність значення електрокардіограми зафіксоване за допомогою методу моніторингу Холтера;

R_1 – результуючі ознаки порушень ритму.

Третім етапом є аналіз даних кардіостимулятора, що включає в себе виявлення зниження напруги імпульсу, помилок режиму роботи, зниження заряду, даних про епізоди аритмії, частоти стимуляції. Функція цього етапу продемонстрована нижче:

$$f_3(D'_c) = R_2, \quad (7)$$

де f_3 – функція аналізу даних кардіостимулятора;

D'_c – структурована множина даних з кардіостимулятора;

R_2 – результуючі ознаки можливої несправності в роботі кардіостимулятора.

Четвертим етапом є аналіз структурованої множини даних з фізіологічних сенсорів, що включає в себе частоту серцевих скорочень, частоту дихання, тиск серця, положення тіла. Функція цього етапу продемонстрована нижче:

$$f_4(S'_s) = R_3, \quad (8)$$

де f_4 – функція аналізу структурованої множини даних з фізіологічних сенсорів;

S'_s – структурована множина даних з кардіостимулятора;

R_3 – результуючі ознаки порушення від сенсорів.

П'ятий етап полягає в обрахуванні фінального значення на основі усіх попередніх результатів шляхом застосування логічних правил. Функція цього етапу продемонстрована нижче у формулі (9) та обрахування відповіді наявності дисфункції показано у формулі (10):

$$f_5(C'_p, R_1, R_2, R_3) = Y, \quad (9)$$

$$Y = \begin{cases} \geq 1 & \text{– наявність дисфункції} \\ < 1 & \text{– нормальна робота} \end{cases} \quad (10)$$

де f_5 – функція фінального логічного обрахування даних;

C'_p – коефіцієнт симптомів пацієнта;

R_1 – результуючі ознаки порушень ритму;

R_2 – результуючі ознаки можливої несправності в роботі кардіостимулятора;

R_3 – результуючі ознаки порушення від сенсорів;

Y – загальне результуюче значення.

Отримане значення Y дозволяє приймати рішення про коректну роботу або дисфункцію кардіостимулятора: якщо значення менше 1 – це свідчить про нормальну роботу кардіостимулятора, якщо більше або рівне 1 – це свідчить про наявність дисфункції, після чого варто активувати протоколи сповіщення користувача, лікаря, або зазначених у системі людей.

Для більшої наглядності та кращого розуміння математична модель функціонування інформаційної роботи розпізнавання дисфункції кардіостимулятора також розроблена у вигляді схеми, що відображає послідовність дій моделі – рис. 1.

