

ВОЙЧУР Юрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3085-7315>

e-mail: voichury@khmnhu.edu.ua

РОЮК Роман

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0004-1664-5804>

e-mail: roiuk@gmail.com

ПИТЛЯК Максим

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-3149-8783>

e-mail: m.pytlyak@i.ua

ГОВОРУЩЕНКО Ольга

Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова

<https://orcid.org/0000-0001-6583-5699>

e-mail: govorushchenko@gmail.com

МЕТОД МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

Стаття присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі безперервного моніторингу якості сну в домашніх умовах. Актуальність дослідження обґрунтована стрімким зростанням кількості коморбідних розладів, спричинених хронічним стресом та порушенням циркадних ритмів, що негативно впливає на фізичне, психічне та емоційне благополуччя людини. У роботі детально проаналізовано роль сну як фундаментального показника здоров'я, що забезпечує регенерацію тканин, зміцнення імунної системи та підтримку когнітивних функцій мозку. Автори підкреслюють, що традиційні клінічні методи діагностики, такі як полісомнографія, є високовартісними та незручними для тривалого використання, що зумовлює потребу в переході до превентивної медицини на основі сучасних сенсорних технологій. Основна увага в статті приділена створенню кіберфізичної парадигми, яка передбачає тісну інтеграцію обчислювальних ресурсів із фізичними процесами життєдіяльності через використання носимих пристроїв, таких як смарт-годинники та фітнес-браслети. У роботі запропоновано комплексний метод моніторингу якості сну, що базується на зборі мультимодальних фізіологічних сигналів, а також інтегрує результати суб'єктивного оцінювання за допомогою Піттсбурзького індексу якості сну та опитувальника депресії Бека-II, що дозволяє сформувати багатовимірний профіль здоров'я та ідентифікувати ранні ознаки таких патологій, як апное, депресивні розлади та серцево-судинні захворювання. Наукова новизна методу полягає у використанні математичного моделювання тижневої динаміки сну у формі матриці, що дозволяє здійснювати глибоку аналітику стану пацієнта та виявляти відхилення від референтних значень у реальному часі. Практична значущість дослідження реалізується через пропозиції до архітектуру кіберфізичної системи, яка включає мобільні застосунки для пацієнта та лікаря, хмарну платформу для зберігання даних та механізми верифікації через систему medics.ua. Система забезпечуватиме замкнений цикл зворотного зв'язку, автоматично документуючи результати в електронну медичну карту та ініціюючи сповіщення лікаря у разі фіксації критичних змін стану. Запропонований підхід дозволяє частково компенсувати дефіцит фахівців шляхом автоматизації первинного аналізу даних, підвищити результативність лікування та реабілітації, а також надати персоналізовані рекомендації щодо гігієни сну.

Ключові слова: якість сну, моніторинг сну, кіберфізична система, носимі пристрої, фітнес-браслет, смарт-годинник.

VOICHUR Yurii, ROIUK Roman, PYTLYAK Maksym

Khmelnytskyi National University

HOVORUSHCHENKO Olga

National Pirogov Memorial Medical University

METHOD FOR MONITORING SLEEP QUALITY

The article is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of continuous monitoring of sleep quality at home. The relevance of the study is justified by the rapid growth in the number of comorbid disorders caused by chronic stress and circadian rhythm disturbances, which negatively affect a person's physical, mental, and emotional well-being. The paper provides a detailed analysis of the role of sleep as a fundamental indicator of health, ensuring tissue regeneration, strengthening the immune system, and supporting cognitive brain functions. The authors emphasize that traditional clinical diagnostic methods, such as polysomnography, are costly and inconvenient for long-term use, which necessitates a transition to preventive medicine based on modern sensor technologies. The article focuses on the creation of a cyber-physical paradigm that involves the close integration of computing resources with physical life processes through the use of wearable devices such as smart watches and fitness bracelets. The paper proposes a comprehensive method for monitoring sleep quality based on the collection of multimodal physiological signals, and also integrates the results of subjective assessment using the Pittsburgh Sleep Quality Index and the Beck Depression Inventory-II, which allows for the formation of a multidimensional health profile and the identification of early signs of pathologies such as apnea, depressive disorders, and cardiovascular diseases. The scientific novelty of the method lies in the use of mathematical modeling of weekly sleep dynamics in the form of a matrix, which allows for in-depth analysis of the patient's condition and detection of deviations from reference values in real time. The practical significance of the research is realized through proposals for the architecture of a cyber-physical system, which includes mobile applications for patients and doctors, a cloud platform for data storage, and verification mechanisms through the medics.ua system. The system will provide a closed feedback loop, automatically documenting results in an electronic medical record and initiating notifications to the doctor in case of critical changes in condition. The proposed approach allows for partial compensation for the shortage of specialists by automating the initial analysis of data,

improving the effectiveness of treatment and rehabilitation, and providing personalized recommendations for sleep hygiene.
Keywords: sleep quality, sleep monitoring, cyber-physical system, wearable devices, fitness bracelet, smartwatch.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 27.11.2025

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

Моніторинг якості сну є життєво важливим для управління ризиками для здоров'я, пов'язаними з розладами сну. Недостатній сон може зашкодити фізичному, психічному та емоційному благополуччю людини та збільшити ризик розвитку низки захворювань, включаючи стрес, хвороби серця, високий кров'яний тиск, інсулінорезистентність та інші стани.

Якість сну є фундаментальним показником загального стану здоров'я, оскільки під час глибоких фаз відпочинку організм здійснює критично важливі процеси регенерації тканин, синтезу білків та зміцнення імунної системи. Вона безпосередньо впливає на когнітивні функції мозку, зокрема на здатність до концентрації уваги, швидкість прийняття рішень та консолідацію пам'яті, що перетворює отриману за день інформацію на довготривалі знання [1]. Повноцінний сон виступає природним нейропротектором, забезпечуючи очищення мозку від метаболічних відходів, що в перспективі знижує ризик розвитку нейродегенеративних захворювань та підтримує високу працездатність нервової системи [2].

З точки зору психоемоційного стану, якість сну визначає рівень стресостійкості та емоційну стабільність людини протягом дня, оскільки дефіцит відпочинку провокує надмірну активність амігдали та підвищує тривожність. Порушення структури сну негативно відбивається на гормональному фоні, зокрема на балансі лептину та греліну, що відповідають за відчуття голоду та насичення, нерідко призводячи до порушень обміну речовин та набору зайвої ваги [3]. Стабільний і глибокий сон допомагає регулювати рівень кортизолу, запобігаючи вигоранню та підтримуючи високий рівень мотивації, що особливо важливо при інтенсивних інтелектуальних навантаженнях [4].

Для людей, які займаються спортом або проходять курс фізичної реабілітації, якість сну є ключовим фактором відновлення рухових функцій та м'язової координації. Саме вночі відбувається активний викид соматотропіну, який прискорює загоєння мікротравм і зміцнює опорно-руховий апарат, що робить сон невід'ємною частиною будь-якого терапевтичного плану. Таким чином, якісний сон впливає на всі аспекти життєдіяльності – від серцево-судинної безпеки до результативності у професійній сфері, виступаючи базовим ресурсом для довголіття та збереження когнітивного здоров'я [5].

