

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну  
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 240251.24.20.16 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група KI2M-24-2

Керівник

канд.-техн. наук, доцент  
Науковий ступінь, учене звання

Нормоконтролер

д. техн. наук, професор  
Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС  
« 5 » травня 2026 р.

дата

  
Підпис

Роман РОЮК  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Світлана САЧЕНКО  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Сергій ЛИСЕНКО  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)

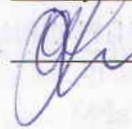
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІПС



Ольга ПАВЛОВА

“ 12 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Роюк Роман Віталійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система збору, аналізу якості борошна на підставі машинного навчання

Керівник проекту (роботи) Саченко Світлана Іванівна, канд. екон. наук, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну

Вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Метод та алгоритм діяльності кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Кіберфізична система моніторингу якості сну

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	12.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	12.01.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 - аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	20.01.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 - розробка моделей для вирішення поставленої задачі.	01.02.2026	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.03.2026	виконано
6	Робота над розділом 3 - розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 - проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2026	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2026	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2026	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	

Здобувач  Роман РОЮК  
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Світлана САЧЕНКО  
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну.

Автор роботи: Роюк Р.В., студент групи КІ2М-24-2.

Керівник роботи: Саченко С.І., кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем.

Пояснювальна записка: 82 с., 3 рис., 8 табл., 2 дод., 88 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: кіберфізична система, якість сну, моніторинг якості сну, параметри моніторингу якості сну, носимі пристрої, фітнес-браслет, смарт-годинник.

*Об'єктом дослідження є процес автоматизації моніторингу якості сну.*

*Предметом дослідження є метод та кіберфізична система моніторингу якості сну.*

*Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу моніторингу якості сну, зокрема, вимірювання індексу фрагментації сну за добу, тривалості сну за добу, тривалості глибокого сну, тривалості легкого сну, частоти серцевих скорочень уві сні, варіабельності серцевого ритму уві сні, насичення крові киснем уві сні, частоти дихання уві сні.*

Науково-методологічний апарат дослідження базується на засадах системного аналізу, зокрема принципах декомпозиції та ієрархічності, а також на фундаментальних положеннях загальної теорії систем. Для розв'язання задач застосовано апарат теорії моделювання процесів, теоретико-множинний підхід та методи концептуального проєктування, що доповнюються використанням евристичного оцінювання, принципів побудови баз знань та механізмів логічного виведення.

*Наукова новизна отриманих результатів:* розроблено метод моніторингу якості сну, що відрізняється від існуючих аналогів поєднанням об'єктивних даних з носимих пристроїв із суб'єктивними показниками клінічних опитувальників PSQI та BDI-II та забезпечує оперативне реагування на виявлені порушення,

автоматизований зв'язок між пацієнтом та його сімейним лікарем у разі фіксації проблем, що можуть вказувати на депресію, апное або серцево-судинні ризики.

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу якості сну, яка дозволяє не лише збирати щоденні параметри, а й верифікувати дані пацієнта через медичні системи, забезпечуючи підвантаження актуальної електронної медичної картки.

У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну. У розділі 2 здійснений вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну. У розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблені метод та алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну. У розділі 4 спроектовано кіберфізичну систему моніторингу якості сну.

## ЗМІСТ

Вступ	4
1 Аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну .....	9
1.1 Відомі кіберфізичні системи моніторингу якості сну .....	9
1.2 Параметри моніторингу якості сну.....	19
1.3 Висновки. Постановка задачі .....	22
2 Вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну .....	25
2.1 Формування вимог предметної галузі.....	25
2.2 Порівняльний аналіз носимих пристроїв для моніторингу якості сну .....	28
2.3 Середній рівень кіберфізичної системи моніторингу якості сну .....	32
2.4 Висновки .....	40
3 Метод та алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну .....	41
3.1 Метод моніторингу якості сну .....	41
3.2 Алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну ..	48
3.3 Висновки .....	54
4 Кіберфізична система моніторингу якості сну .....	56
4.1 Кіберфізична система моніторингу якості сну .....	56
4.2 Приклади функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну .....	62
4.3 Висновки .....	78
Висновки .....	81
Перелік джерел посилань .....	86
Додаток А.....	97
Додаток Б.....	113

## ВСТУП

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 ІТ-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 актуальними 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.