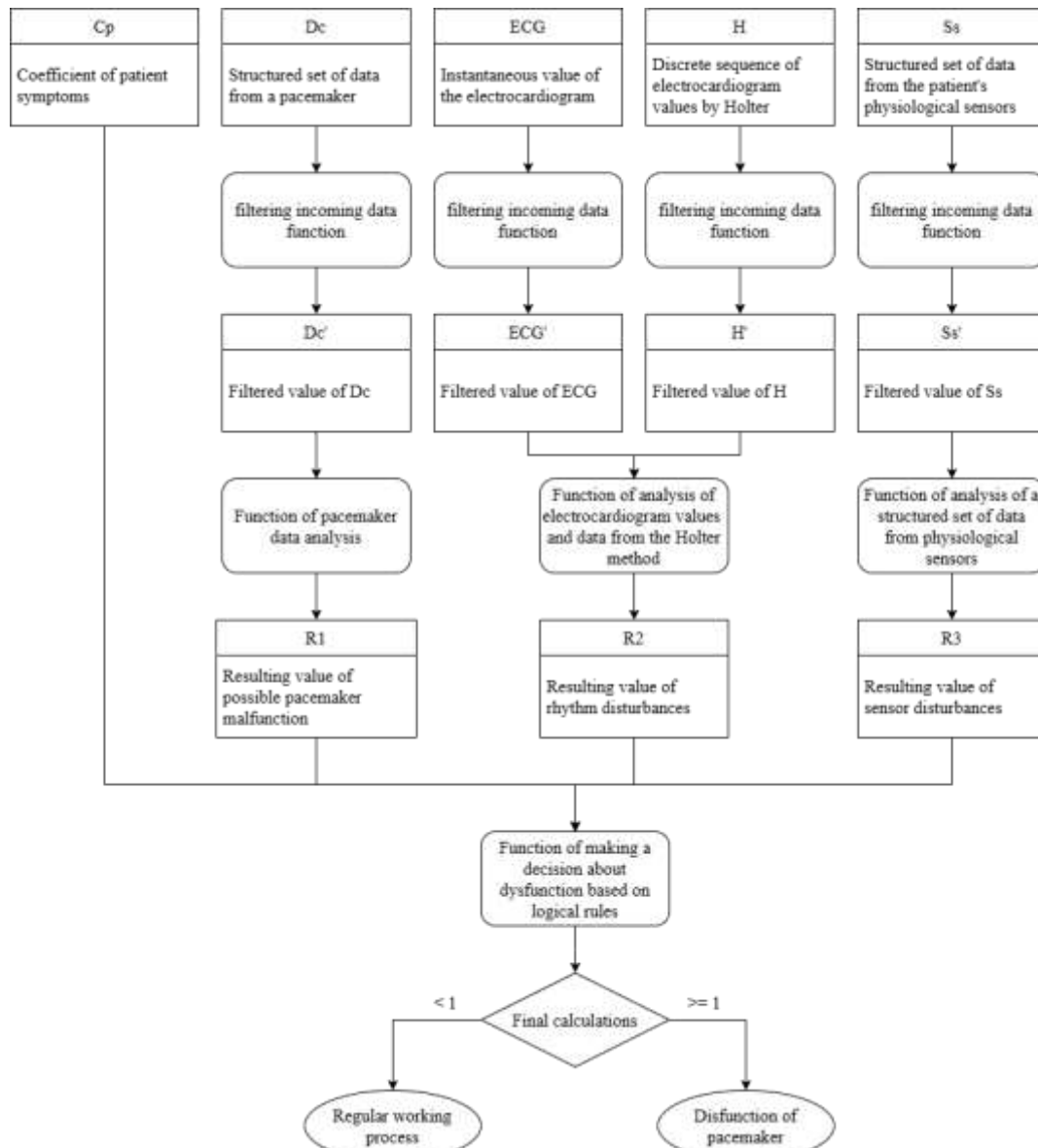


Рис. 1. Схема моделювання функціонування інформаційної роботи розпізнавання дисфункції кардіостимулятора

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

1) Розробка інформаційних технологій розпізнавання дисфункції кардіостимулятора є пріоритетною темою у сучай науці та медицині у сфері кардіології. Розробка інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора допоможе підтримувати стан здоров'я пацієнта у належному стані, та запобігати ускладненням, що збільшить якість медичної допомоги та підвищить безпеку пацієнтів.

2) У статті побудована математична модель функціонування інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора, яка дозволяє формалізувати логіку аналізу вхідних даних та ухвалення рішень, а також основні функції інформаційної технології розпізнавання дисфункції кардіостимулятора. Вона базується на зборі багатокomпонентних медичних даних, їх обробці за допомогою визначених алгоритмів та ухваленні рішень на основі логічних умов або інтелектуальних методів. Створення такої моделі є основою для подальшої реалізації системи у вигляді інформаційної технології та програмного забезпечення, що може допомогти лікарям швидко і точно виявляти несправності в роботі імплантованих пристроїв.

3) Загалом, результати моделювання підтверджують доцільність обраного підходу та демонструють, що розроблювана інформаційна технологія є перспективною для подальшої реалізації та практичного застосування в медичній діагностиці.

4) Очікуваним практичним результатом є інформаційна технологія розпізнавання дисфункції кардіостимулятора, яка працює на інтегрованих алгоритмах аналізу сигналів кардіостимулятора на основі

логічних правил, має зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для користувача, який надає інформацію про стан кардіостимулятора та повідомляє про виявлені аномалії, та забезпечує безперервний моніторинг та своєчасне сповіщення про потенційні збої у роботі кардіостимулятора. Така технологія буде знижувати ризики для пацієнтів, оскільки вона дозволить своєчасно виявляти та попереджати про можливі збої у роботі кардіостимулятора, що, в свою чергу, знизить ризик ускладнень та підвищить ефективність лікування за рахунок швидкого реагування на критичні зміни в роботі пристрою.

Література

1. Hnatchuk Y., Hovorushchenko T., Pavlova O. Methodology for the development and application of clinical decisions support information technologies with consideration of civil-legal grounds. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 1. P. 33–44. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.03>.
2. Hovorushchenko T., Moskalenko A., Osyadlyi V. Methods of medical data management based on blockchain technologies. *Journal of Reliable Intelligent Environments*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s40860-022-00178-1>.
3. Pacemakers. URL: <https://www.bhf.org.uk/informationsupport/treatments/pacemakers>.
4. Risk factors of pacing dependence and cardiac dysfunction in patients with permanent pacemaker implantation / Z. Yu et al. *ESC Heart Failure*. 2022. Vol. 9. Issue 4. P. 2325-2335. URL: <https://doi.org/10.1002/ehf2.13918>.
5. Burns E., Buttner R. Pacemaker Malfunction. URL: <https://litfl.com/pacemaker-malfunction-ecg-library/>.
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. 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>.
8. Safavi-Naeini P., Saeed M. Pacemaker Troubleshooting: Common Clinical Scenarios. *Texas Heart Institute Journal*. 2016. Vol. 43, no. 5. P. 415–418. URL: <https://doi.org/10.14503/thij-16-5918>.
9. 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>.
10. Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risks, 1990-2022 / G. A. Mensah et al. *Journal of the American College of Cardiology*. 2023. Vol. 82, no. 25. P. 2350–2473. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.11.007>.

References

1. Hnatchuk Y., Hovorushchenko T., Pavlova O. Methodology for the development and application of clinical decisions support information technologies with consideration of civil-legal grounds. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 1. P. 33–44.
2. Hovorushchenko T., Moskalenko A., Osyadlyi V. Methods of medical data management based on blockchain technologies. *Journal of Reliable Intelligent Environments*. 2022.
3. Pacemakers. URL: <https://www.bhf.org.uk/informationsupport/treatments/pacemakers>
4. Risk factors of pacing dependence and cardiac dysfunction in patients with permanent pacemaker implantation / Z. Yu et al. *ESC Heart Failure*. 2022. Vol. 9. Issue 4. P. 2325-2335.
5. Burns E., Buttner R. Pacemaker Malfunction. URL: <https://litfl.com/pacemaker-malfunction-ecg-library/>
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. 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>
8. 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.
9. Safavi-Naeini P., Saeed M. Pacemaker Troubleshooting: Common Clinical Scenarios. *Texas Heart Institute Journal*. 2016. Vol. 43, no. 5. P. 415–418 <https://doi.org/10.14503/thij-16-5918>
10. 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. <https://doi.org/10.1007/s10916-023-01981-w>
11. Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risks, 1990-2022 / G. A. Mensah et al. *Journal of the American College of Cardiology*. 2023. Vol. 82, no. 25. P. 2350–2473 <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.11.007>