Актуальність розробки методу та кіберфізичної системи моніторингу якості сну зумовлена стрімким зростанням кількості коморбідних розладів, спричинених хронічним стресом та порушенням циркадних ритмів у сучасному суспільстві. Показники фрагментації сну та тривалості сну є показниками рухової активності як індикатори психоемоційного стану людини, оскільки зміни у режимі сну та добових ритмах є валідованими маркерами депресивних розладів [6-8].

Традиційні клінічні методи, як-от полісомнографія, залишаються високовартісними та незручними для тривалого використання, що створює гостру потребу в інтелектуальних рішеннях для безперервного неінвазивного спостереження. Впровадження кіберфізичної системи дозволяє трансформувати процес моніторингу з епізодичного на постійний, забезпечуючи збір об'єктивних даних у природному для людини середовищі. Використання носимих сенсорних пристроїв (фітнес-браслетів, смарт-годинників) дозволяє безперервно та неінвазивно збирати дані про сон, ритм життя, що робить можливим виявлення ранніх ознак погіршення стану здоров'я людини, тобто відкриває нові перспективи для раннього виявлення захворювання та оцінювання динаміки лікування. Це зумовлює потребу у використанні сучасних сенсорних технологій та кіберфізичних систем, здатних забезпечити безперервний збір і аналіз показників сну людини з метою об'єктивізації діагностичного процесу.

Сучасна кіберфізична парадигма передбачає тісну інтеграцію обчислювальних ресурсів із фізичними процесами життєдіяльності, де сенсорна мережа виступає каналом отримання біометричних сигналів у реальному часі. Це дозволяє не лише фіксувати тривалість сну, а й проводити глибокий аналіз його стадій, варіабельності серцевого ритму та частоти дихання, що є критично важливим для ранньої діагностики апное або неврологічних порушень. Актуальність таких систем підсилюється можливістю автоматизації обробки великих масивів даних, що мінімізує вплив людського фактора та підвищує точність інтерпретації специфічних патернів сну.

Особливого значення цей метод набуває в контексті фізичної реабілітації та спортивної медицини, де якість нічного відновлення безпосередньо корелює з ефективністю терапевтичних заходів та нейропластичністю мозку. Для пацієнтів, які відновлюються після травм або мають хронічні захворювання, кіберфізична система моніторингу якості сну стає інструментом зворотного зв'язку, що дозволяє фахівцям коригувати плани лікування на основі об'єктивних показників організму. Поєднання інтелектуальних алгоритмів із засобами реабілітації відкриває шлях до створення персоналізованих асистентів здоров'я, що здатні адаптувати навколишнє середовище під потреби користувача.

З інженерної точки зору актуальність дослідження полягає у необхідності вдосконалення оцінки станів людини та підвищення ефективності пристроїв моніторингу. Розробка методів фільтрації артефактів руху дозволяє створювати автономні системи з високим рівнем конфіденційності даних. Це відповідає глобальним трендам розвитку Інтернету речей (IoT) в медицині, де захист персональної інформації є таким же пріоритетним, як і точність медичних вимірювань.

Загалом, створення високоефективних кіберфізичних систем моніторингу якості сну є стратегічним завданням для сучасної IT-галузі та охорони здоров'я, оскільки це дозволяє перейти від реактивної медицини до превентивної. Своєчасне виявлення розладів здоров'я на ранніх етапах є необхідною умовою для запобігання негативним наслідкам для здоров'я та швидкого підбору ефективної терапії [9]. Помилковий діагноз може стати причиною призначення невідповідного лікування, а відкладене звернення по допомогу – призвести до посилення симптомів, виникнення функціональних порушень та зниження результативності лікування [10]. Раннє розпізнавання проблем зі здоров'ям відіграє ключову роль у зменшенні ризику летальних наслідків, підвищенні ефективності терапевтичних заходів, покращенні загального стану пацієнтів та застосуванні економічно обґрунтованих методів лікування [11, 12].

Таким чином, метод та кіберфізична система моніторингу якості сну є актуальною за рахунок здатності поєднати цифрові технології, сенсорні пристрої та алгоритми аналізу даних для раннього виявлення проблем зі здоров'ям, забезпечення безперервного моніторингу та підвищення ефективності медичної допомоги. Кіберфізична система моніторингу якості сну є сучасним підходом до моніторингу здоров'я, що поєднує сенсорні технології, засоби обробки даних та алгоритми аналізу поведінкових маркерів. Актуальність такої системи також полягає у можливості обробки великих обсягів даних, що надходять у режимі реального часу, що дозволяє формувати індивідуальні моделі ризику, прогнозувати загострення стану та надавати персоналізовані рекомендації. Така кіберфізична система здатна також частково компенсувати дефіцит фахівців шляхом автоматизації процесів збору й первинного аналізу даних, знижуючи навантаження на лікарів і скорочуючи час реагування на зміни стану пацієнта.

Огляд відомих методів та засобів моніторингу якості сну

Розглянемо відомі рішення для моніторингу якості сну.

У дослідженні [13] пропонується система моніторингу сну в режимі реального часу, побудована на інфраструктурі Інтернету речей, що поєднує мультимодальні фізіологічні сигнали з периферійним інтелектом. Система складається з трьох основних модулів: збір сигналів, обробка на периферії та аналіз якості сну. Сигнали фіксуються через аналоговий інтерфейс ADS1299. Пристрій Raspberry Pi 4 обробляє локальну обробку даних та попередній висновок, тоді як Intel Neural Compute Stick 2 (NCS2) прискорює стадіювання сну на основі глибокого навчання безпосередньо на периферії. Цей повністю локалізований конвеєр обробки мінімізує залежність від хмари, зменшує навантаження на мережу та значно посилює конфіденційність користувачів. Мультимодальне об'єднання ознак динамічно інтегрує інформацію між типами сигналів, після чого використовується мережа Bi-GRU, яка фіксує послідовні залежності, критично важливі для стадіювання сну. Система завершується класифікатором Softmax для ефективного визначення станів сну. Експериментальна перевірка демонструє, що фреймворк досягає високої точності в класифікації стадій сну з мінімальною затримкою, одночасно вирішуючи ключові проблеми щодо конфіденційності та безпеки даних. Головною перевагою методу є можливість віддаленого спостереження в реальному часі без втручання в особистий простір користувача, проте суттєвим недоліком залишається залежність від стабільності інтернет-з'єднання та затримки при обробці великих масивів даних у хмарі.

Автори [14] нанесли ZnS-NiS на міжпальцеві електроди для виготовлення гнучкого датчика. Цей датчик вологості демонструє чудову довготривалу стабільність та короткий час відгуку/відновлення (0,5 с/1,5 с), що дозволяє точно контролювати дихання людини, включаючи відстеження частоти дихання та стану сну (хропіння, глибокий сон та легкий сон) у режимі реального часу. Перевагою таких засобів є надзвичайна біосумісність та здатність фіксувати специфічні біомаркери через піт або мікроколивання шкіри, але технологія все ще має обмеження щодо довговічності сенсорів та складності масштабування їх виробництва.