*Метою кваліфікаційної роботи* є автоматизація процесу моніторингу якості сну, зокрема, вимірювання індексу фрагментації сну за добу, тривалості сну за добу, тривалості глибокого сну, тривалості легкого сну, частоти серцевих скорочень уві сні, варіабельності серцевого ритму уві сні, насичення крові киснем уві сні, частоти дихання уві сні.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну;
- 2) вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- 3) розроблення методу та алгоритму функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- 4) розроблення архітектури кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну.

*Об'єктом дослідження* є процес автоматизації моніторингу якості сну.

*Предметом дослідження* є метод та кіберфізична система моніторингу якості сну.

*Наукова новизна отриманих результатів:* розроблено метод моніторингу якості сну, що відрізняється від існуючих аналогів поєднанням об'єктивних даних з носимих пристроїв із суб'єктивними показниками клінічних опитувальників PSQI та BDI-II та забезпечує оперативне реагування на виявлені порушення, автоматизований зв'язок між пацієнтом та його сімейним лікарем у разі фіксації проблем, що можуть вказувати на депресію, апное або серцево-судинні ризики.

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу якості сну, яка дозволяє не лише збирати щоденні параметри, а й верифікувати дані пацієнта через медичні системи, забезпечуючи підвантаження актуальної електронної медичної картки.

*Методи дослідження.* Науково-методологічний апарат дослідження базується на засадах системного аналізу, зокрема принципах декомпозиції та ієрархічності, а також на фундаментальних положеннях загальної теорії систем. Для розв'язання задач застосовано апарат теорії моделювання процесів, теоретико-множинний підхід та методи концептуального проектування, що доповнюються використанням евристичного оцінювання, принципів побудови баз знань та механізмів логічного виведення.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

1) Говорущенко Т.О., Роюк Р.В., Питляк М.С., Говорущенко О.О. Метод моніторингу якості сну. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2026. №1. С. \_\_\_\_\_.

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

## 1.1 Відомі кіберфізичні системи 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 Vi-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'єктно-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 розряджання акумуляторів.

Моніторинг дихання в режимі реального часу є ключовим для оцінки розладів, пов'язаних зі сном, проте звичайні одноmodalьні датчики стикаються з критичними обмеженнями в надійності в складних фізіологічних умовах. У роботі [16] представлено біоміметичну двоmodalьну платформу, що поєднує чутливий до тиску аерогель (TCMA) та чутливу до вологості плівку (TCMF), обидві виготовлені з нановолокон целюлози, окислених методом TEMPO (TOCNF), та композитів MXene. 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 неспанья, частота серцевих скорочень) та самооцінка якості сну (Піттсбурзький 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 пропрієтарних 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 (Піттсбурзький 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 Піттсбурзького 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  $\alpha$ -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 надширокосмутового (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 простирадло 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. Простирадло 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 ємнісних 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 ємнісний 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 підкреслив 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 вмiло фіксує довгострокові часові залежності 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.

Дослідження пропонують використання портативної електроенцефалографії (ЕЕГ) для домашнього скринінгу розладів сну та оцінки когнітивного здоров'я [26], а також впровадження мобільних систем на базі Android, що використовують акселерометри смартфонів для актиграфічного аналізу станів спокою та активності [27]. Значна увага приділяється інтелектуальній обробці сигналів, зокрема застосуванню алгоритмів глибокого навчання та згорткових нейронних мереж (CNN) для автоматичної класифікації стадій сну на основі одноканальної ЕЕГ [28, 29] або електрокардіографії [30]. Окремий напрям становлять носимі пристрої, такі як смарт-годинники та кільця, що аналізують вплив зовнішніх факторів, наприклад, свербіж при дерматологічних захворюваннях, на архітектуру сну [31], а також спеціалізовані системи моніторингу на основі Інтернету речей (IoT) для виявлення епізодів апное та нічних нападів [32, 33]. Розглядаються також методи неінвазивної балістокардіографії

для оцінки життєвих показників без прямого контакту зі шкірою [34] та інтеграція екологічно стійких рішень у розумні середовища житла для комплексного спостереження за добробутом користувача [35].