Точне прогнозування якості сну є складним через її глибоко індивідуальний характер та значну мінливість у тому, як люди сприймають свій сон вночі. Дослідження [15] представляє надійну суб'єктивно-вкладену структуру перехресної валідації для пасивного щоденного моніторингу сприйнятої якості сну з використанням даних, що носяться, за допомогою моделювання машинного навчання на рівні популяції. Загалом 294 учасники перебували під наглядом протягом 30 днів за допомогою комерційних носимих пристроїв у вільних умовах, з щоденною самооцінкою якості сну. Результати дослідження показують, що повністю пасивне прогнозування сприйнятої якості сну є можливим на рівні популяції з першого дня моніторингу, при цьому основними предикторами є внутрішньоіндивідуальні відхилення від індивідуальних базових значень. Найбільш впливовими предикторами виявилися відхилення в тривалості та безперервності сну, далі йдуть серцево-судинні, стресові характеристики та компоненти опитування здоров'я SF-12. Це дозволяє отримати більш цілісну картину причин порушення сну, хоча розрахункова складність таких

алгоритмів потребує значних обчислювальних потужностей мобільних пристроїв, що може призводити до швидкого розрядження акумуляторів.

Моніторинг дихання в режимі реального часу є ключовим для оцінки розладів, пов'язаних зі сном, проте звичайні одномодалні датчики стикаються з критичними обмеженнями в надійності в складних фізіологічних умовах. У роботі [16] представлено біоміметичну двомодальну платформу, що поєднує чутливий до тиску аерогель (ТСМА) та чутливу до вологості плівку (ТСМФ), обидві виготовлені з нановолокон целюлози, окислених методом ТЕМПО (ТОСНФ), та композитів МХене. Перехресно перевірене виявлення грудно-черевних рухів та моделей носового потоку усуває обмеження одного датчика, забезпечуючи надійне виявлення імітованих подій апное. Інтегрована з бездротовою системою, надлегка платформа підтримує стабільність 1000 циклів та конформний контакт зі шкірою для тривалого моніторингу сну, пропонуючи стійке, масштабоване рішення завдяки екологічно свідомому використанню целюлози та встановлюючи нові стандарти для мультимодальних носимих датчиків у сфері управління здоров'ям дихальних шляхів. Основною перевагою є повна автономність пристрою та відсутність потреби в акумуляторах, проте точність розпізнавання фаз сну за допомогою таких енергоефективних сенсорів поки що поступається традиційним методам актиграфії.

Хронічне недосипання може призвести до негативних наслідків для здоров'я і тому становить тягар для громадського здоров'я. Хоча кофеїн є широко використовуваним стимулятором, зв'язок між споживанням кофеїну та сном залишається невизначеним. Метою дослідження SleepSmart [17] було оцінити вплив споживання кофеїну через каву та енергетичні напої, використовуючи як дані смарт-годинників, так і відповіді на анкети. Дані збирали за допомогою самостійно заповнених анкет та портативних пристроїв. Первинною кінцевою точкою була тривалість сну. Об'єктивні показники сну (тривалість легкого/глибокого сну, тривалість фаз неспання, частота серцевих скорочень) та самооцінка якості сну (Пітсбурзький індекс якості сну) слугували вторинними кінцевими точками. Дослідження SleepSmart представляє носимі пристрої для відстеження сну як інноваційний метод з низьким рівнем перешкод для об'єктивного запису даних про сон. Хоча дані носимих пристроїв не вказували на значне погіршення сну в групі молодих здорових дорослих, кофеїн, як видається, негативно вплинув на суб'єктивне сприйняття сну в когорті дослідження. Перевагою методу є доступність пристроїв та зручність для довгострокових досліджень у великих групах людей, але недоліком є низька точність класифікації стадій глибокого сну порівняно з клінічними стандартами, а також закритість пропріетарних алгоритмів обробки.

У дослідженні [18] взяли участь 32 дорослих без фізичних чи психічних розладів, безсоння чи історії позмінної роботи, які дотримувалися графіка роботи з понеділка по п'ятницю. Сон контролювався вдома протягом одного тижня за допомогою портативного електроенцефалографа, і були розраховані індекси сну. Для оцінки сну та психічного здоров'я використовувалися анкети (Пітсбурзький індекс якості сну (PSQI) та Опитувальник депресії Бека-II (BDI)). Перевагою методу є можливість корекції режиму дня на основі об'єктивних біологічних маркерів, але недоліком є складність інтерпретації даних через індивідуальну варіативність хронотипів користувачів.

У дослідженні [19] використовували портативний електроенцефалограф для збору даних електроенцефалограм (ЕЕГ) префронтальної кори у стані спокою протягом 3-місячного періоду спостереження від 42 учасників. Щомісяця якість сну учасників оцінювалася за допомогою Пітсбурзького індексу якості сну (PSQI) для оцінки якості їхнього нещодавнього сну. В результаті досліджень було виявлено, що існує значна та послідовна позитивна кореляція між активністю низького α -діапазону в префронтальній корі та показниками PSQI, причому ця кореляція залишалася послідовною протягом усіх 3-місячних записів спостереження. Отримані результати забезпечують міцну основу для майбутнього застосування портативних ЕЕГ-пристроїв для моніторингу якості сну та скринінгу розладів сну у широкій популяції. Цей засіб забезпечує найвищу точність у визначенні структури сну серед портативних рішень, однак він має недолік у вигляді необхідності фіксації електродів на голові, що може бути незручним для щоденного використання в домашніх умовах.

У статті [20] представлено новий безконтактний підхід до моніторингу сну за допомогою надширококутного (UWB) радара, що забезпечує неінвазивне рішення для виявлення ключових показників порушення сну, включаючи періодичні рухи кінцівок, часті зміни положення тіла та тривале статичне положення. Використовуючи глибокі нейронні мережі, зокрема модель VGG 16, розроблений метод досягає 98% точності в класифікації характеристик якості сну, демонструючи його стійкість до достовірного аналізу. Висока чутливість радара до руху тіла дозволяє здійснювати моніторинг без необхідності використання носимих датчиків, що робить його практичною альтернативою для клінічного та домашнього застосування масштабованому, точному та комфортному моніторингу сну. Перевагою засобу є його повна безконтактність та низька вартість реалізації на базі звичайних смартфонів, проте вони дуже чутливі до сторонніх фонових шумів і мають низьку специфічність при наявності домашніх тварин або партнерів у ліжку.

Дослідження [21] представляє інноваційну, неінвазивну систему моніторингу сну, яка використовує резистори, що реагують на силу, вбудовані в простиратло для аналізу якості сну та виявлення порушень дихання, пов'язаних зі сном, пропонуючи альтернативу традиційній полісомнографії. Автори застосували

комплексну методологію, інтегруючи резистори з бездротовим мережевим пристроєм та спеціалізованим програмним забезпеченням для точного аналізу та зберігання даних у режимі реального часу. Резистори, калібровані для вимірювання біомеханічних сигналів, пов'язаних з рухом тіла, інтегровані з бездротовим мережевим пристроєм. Простирadlo з вбудованими датчиками і резисторами є перспективним інструментом для непомітного моніторингу сну та виявлення порушень сну з додатковими перевагами зручності використання та необмеженого використання, що робить його придатним для клінічних та домашніх умов. Здатність системи надавати інформацію про режими сну, виявляти епізоди апное та аналізувати пози під час сну є значним прогресом у дослідженнях та медицині сну, з потенційним застосуванням у персоналізованому управлінні здоров'ям сну.

У статті [22] пропонується система моніторингу стану сну, заснована на гнучких матрицях датчиків тиску, апаратних схемах та інтелектуальних алгоритмах, які можуть ефективно оцінювати якість сну, контролюючи позу під час сну та стан дихання. Гнучка матриця емнісних датчиків тиску, розроблена спеціально для моніторингу пози під час сну, базується на безпиловій тканинній підкладці та губчастому діелектричному шарі з кількома шарами мікроструктури, виготовлених за допомогою технології електроформування. Крім того, автори розробили тришаровий гнучкий емнісний датчик з лінійною волоконною структурою типу «ядро-оболонка» для моніторингу стану дихання на основі технології мокрого формування. Ці м'які та біосумісні носимі матриці датчиків підключені до схем збору сигналів, які можуть бездротово передавати дані про позу під час сну та стан дихання на ПК в режимі реального часу для ефективного моніторингу. Комплексний аналіз пози під час сну та стану дихання може забезпечити комплексну оцінку якості сну та цілеспрямовані пропозиції щодо покращення сну на основі результатів моніторингу. Розроблена система моніторингу стану сну може не лише надавати медичним працівникам довгострокові дані про сон, але й надавати важливу інформацію для діагностики пацієнтів з розладами сну.

Моніторинг якості сну може дати цінну інформацію про тенденції здоров'я людей похилого віку, але сучасні методи є незручними. Натомість автори [23] використовують балістокардіографію, непомітний метод фіксації часу, проведеного в ліжку, частоти серцевих скорочень, частоти дихання та неспокою. Потім вони пропонують індекс якості сну (ІЯС), який використовує ці дані для оцінки здоров'я сну людей похилого віку. Результати демонструють ефективність запропонованого методу у фіксації різних станів здоров'я, які ілюструються детальними тематичними дослідженнями. Порівняльний аналіз додатково підкреслює зв'язок між станом здоров'я та якістю сну, показавши, що мешканці з частими проблемами зі здоров'ям мали значно нижчий ІЯС порівняно зі здоровішими мешканцями. Ця значна різниця підкреслює корисність ІЯС як чутливого показника для виявлення та моніторингу змін якості сну, пов'язаних зі здоров'ям, у людей похилого віку.

У статті [24] представлено систему EdgeGAN, яка пропонує гібридну архітектуру для медичних розумних ліжок, спрямовану на ефективний моніторинг якості сну. Система EdgeGAN бездоганно інтегрує Інтернет речей (IoT) та периферійні обчислення шляхом інтеграції легких генеративно-змагальних мереж (GAN) у пристрої периферійних обчислень. Об'єднання цієї інтеграції підвищує ефективність моніторингу якості сну. Порівняно з традиційними системами моніторингу сну, система EdgeGAN пропонує знижену обчислювальну складність та спрощену роботу користувача. Крім того, вона вміло фіксує довгострокову часову залежність в даних про сон, тим самим збільшуючи час зберігання історичної інформації. Вона також демонструє виняткову сумісність з пристроями моніторингу сну. Крім того, система EdgeGAN має можливість інтелектуально визначати, чи завантажувати відповідні дані в хмару на основі уподобань користувача, тим самим зменшуючи залежність від хмарних ресурсів. Порівняно з традиційними хмарними платформами, система EdgeGAN має можливість обходити блокування даних, що виникають через збільшення кількості запитів користувачів. Ця інновація підвищує продуктивність у режимі реального часу та сумісність у моніторингу сну, надаючи пріоритет захисту конфіденційності користувачів. Як результат, вона пропонує інтелектуальне та зручне рішення для розробки майбутніх розумних медичних пристроїв.

Пропонована у [25] технологія дозволила дистанційно контролювати та керувати багатьма приладами та гаджетами, якими ми користуємося щодня. Дані про здоров'я та фізичну форму збираються за допомогою носимих пристроїв, прикріплених до тіла пацієнтів. Ціла низка сторін може отримати вигоду від цієї технології, включаючи лікарів, страховиків та медичних працівників. Ця технологія, включаючи розумні годинники, розумні кільця, розумні тканинні браслети та GPS-взуття, часто використовується для фітнесу та велнесу, оскільки дозволяє користувачам відстежувати своє щоденне здоров'я. Пристрої, які обчислюють характеристики сну, зберігаючи рухи сну, належать до категорії носимих пристроїв, що носяться на зап'ясті. Було продемонстровано, що глибоке навчання здатне прогнозувати ефективність сну на основі даних, отриманих з носимих пристроїв під час періодів неспання. У зв'язку з цим, це дослідження створює нову модель глибокого навчання для інтелектуальної системи моніторингу здоров'я на основі носимих пристроїв (DLM-WESHMS) для прогнозування якості сну. Носимі пристрої спочатку здатні збирати дані, пов'язані з активністю сну, використовуючи описаний підхід DLM-WESHMS. Потім дані проходять попередню обробку для створення стандартного формату. За допомогою DLM-WESHMS якість сну прогнозується за допомогою моделі мережі глибоких довір.

Отже, сучасні засоби моніторингу якості сну демонструють стрімкий перехід від стаціонарних клінічних систем до гнучких кіберфізичних рішень, які базуються на інтеграції Інтернету речей, периферійних обчислень та штучного інтелекту. Основною перевагою розглянутих методів є їхня висока адаптивність до повсякденного життя користувача – від носимих гаджетів і портативних ЕЕГ-пристроїв до повністю безконтактних рішень, таких як UWB-радар, розумні ліжка з балістокардіографією або сенсорні простиратла. Використання глибокого навчання, зокрема мереж Bi-GRU та архітектур GAN, дозволяє досягати високої точності в стадіюванні сну та виявленні патологій, як-от апное, безпосередньо на пристрої, що суттєво підвищує конфіденційність медичних даних та зменшує навантаження на мережеву інфраструктуру. Окрім того, застосування інноваційних наноматеріалів і біоміметичних сенсорів забезпечує надійний моніторинг фізіологічних показників, включаючи частоту дихання та мікроколивання тіла, пропонуючи стійкі та екологічні альтернативи традиційній електроніці.

Попри значний технологічний прогрес, загальним недоліком більшості існуючих систем залишається компроміс між точністю вимірювань та комфортом експлуатації, оскільки найточніші методи, як-от портативна ЕЕГ, вимагають незручної фіксації на тілі, тоді як безконтактні сенсори часто страждають від низької специфічності при наявності фонових шумів або сторонніх об'єктів у зоні моніторингу. Обчислювальна складність сучасних алгоритмів машинного навчання, необхідних для персоналізованого аналізу суб'єктивної якості сну, створює високе навантаження на обчислювальні ресурси мобільних пристроїв, що призводить до швидкої втрати заряду акумуляторів. Крім того, тривале використання гнучких сенсорів та розумного текстилю все ще обмежене питаннями довговічності матеріалів при регулярному механічному впливі та пранні, а пропріетарний характер алгоритмів комерційних смарт-пристроїв заважає повній валідації даних за клінічними стандартами. Таким чином, подальший розвиток галузі потребує адаптації засобів та їх вартості до умов домашнього середовища. Тому, дане дослідження буде спрямоване на розроблення методу та кіберфізичної системи моніторингу якості сну з використанням носимих пристроїв та методів обробки даних в реальному часі в умовах домашнього середовища, з метою забезпечення ранньої діагностики, своєчасного втручання та підвищення ефективності медичної допомоги.