Використання споживчих носимих пристроїв (смарт-годинників та кільця Oura) розглядається як доступний метод оцінки об'єктивних параметрів сну в контексті ментального здоров'я та великого депресивного розладу [36, 37], а також для виявлення специфічних симптомів, таких як нічне занепокоєння у пацієнтів із хворобою Альцгеймера [38]. Для підвищення точності діагностики пропонуються інтелектуальні системи на базі глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі для автоматичного стадіювання сну на основі сигналів ЕЕГ [39-41] та мультимодальні платформи, що використовують методи злиття даних для виявлення апное сну в реальному часі [42]. Окремий технологічний напрям складають безконтактні та саможивні рішення, такі як трибоелектричні наногенератори (TENG) у формі гнучких сенсорів для моніторингу дихання та рухів без батарей [43], а також системи пасивного спостереження за допомогою сенсорів навколишнього середовища в концепції «Розумного дому» [44]. Крім того, розробляються масштабовані хмарні інфраструктури для аналізу великих даних, що дозволяють обробляти тривалі записи фізіологічних сигналів для популяційних досліджень якості сну [45].

Дослідження пропонують використання систем «Розумного будинку» та Інтернету речей (IoT) для оптимізації параметрів приміщень з метою покращення сну [46], а також застосування мобільних технологій для довготривалого відстеження структури відпочинку та фіксації нападів у пацієнтів з епілепсією [47]. У клінічній практиці розглядаються методи суб'єктивної оцінки сну медичним персоналом для підвищення ефективності лікування [48], тоді як технічні розробки зосереджені на створенні гнучких трибоелектричних наногенераторів для безконтактного та саможивного моніторингу дихання та рухів тіла [49]. Окрему увагу приділено алгоритмам автоматизації, зокрема використанню згорткових нейронних мереж для стадіювання сну на основі одноканальної ЕЕГ [50] та застосуванню методів машинного навчання для аналізу актиграфічних даних [51]. Також вивчаються

можливості інтегрованих систем для глибокого аналізу фізіологічних сигналів [52] та використання комерційних носимих пристроїв для об'єктивної оцінки параметрів сну в амбулаторних умовах [53].

Дослідники пропонують використання алгоритмів машинного навчання, зокрема нейронних мереж та методів опорних векторів, для автоматичного стадіювання сну на основі одноканальної ЕЕГ [54, 55] та аналізу серцевого ритму в реальному часі [56]. Розглядаються рішення на базі Інтернету речей (IoT), що використовують хмарні обчислення для обробки даних з акселерометрів та пульсометрів [57], а також специфічні методи неінвазивної оцінки станів сну за допомогою аналізу варіабельності серцевого ритму та дихальних патернів [58, 59]. Технологічний розвиток сенсорики представлений розробкою гнучких текстильних датчиків тиску для безконтактного моніторингу рухів тіла та пози під час сну [60]. В клінічному аспекті значна увага приділяється зв'язку між якістю нічного відпочинку та гемодинамічними показниками, зокрема нічною артеріальною гіпертензією [61], а також ролі полісомнографії у виявленні коморбідних розладів, таких як депресія та апное [62]. Окремий напрям досліджень присвячений валідації комерційних носимих пристроїв для моніторингу сну в елітних спортсменів, що дозволяє оцінювати ефективність відновлення поза межами лабораторій [63].

Дослідники пропонують системи на базі Інтернету речей (IoT), які використовують алгоритми машинного навчання для виявлення розладів сну та класифікації стадій на основі даних акселерометрії та частоти серцевих скорочень [64, 65]. Технологічні інновації включають розробку безконтактних рішень, таких як радіочастотні сенсори для відстеження дихання та рухів без втручання в особистий простір [66], а також гнучких носимих датчиків тиску на основі полімерних композитів для довготривалого моніторингу фізіологічних показників [67]. Клінічні дослідження підкреслюють важливість біомаркерів, зокрема варіабельності серцевого ритму та рівнів специфічних протеїнів, як індикаторів якості сну та ризику коморбідних станів [68-70]. Розглядаються також методи неінвазивної балістокардіографії та інтелектуальні алгоритми аналізу звукових сигналів для ідентифікації хропіння та апное [71, 72]. Впровадження таких мультимодальних

систем дозволяє об'єктивізувати оцінку сну та забезпечити ранню діагностику патологій у позалікарняних умовах.

Дослідники пропонують інтелектуальні системи на базі хмарних обчислень та мобільних застосунків для дистанційного аналізу якості сну [73], а також автоматизовані методи стадіювання сну за допомогою алгоритмів машинного навчання, що обробляють сигнали ЕЕГ та електрокардіографії [74-77]. Особлива увага приділена безконтактним та неінвазивним методам, зокрема використанню балістокардіографії для оцінки серцево-дихальної активності без прикріплення датчиків до тіла [78, 79] та застосуванню камер глибини (Kinect) для аналізу пози і рухів тіла під час сну [80]. В клінічному контексті розглядаються цифрові інструменти для довготривалого моніторингу пацієнтів з епілепсією з метою фіксації нічних нападів [81], а також вивчається вплив технологій безперервного моніторингу глюкози на архітектуру сну та глікемічний контроль у пацієнтів з діабетом [82]. Ці рішення інтегрують сучасні сенсори та методи обробки великих даних для створення персоналізованих систем управління здоров'ям.