Формування вимог предметної галузі

Аналіз якості сну базується на комплексному поєднанні об'єктивних сомнологічних показників та суб'єктивних індексів, які в сукупності дозволяють діагностувати не лише фізичне виснаження, а й серйозні психоемоційні розлади. Одним із ключових параметрів є індекс фрагментації сну, який відображає стабільність відпочинку – якщо в межах норми кількість мікропробуджень та переходів між стадіями не має перевищувати 20-25%, то зростання цього показника понад 30% часто стає маркером депресивних станів або високого рівня тривожності. Важливу роль відіграє і загальна тривалість сну, де критичним є не лише дефіцит відпочинку, а й його надлишок (гіперсомнія), коли перебування у стані сну понад 10 годин на добу в поєднанні з відчуттям розбитості може вказувати на клінічну депресію.

Фізіологічна структура сну, що включає тривалість легких і глибоких фаз, безпосередньо корелює зі здатністю організму до нейропластичності та фізичної регенерації, оскільки скорочення частки глибокого сну призводить до зниження когнітивної ефективності. Моніторинг тривалості фаз неспання вночі та варіабельності частоти серцевих скорочень дозволяє оцінити стан вегетативної нервової системи, де підвищений пульс у стані спокою під час сну свідчить про нездатність організму до повного релаксу. Це об'єктивне оцінювання часто доповнюється використанням Піттсбурзького індексу якості сну (PSQI), який через систему анкетування виявляє приховані порушення графіку та суб'єктивне задоволення відпочинком, що є критичним для формування цілісної клінічної картини.

Для встановлення взаємозв'язку між якістю нічного відновлення та ментальним здоров'ям фахівці інтегрують результати сомнологічного моніторингу з опитувальником депресії Бека-II (BDI). Високі бали за шкалою BDI часто супроводжуються специфічними змінами в архітектурі сну, такими як ранні пробудження та неможливість повторного засинання, що перетворює ці показники на надійні діагностичні маркери в реабілітаційній практиці. Таким чином, поєднання біометричних даних, отриманих через кіберфізичні системи, із психометричними інструментами дозволяє створити багатовимірний профіль здоров'я пацієнта, що забезпечує персоналізований підхід до відновлення як нервової системи, так і загального фізичного стану.

Показники якості сну представлені у Таблиці 1.

Додаткові клінічні індекси для комплексної оцінки: PSQI (Піттсбурзький індекс) – сумарний бал > 5 вказує на низьку якість сну, що потребує корекції; BDI-II (опитувальник Бека) – показник > 14 балів (легка депресія) часто корелює з ростом фрагментації сну та зміною тривалості фаз сну.

Фітнес-браслети та смарт-годинники (наприклад, Xiaomi Mi Band, Fitbit, Apple Watch, Garmin, Samsung Galaxy Watch тощо) здатні виміряти лише частину з вищезазначених показників, оскільки визначають показники не через активність мозку, а опосередковано – через рух тіла (акселерометр) та оптичний датчик пульсу (PPG). Для отримання максимально точних відсоткових показників фаз сну важливо дотримуватися кількох правил експлуатації носимого пристрою. Браслет або годинник має щільно прилягати

до зап'ястя, щоб оптичний датчик не втрачав сигнал пульсу через мікропросвіти, а також його варто одягати на 1-2 сантиметри вище кістки зап'ястя для кращого зчитування кровотоку.

Таблиця 1

Показники якості сну

Показник	Нормальні (референтні) значення	Значення, що вказують на проблеми	На які проблеми вказують відхилення
Фрагментація сну (індекс пробуджень) (<i>SFI</i>)	Менше 25%	Понад 25%	Депресивні стани, хронічний стрес, апное, синдром неспокійних ніг
Тривалість сну (за добу) (<i>SD</i>)	7–9 годин (для дорослих)	Менше 6 годин або понад 10 годин	Дефіцит – тривожність, ризик серцево-судинних захворювань. Надлишок – клінічна депресія, діабет, системні запалення
Глибокий сон (<i>DS</i>)	15-25% від загального часу	Менше 15%	Порушення когнітивних функцій, уповільнена фізична регенерація, хронічна втома
Легкий сон (<i>LS</i>)	50-60% від загального часу	Понад 60% (надлишок легкого сну)	Неякісне відновлення, часті мікропробудження через зовнішні подразники або біль
Тривалість фаз неспання	До 20-30 хвилин за ніч	Понад 40-60 хвилин або часті епізоди	Безсоння (інсомнія), вікові зміни, гіпербудливість нервової системи
Частота серцевих скорочень (уві сні) (<i>HR</i>)	40-60 уд/хв (залежить від віку та тренуваності)	Понад 60 уд/хв у стані спокою	Вегетативна дисфункція, перетренованість, серцева недостатність, інфекційні процеси
Варіабельність серцевого ритму (<i>RMSSD</i>)	Висока (зазвичай середньоквадратичне значення послідовних різниць <i>RMSSD</i> > 40 мс)	Низька (монотонний ритм)	Хронічний стрес, перевтома, ризик раптової зупинки серця, депресія
Насичення крові киснем (<i>BOS</i>)	95-100%	Менше 95% (десатурація)	Обструктивне апное сну, гіпоксія, захворювання легень
Шкірна провідність	Низька стабільна активність	Різкі піки або високий фон	Психоемоційне напруження, нічні жахи, больовий синдром під час сну
Температура поверхні шкіри	33-35°C (стабільна з нічним падінням)	Відхилення > 1°C від базової	Початок інфекційного захворювання, порушення терморегуляції, запальні процеси
Частота дихання (<i>RR</i>)	12–20 циклів за хвилину	Менше 12 або понад 20	Дихальна недостатність, серцева декомпенсація, панічні атаки (уві сні)

Показники, які вимірюються з високою точністю та досить надійно, оскільки вони базуються на прямих фізичних сигналах: тривалість сну (більшість пристроїв автоматично визначають, коли користувач заснув і прокинувся, а також можуть оцінити надмірну тривалість або дефіцит сну; гаджети добре фіксують час засинання та пробудження (точність 85–95%)); фрагментація сну (трекери сну визначають тривалість сну, фази, кількість пробуджень, збільшення фрагментації сну); частота серцевих скорочень (ЧСС) (оптичні датчики у стані спокою мають похибку менше 5% порівняно з нагрудними ремнями); насичення крові киснем (більшість нових моделей вимірюють рівень кисню автоматично протягом всієї ночі); варіабельність серцевого ритму (один із ключових параметрів для оцінки стресу та відновлення; метод *RMSSD* (середньоквадратичне відхилення послідовних різниць між ударами серця) є «золотим стандартом» для оцінки активності парасимпатичної нервової системи, яка відповідає за відновлення та розслаблення організму; технічно він базується на аналізі інтервалів між R-зубцями серцевого циклу (так званих *RR*-інтервалів); оскільки серце б'ється немов метроном лише в критичних станах, невелика різниця в часі між кожним наступним ударом (наприклад, 800 мс, 825 мс, 790 мс) свідчить про те, що організм гнучко реагує на внутрішні та зовнішні подразники; носимі пристрої відображають цей показник у мілісекундах (мс), оскільки це стандартна одиниця вимірювання в медицині та спорті; чим вищий показник *RMSSD*, тим краще організм пацієнта відновлюється; різке падіння цього значення часто є першим сигналом перетренованості, стресу або хвороби ще до появи перших клінічних симптомів).

Показники, що є розрахунковими (алгоритмічними), оціночними – фітнес-браслет або годинник «припускає», що людина в певній фазі сну на основі її пульсу та рухів: тривалість легкого/глибокого/*REM*-сну (точність стадіювання сну варіюється від 50% до 80%, але пристрої все одно можуть помилитися, прийнявши нерухоме неспання за легкий сон; глибокий сон пристрій визначає за станом максимального спокою – у цій фазі м'язи повністю розслаблені, рухи тіла практично відсутні, а частота серцевих скорочень

стає стабільною та мінімальною; легкий сон, навпаки, характеризується наявністю незначних рухів кінцівок та більшою варіативністю пульсу – сучасні алгоритми штучного інтелекту в смарт-годинниках аналізують ці комбінації даних у реальному часі та класифікують кожен проміжок часу як певну фазу; переважна більшість сучасних носимих пристроїв дійсно показують тривалість фаз не лише у годинах і хвилинах, а й у відсотках від загального часу перебування в ліжку); фази неспання (гаджети часто недооцінюють кількість коротких пробуджень (менше 1–2 хвилини), якщо людина при цьому не рухала рукою); частота дихання (оптичний датчик пульсу фіксує ці зміни, а алгоритми ШІ вираховують кількість вдихів на хвилину; вимірювання частоти дихання носимими пристроями базується на явищі, яке називається респіраторною синусовою аритмією; коли людина вдихає, частота серцевих скорочень трохи збільшується, а коли видихає – зменшується; оптичний сенсор пульсу на зап'ясті фіксує ці мікроскопічні прискорення та сповільнення ритму (зміни RR-інтервалів), а алгоритми штучного інтелекту відфільтровують їх і перетворюють на дихальні цикли; фактично пристрій «чує» дихання людини через ритмічні коливання серця).

Специфічні нові функції (2025–2026 рр.): виявлення апное (зупинки дихання) на основі аналізу дихання та кисню; температура шкіри (використовується для відстеження циркадних ритмів та раннього виявлення хвороб).

Порівняльний аналіз можливостей різних носимих пристроїв наведений у Таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз можливостей різних носимих пристроїв

Носимий пристрій	Ключові показники	Особливості точності
Garmin	Частота серцевих скорочень, насичення крові киснем, варіабельність серцевого ритму, фази сну «глибокий сон/легкий сон», фрагментація сну, тривалість сну	Найкращі для оцінки фізичного відновлення.
Apple Watch	Частота серцевих скорочень, насичення крові киснем, фази сну «глибокий сон/легкий сон», апное, фрагментація сну, тривалість сну	Висока точність стадіювання
Samsung	Частота серцевих скорочень, насичення крові киснем, апное	Першими впровадили сертифіковане виявлення апное
Xiaomi (Mi Band)	Частота серцевих скорочень, насичення крові киснем, фази сну «глибокий сон/легкий сон», фрагментація сну, тривалість сну	Доступні, але мають вищу похибку в глибоких фазах
Fitbit	Частота серцевих скорочень, насичення крові киснем, фази сну «глибокий сон/легкий сон», варіабельність серцевого ритму, фрагментація сну, тривалість сну	Дуже детальний аналіз «профілю сну» (Sleep Profile)

Головний недолік усіх носимих пристроїв – низька специфічність. Вони добре бачать, коли людина спить (чутливість), але часто не бачать, коли людина вже прокинулася, але просто лежить нерухомо (наприклад, при безсонні чи депресії).

Отже, для майбутньої кіберфізичної системи моніторингу якості сну на основі носимого пристрою приймемо за базові такі показники: індекс фрагментації сну за добу

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{загальний час сну}} \cdot 100\%; \text{ тривалість сну за добу } SD \text{ (години); глибокий сон } DS \text{ (відсотки);}$$

легкий сон LS (відсотки); частота серцевих скорочень уві сні HR (кількість ударів на хвилину); варіабельність серцевого ритму – середньоквадратичне значення послідовних різниць $RMSSD$ (мілісекунди); насичення крові киснем BOS (відсотки); частота дихання RR (цикли за хвилину).

Розроблювана кіберфізична система моніторингу якості сну буде використовувати саме вищеописані базові показники, зібрані з фітнес-браслета та/або смарт-годинника, а також додаткові клінічні індекси для комплексної оцінки – PSQI (Піттсбурзький індекс) (<https://sleeplab.com.ua/uk/projti-test-pittsburzkij-indeks-yakosti-snu-pittsburgh-sleep-quality-index-psqi-2/>) та BDI-II (опитувальник Бека) (<https://cbr-therapist.net/BDI>). Кіберфізична система передбачає носіння пацієнтом носимого пристрою (фітнес-браслету та/або смарт-годинника), а також встановлення спеціального мобільного застосунку на смартфон як пацієнта, так і його сімейного лікаря.

Метод моніторингу якості сну

Тоді метод моніторингу якості сну складається з таких етапів:

1) реєстрація пацієнта у мобільному застосунку із зазначенням даних сімейного лікаря; верифікація зазначених даних про сімейного лікаря в системі medics.ua для пацієнтів з України або в аналогічній системі для пацієнтів з інших країн;

2) ознайомлення пацієнта із цифровим повідомленням про згоду та конфіденційність, підтвердження згоди;

3) підвантаження електронної медичної картки пацієнта (діагнози, ліки, попередні результати) з системи medics.ua;

4) збір щодоби мобільним застосунком добових даних з носимого пристрою (фітнес-браслету та/або смарт-годинника) та передача даних у хмару. Дані, що збираються: кількість нічних пробуджень, тривалість сну SD , фази сну «глибокий сон DS / легкий сон LS », частота серцевих скорочень уві сні HR , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі $RMSSD$, насичення крові киснем BOS , частота дихання RR тощо;

5) обчислення показника $SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\%$ щодоби;

6) попередня обробка даних (фільтрація шумів) та початкова аналітика даних;