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-радары, розумні ліжка з балістокардіографією або сенсорні простирадла. Використання глибокого навчання, зокрема мереж Ві-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 фонового шуму 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 пропрієтарний 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.

## 1.2 Параметри моніторингу якості сну

Аналіз параметрів моніторингу якості сну в межах сучасних кіберфізичних систем базується на комплексному поєднанні фізіологічних показників, які відображають стан нервової, серцево-судинної та дихальної систем організму. Основним критерієм стабільності нічного відпочинку є індекс фрагментації сну, що розраховується як відсоткове співвідношення мікропробуджень та переходів між стадіями до загального часу в ліжку. Нормальне значення цього показника не має перевищувати 25%, тоді як зростання понад цю межу свідчить про наявність депресивних станів, хронічного стресу або специфічних розладів, таких як апное чи

синдром неспокійних ніг. Висока фрагментація безпосередньо корелює з відчуттям розбитості та зниженням когнітивної ефективності протягом наступного дня [83].

Загальна тривалість сну за добу є базовим параметром, який для здорової дорослої людини має становити від 7 до 9 годин. Відхилення від цієї норми в бік дефіциту, тобто менше 6 годин, суттєво підвищує ризики розвитку артеріальної гіпертензії та тривожних розладів. Водночас надмірна тривалість відпочинку, що перевищує 10 годин на добу, часто є індикатором гіперсомнії, яка супроводжує клінічну депресію, системні запальні процеси або цукровий діабет. Таким чином, часовий чинник виступає первинним маркером для формування індивідуальної моделі ризику в інтелектуальних системах моніторингу [84].

Архітектура сну поділяється на фази глибокого та легкого відпочинку, кожна з яких виконує специфічні відновлювальні функції в організмі. Глибокий сон має займати від 15% до 25% загального часу, оскільки саме в цей період відбувається активна регенерація тканин, зміцнення імунітету та консолідація довготривалої пам'яті. Зниження частки глибокої фази нижче 15% призводить до накопичення хронічної втоми та сповільнення фізичного відновлення, що є критичним для пацієнтів у реабілітаційній практиці. Натомість фаза легкого сну в нормі становить 50–60%, а її надлишок понад 60% свідчить про поверхневий характер відпочинку та часті реакції на зовнішні подразники [85].

Важливим параметром є тривалість фаз неспання після початкового засинання, яка в ідеальних умовах не повинна перевищувати 20–30 хвилин за ніч. Збільшення цього показника до 40–60 хвилин або поява частих тривалих епізодів неспання вказує на розвиток інсомнії або гіперзбудливість центральної нервової системи. Такі порушення часто супроводжуються неможливістю повторного засинання, що є надійним діагностичним маркером депресивних розладів. Моніторинг цих пауз дозволяє фахівцям коригувати терапевтичні плани на основі об'єктивного графіку активності пацієнта.

Частота серцевих скорочень у стані спокою під час сну служить індикатором роботи вегетативної нервової системи. Референтні значення для дорослої людини зазвичай знаходяться в межах 40–60 ударів на хвилину, залежно від рівня фізичної

тренуваності. Перевищення межі у 60 ударів на хвилину в нічний час може сигналізувати про вегетативну дисфункцію, серцеву недостатність або приховані інфекційні процеси в організмі. Стабільний пульс є ознакою глибокого релаксу, тоді як його нерегулярність потребує додаткового аналізу за допомогою методів варіабельності серцевого ритму.

Варіабельність серцевого ритму, що оцінюється через показник *RMSSD*, вважається «золотим стандартом» моніторингу активності парасимпатичної системи. Високі значення *RMSSD*, зазвичай понад 40 мілісекунд, вказують на добру здатність організму до відновлення та високу стресостійкість. Навпаки, низька варіабельність або монотонний ритм є ознакою хронічної перевтоми, глибокого стресу та підвищеного ризику раптових серцево-судинних ускладнень. Цей біомаркер дозволяє виявити ранні ознаки погіршення стану ще до появи видимих клінічних симптомів [86].