7) накопичення показників за тиждень: динаміка тижневої якості сну $WSQD$ – матриця розміром 7×8 , де в елементи $wsqd[i,1]$, $i = 1..7$ записуються значення SFI з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,2]$, $i = 1..7$ записуються значення SD з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,3]$, $i = 1..7$ записуються значення DS з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,4]$, $i = 1..7$ записуються значення LS з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,5]$, $i = 1..7$ записуються значення HR з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,6]$, $i = 1..7$ записуються значення $RMSSD$ з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,7]$, $i = 1..7$ записуються значення BOS з понеділка по неділю; в елементи $wsqd[i,8]$, $i = 1..7$ записуються значення RR з понеділка по неділю; матриця тижневої якості сну $WSQD$ будується як результат накопичення показників за повний тижневий цикл (7 діб), вона має розмірність 7×8 , де кожен рядок відповідає дню тижня (від понеділка до неділі), а кожен стовпець – конкретному параметру життєдіяльності, що зчитується з носимого пристрою або обчислюється системою;

8) щотижневе опитування пацієнта з використанням опитувальників $PSQI$ (Піттсбурзький індекс) (<https://sleeplab.com.ua/uk/projti-test-pittsburzkij-indeks-yakosti-snu-pittsburgh-sleep-quality-index-psqi-2/>) з отриманням індексу $PSQI$ та BDI -II (опитувальник Бека) (<https://cbt-therapist.net/BDI>) з отриманням індексу BDI ;

9) аналітика даних та оцінка стану пацієнта:

якщо $wsqd[i,1]$ ($i = 1..7$) $\leq 25\%$ та $7 \leq wsqd[i,2]$ ($i = 1..7$) ≤ 9 та $15 \leq wsqd[i,3]$ ($i = 1..7$) ≤ 25 та $50 \leq wsqd[i,4]$ ($i = 1..7$) ≤ 60 та $40 \leq wsqd[i,5]$ ($i = 1..7$) ≤ 60 та $wsqd[i,6]$ ($i = 1..7$) ≥ 40 та $wsqd[i,7]$ ($i = 1..7$) ≥ 95 та $12 \leq wsqd[i,8]$ ($i = 1..7$) ≤ 20 та $PSQI \leq 5$ та $BDI \leq 14$, то в пацієнта спостерігається висока якість сну,

інакше:

якщо $wsqd[i,1]$ ($i = 1..7$) > 25 , то в пацієнта є проблеми з фрагментацією сну, що можуть вказувати на депресивні стани, хронічний стрес, апное, синдром неспокійних ніг;

якщо $wsqd[i,2]$ ($i = 1..7$) ≤ 6 , то в пацієнта є проблеми з дефіцитом тривалості сну, що можуть вказувати на тривожність, ризик серцево-судинних захворювань;

якщо $wsqd[i,2]$ ($i = 1..7$) ≥ 10 , то в пацієнта є проблеми з надлишком тривалості сну, що можуть вказувати на клінічну депресію, діабет, системні запалення;

якщо $wsqd[i,3]$ ($i = 1..7$) < 15 , то в пацієнта є проблеми з порушеннями глибокого сну, що можуть вказувати на порушення когнітивних функцій, уповільнену фізичну регенерацію, хронічну втому;

якщо $wsqd[i,4]$ ($i = 1..7$) > 60 , то в пацієнта є проблеми з надлишком легкого сну, що можуть вказувати на неякісне відновлення, часті мікропробудження;

якщо $wsqd[i,5]$ ($i = 1..7$) > 60 , то в пацієнта є проблеми з надмірною частотою серцевих скорочень уві сні, що можуть вказувати на вегетативну дисфункцію, серцеву недостатність, перетренованість, інфекційні процеси в організмі;

якщо $wsqd[i,6]$ ($i = 1..7$) < 40 , то в пацієнта є проблеми з варіабельністю серцевого ритму (монотонний ритм), що можуть вказувати на хронічний стрес, перевтому, ризик раптової зупинки серця, депресію;

якщо $wsqd[i,7] \ (i = 1..7) \leq 95$, то в пацієнта є проблеми з насиченням крові киснем (десатурація), що можуть вказувати на обструктивне апное сну, гіпоксію, захворювання легень;

якщо $wsqd[i,8] \ (i = 1..7) < 12$, то в пацієнта є проблеми з частотою дихання, що можуть вказувати на дихальну недостатність, серцеву декомпенсацію;

якщо $wsqd[i,8] \ (i = 1..7) > 20$, то в пацієнта є проблеми з частотою дихання, що можуть вказувати на панічні атаки уві сні;

якщо $PSQI > 5$, то в пацієнта спостерігається низька якість сну;

якщо $BDI > 14$, то в пацієнта спостерігається низька якість сну, яка супроводжується ростом фрагментації сну та зміною тривалості фаз сну, що може вказувати на депресивний розлад;

10) якщо в пацієнта встановлені проблеми зі сном, то вживаються такі заходи: повідомлення пацієнта та його сімейного лікаря про стан пацієнта – які порушення сну зафіксовані та на які проблеми зі здоров'ям вони можуть вказувати (сімейний лікар в такому разі повинен взяти пацієнта під своє спостереження та призначити йому зустріч для проведення необхідних обстежень); документування стану пацієнта в електронній медичній картці пацієнта; нагадування пацієнту про запланований візит до сімейного лікаря; надання порад щодо профілактики проблем зі сном в мобільному застосунку;

10) зворотний зв'язок та візуалізація: в мобільному застосунку пацієнта відображається денний та тижневий графіки його показників сну, повідомлення від лікаря з порадами та рекомендаціями; в мобільному застосунку лікаря відображається звіт щодо показників сну пацієнта, а також попередження, коли виникають проблеми зі сном в пацієнта і на які проблеми зі здоров'ям вони можуть вказувати;

11) інтеграція системи з електронними медичними картками: вся інформація про стан пацієнта оперативно заноситься в його електронну медичну картку.

Запропонований метод моніторингу якості сну забезпечує комплексний та інтегрований підхід до контролю стану пацієнта, поєднуючи об'єктивні дані з носимих пристроїв із суб'єктивними показниками клінічних опитувальників PSQI та BDI-II. Кіберфізична система, розроблена на основі такого методу, дозволить не лише збирати щоденні параметри, а й верифікувати дані пацієнта через медичні системи, забезпечуючи підвантаження актуальної електронної медичної картки. Важливою перевагою методу є накопичення тижневої динаміки у вигляді матриці показників, що дозволяє проводити глибоку аналітику та оцінювати стан здоров'я на основі чітко визначених референтних значень для кожної фази сну та фізіологічного параметра. Саме матрична структура тижневої динаміки дозволяє проводити швидку перевірку умов для оцінки стану пацієнта шляхом автоматичного аналізу кожного рядка матриці на відповідність референтним значенням і, у разі відхилень, ініціювати сповіщення лікаря про конкретні порушення. Така модель забезпечує високу швидкість обробки даних та зручність для подальшої візуалізації тижневих графіків у мобільному застосунку.