Насичення крові киснем під час сну є критичним показником для виявлення дихальних порушень. У нормі цей параметр має коливатися в межах 95–100%, забезпечуючи повноцінну оксигенацію тканин головного мозку та серця. Падіння рівня сатурації нижче 95%, відоме як десатурація, найчастіше вказує на наявність обструктивного апное сну або гіпоксії. Такі епізоди кисневого голодування суттєво перевантажують серцево-судинну систему та є фактором ризику для виникнення нічної артеріальної гіпертензії [87].

Частота дихання у стані спокою має бути стабільною та становити від 12 до 20 циклів за хвилину. Зниження частоти дихання менше 12 циклів може бути ознакою дихальної недостатності або серцевої декомпенсації. З іншого боку, прискорене дихання понад 20 циклів на хвилину уві сні часто супроводжує панічні атаки або високий рівень психоемоційного напруження пацієнта. Вимірювання цього показника носимими пристроями базується на аналізі респіраторної синусової аритмії, що дозволяє неінвазивно відстежувати стан легень.

Додатковими параметрами, що зчитуються гнучкими сенсорами, є шкірна провідність та температура поверхні тіла. Низька стабільна активність шкірної провідності свідчить про спокійний сон, тоді як різкі піки вказують на нічні жахи

або больові синдроми. Температура шкіри в нормі має залишатися стабільною в межах 33–35°C з характерним нічним падінням, а будь-які відхилення понад один градус від базової лінії можуть свідчити про початок запального процесу або порушення терморегуляції. Ці показники доповнюють загальну картину сомнологічного профілю пацієнта.

Завершальним етапом моніторингу є інтеграція об'єктивних даних із результатами суб'єктивних опитувальників, таких як Піттсбурзький індекс якості сну (PSQI) та шкала депресії Бека-II (BDI-II). Сумарний бал PSQI понад 5 свідчить про загальне незадоволення якістю сну, а показник BDI-II вище 14 балів вказує на ймовірну депресію, що супроводжується змінами в архітектурі відпочинку. Тільки поєднання всіх вищезгаданих фізіологічних параметрів із психометричними інструментами дозволяє створити цілісну матрицю тижневої динаміки для точної оцінки стану здоров'я [88].

Таким чином, інтегрований моніторинг вищезазначених параметрів за допомогою кіберфізичних систем дозволяє трансформувати суб'єктивні відчуття пацієнта у структуровану матрицю об'єктивних біометричних даних. Поєднання динамічних показників, таких як фрагментація сну, варіабельність серцевого ритму *RMSSD* та рівень кисневої сатурації, із валідованими клінічними індексами PSQI та BDI-II створює надійну базу для раннього виявлення соматичних та психоемоційних розладів. Такий превентивний підхід не лише забезпечує безперервний зворотний зв'язок між користувачем та лікарем, а й дозволяє персоналізувати реабілітаційні стратегії, мінімізуючи ризики розвитку серцево-судинних ускладнень та суттєво підвищуючи загальну ефективність медичного супроводу в домашніх умовах.

### 1.3 Висновки. Постановка задачі

Актуальність розробки методів та кіберфізичних систем моніторингу якості сну зумовлена стрімким зростанням кількості коморбідних розладів, спричинених хронічним стресом та порушенням циркадних ритмів у сучасному суспільстві.

Недостатній сон чинить руйнівний вплив на фізичне, психічне та емоційне благополуччя людини, суттєво підвищуючи ризик розвитку серцево-судинних захворювань, високого кров'яного тиску, інсулінорезистентності та системних запалень. Оскільки під час глибоких фаз відпочинку відбуваються критично важливі процеси регенерації тканин, синтезу білків та зміцнення імунітету, якість сну стає фундаментальним показником загального стану здоров'я та базовим ресурсом для довголіття.

Особливого значення моніторинг сну набуває через його прямий вплив на когнітивні функції мозку, здатність до концентрації уваги та швидкість прийняття рішень. Повноцінний нічний відпочинок виступає природним нейропротектором, забезпечуючи очищення мозку від метаболічних відходів, що в довгостроковій перспективі знижує ризик розвитку нейродегенеративних захворювань. Водночас порушення структури сну негативно відбивається на психоемоційній стабільності та гормональному фоні, зокрема на балансі лептину та греліну, що може призводити до порушень обміну речовин та набору зайвої ваги.