Метод гарантує оперативне реагування на виявлені порушення, забезпечуючи автоматизований зв'язок між пацієнтом та його сімейним лікарем у разі фіксації проблем, що можуть вказувати на депресію, апное або серцево-судинні ризики. Завдяки безперервному циклу зворотного зв'язку, візуалізації графіків у мобільному застосунку та автоматичному документуванню результатів у медичну карту, система перетворює пасивне спостереження на активний інструмент превентивної медицини. Це дозволяє не лише надавати персоналізовані поради щодо профілактики, а й вчасно призначати необхідні обстеження, що суттєво підвищує ефективність реабілітації та загальну якість життя пацієнта.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Запропонований метод та розроблювана на його основі кіберфізична система моніторингу якості сну забезпечують перехід від епізодичного клінічного спостереження до безперервної превентивної діагностики в природних для пацієнта умовах. Завдяки інтеграції носимих пристроїв, хмарних обчислень та інтелектуальних алгоритмів, система дозволить об'єктивізувати стан здоров'я, фіксуючи не лише тривалість сну, а й глибоку структуру його фаз, варіабельність серцевого ритму та насичення крові киснем. Математичне моделювання тижневої динаміки у формі матриці у поєднанні з клінічними індексами PSQI та BDI-II створює багатовимірний профіль пацієнта, що сприяє ранньому виявленню депресивних станів, апное та серцево-судинних ризиків.

Головною перевагою розробленого методу є створення замкнутого циклу зворотного зв'язку між пацієнтом та медичною інфраструктурою, що включає верифікацію даних через систему *medics.ua* та автоматичне документування результатів в електронну медичну карту. Система автоматизує первинний аналіз даних, частково компенсуючи дефіцит профільних фахівців та забезпечуючи оперативне сповіщення лікаря про критичні відхилення від референтних значень. Впровадження такої кіберфізичної моделі дозволяє персоналізувати реабілітаційні заходи, підвищити ефективність медичної допомоги та суттєво покращити якість життя людей за рахунок вчасного втручання та надання індивідуальних рекомендацій щодо профілактики розладів сну.

References

1. Exploring the relationship between sleep quality, anxiety, depression and frailty in older adults with stroke: a latent profile and mediation analysis / Y. Zhou et al. *BMC Geriatrics*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1186/s12877-025-06857-x>.
2. Gender specific associations and interactions of fat quality with sleep and mental health in the elderly / B. Ghosn et al. *Journal of Health, Population and Nutrition*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1186/s41043-025-01154-0>.
3. The association between animal-based and plant-based protein intake with sleep quality, mood, anxiety, depression and stress among elderly: a cross-sectional study / B. Ghosn et al. *BMC Public Health*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1186/s12889-025-25857-5>.
4. A cross-sectional study of sleep quality and its association with academic performance and psychological distress among medical students in Mansoura University, Egypt / M. Y. Selim et al. *The Egyptian Journal of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery*. 2026. Vol. 62, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s41983-026-01070-y>.
5. Multivariate associations of motor performance, sleep quality, depressive symptoms, and grey matter volume in younger and mid-to-older adults / V. Küppers et al. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-34951-y>.
6. Familial risk for depression is associated with reduced physical activity in young adults: evidence from a wrist-worn actigraphy study / C. Dell'Acqua et al. *Translational Psychiatry*. 2024. Vol. 14, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41398-024-02925-9>.
7. A new approach for objective monitoring of the pharmacological-treatment response in recurrent depressions / R. Dimitrov et al. *Pharmacia*. 2024. Vol. 71. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.3897/pharmacia.71.e125942>.
8. Effects and neural mechanisms of different physical activity on major depressive disorder based on cerebral multimodality monitoring: a narrative review / J. Guan et al. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2024. Vol. 18. URL: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1406670>.
9. Multi-Class Stress Detection Using Physiological Sensor Data / P. Dhanalakshmi et al. *2024 International Conference on Intelligent Systems for Cybersecurity (ISCS)*, Gurugram, India, 3–4 May 2024. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/iscs61804.2024.10581331>.
10. Espinoza García A. D. Early detection of mental health problems in university students. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*. 2024. Vol. 24, no. 1. URL: <https://doi.org/10.25176/rfmh.v24i1.6080>.
11. Arora S., Sahadevan P., Sundarakumar J. S. Association of Sleep Quality with Physical and Psychological Health Indicators among Overweight and Obese, Middle-aged and Older Rural Indians. *Sleep Medicine: X*. 2024. P. 100112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sleepx.2024.100112>.
12. A qualitative study on the adaptation of community programmes for the promotion of early detection and health-seeking of perinatal depression in Nepal / P. Subba et al. *BMC Women's Health*. 2024. Vol. 24, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12905-024-03122-y>.
13. Jin E., Wang Q., Wang X., Li Y., Shao Z. An IOT-enabled multimodal framework for real-time sleep quality assessment and health monitoring. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219519425400743>.
14. Construction of high humidity-stabilized ZnS-NiS composites by NiS-induced phase transition: demonstrated for sleep quality monitoring / Y. Liu et al. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2025. P. 138847. URL: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138847>.
15. Unobtrusive Perceived Sleep Quality Monitoring in the Wild / A. D. Rossi et al. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 1–26. URL: <https://doi.org/10.1145/3749502>.
16. Multilayered cellulose nanofiber/MXene-based dual-mode sensor for monitoring sleep quality and respiratory disorders / A. Li et al. *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 514. P. 163426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163426>.
17. Effects of Caffeine Intake on Self-Administered Sleeping Quality and Wearable Monitoring of Sleep in a Cohort of Young Healthy Adults / J. Schlichtiger et al. *Nutrients*. 2025. Vol. 17, no. 9. P. 1503. URL: <https://doi.org/10.3390/nu17091503>.
18. Impact of irregular sleep patterns on mental health and sleep quality assessed by home-based EEG monitoring / S. Miyata et al. *Chronobiology International*. 2025. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1080/07420528.2025.2606288>.
19. Monitoring Sleep Quality Through Low α -Band Activity in the Prefrontal Cortex Using a Portable Electroencephalogram Device: Longitudinal Study / C. Han et al. *Journal of Medical Internet Research*. 2025. T. 27. C. e67188. URL: <https://doi.org/10.2196/67188>.
20. Contactless Sleep Quality Monitoring Exploiting Radar Signal / M. Farooq et al. *2025 2nd International Conference on Microwave, Antennas & Circuits (ICMAC)*, Islamabad, Pakistan, 17–18 April 2025. 2025. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/icmac64768.2025.11003230>.
21. Innovative Sleep Monitoring: A Non-Invasive Approach Using Force-Sensing Resistors for Analyzing Sleep Quality and Detecting Sleep-Related Breathing Disorders. *International Journal of Geoinformatics*. 2024. URL: <https://doi.org/10.52939/ijg.v20i3.3123>.
22. Sleep State Monitoring System Based on Flexible Pressure sensor Arrays for Evaluating Sleep Quality / Y. Li et al. *IEEE Sensors Journal*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3452940>.
23. Sleep Quality Index for Sensor Data in Eldercare Monitoring / K. K. Hasan et al. *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2024. Vol. 23, no. 6. P. 431–440. URL: <https://doi.org/10.18280/im.230603>.
24. EdgeGAN: Enhancing Sleep Quality Monitoring in Medical IoT Through Generative AI at the Edge / K. Peng et al. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. 16–21. URL: <https://doi.org/10.1109/iotm.001.2300276>.
25. The prediction of sleep quality using wearable-assisted smart health monitoring systems based on statistical data / A. S. Zamani et al. *Journal of King Saud University - Science*. 2023. Vol. 35, no. 9. P. 102927. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102927>.