Впровадження сучасних кіберфізичних систем дозволяє трансформувати процес спостереження з епізодичного на постійний, забезпечуючи збір об'єктивних даних у природному для людини середовищі. Використання носимих сенсорних пристроїв, таких як фітнес-браслети та смарт-годинники, дає змогу неінвазивно фіксувати ранні ознаки погіршення стану здоров'я, що відкриває нові перспективи для оцінювання динаміки лікування та раннього виявлення захворювань. 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 діагностики апное або неврологічних порушень.

Для пацієнтів, які проходять курс фізичної реабілітації або відновлюються після травм, якість сну є ключовим фактором регенерації рухових функцій та м'язової координації. Саме в нічний час відбувається активний викид соматотропіну, який прискорює загоєння мікротравм, тому об'єктивний моніторинг стає невід'ємною частиною ефективного терапевтичного плану. Поєднання інтелектуальних алгоритмів із засобами реабілітації створює

персоналізованих асистентів здоров'я, здатних адаптувати плани лікування на основі реальних показників організму.

Створення високоефективних систем моніторингу є стратегічним завданням для сучасної медицини, оскільки дозволяє перейти від реактивної моделі лікування до превентивної. Раннє розпізнавання проблем зі здоров'ям відіграє ключову роль у зменшенні ризику летальних наслідків та підвищенні ефективності терапевтичних заходів. Автоматизація збору й первинного аналізу даних допомагає частково компенсувати дефіцит фахівців, скорочуючи час реагування на критичні зміни стану пацієнта та покращуючи загальну якість медичної допомоги.

*Метою кваліфікаційної роботи* є автоматизація процесу моніторингу якості сну, зокрема, вимірювання індексу фрагментації сну за добу, тривалості сну за добу, тривалості глибокого сну, тривалості легкого сну, частоти серцевих скорочень уві сні, варіабельності серцевого ритму уві сні, насичення крові киснем уві сні, частоти дихання уві сні.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну;
- 2) вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- 3) розроблення методу та алгоритму функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- 4) розроблення архітектури кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну.

*Об'єктом дослідження* є процес автоматизації моніторингу якості сну.

*Предметом дослідження* є метод та кіберфізична система моніторингу якості сну.

## 2 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

### 2.1 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 2.1.

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.

Таблиця 2.1 – 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

Продовження таблиці 2.1

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, гіперзбудливість 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

Кінець таблиці 2.1

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 (RR)	12–20 циклів за хвилину	Менше 12 або понад 20	Дихальна недостатність, серцева декомпенсація, панічні атаки (уві сні)

## 2.2 Порівняльний аналіз носимих пристроїв для моніторингу якості 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.

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 ременями); 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 неспанння (гаджети часто недооцінюють кількість коротких пробуджень (менше 1–2 хвилин), 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 2.2.

Таблиця 2.2 – 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.

Кінець таблиці 2.2

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 лежите 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  $SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{загальний час сну}} \cdot 100\%$ ; тривалість сну за добу  $SD$

(години); глибокий сон *DS* (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://cbt-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.

### 2.3 Середній рівень кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Для побудови середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу якості сну необхідно обрати апаратно-програмну платформу, яка виступатиме інтелектуальним шлюзом між носимими пристроями та хмарними сервісами аналітики. Цей рівень відповідає за агрегацію біометричних даних та їх первинну фільтрацію.

Тому формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу якості сну є критично важливим етапом, оскільки цей рівень відповідає за агрегацію даних з носимих пристроїв, їх первинну обробку (фільтрацію шумів) та передачу у хмарне середовище для глибокої аналітики. Кіберфізична система має обробляти мультимодальні сигнали, такі як *SFI*, *SD*, *DS*, *LS*, *HR*, *RMSSD*, *BOS* та *RR*.

Для забезпечення стабільної роботи кіберфізичної системи моніторингу якості сну в домашніх умовах необхідно обрати контролер, який володіє достатньою обчислювальною потужністю для алгоритмів попередньої обробки даних та інтегрованими модулями бездротового зв'язку.

Порівняльний аналіз контролерів для середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу якості сну наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз контролерів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Параметр	ESP32-S3	Raspberry Pi 4	Arduino Nano 33 IoT
Процесор	Двоядерний 240 МГц	Чотириядерний 1.5 ГГц	Одноядерний 48 МГц
Енергоспоживання	Низьке (Sleep modes)	Високе	Дуже низьке
Пам'ять (RAM)	512 КБ + PSRAM	2–8 ГБ	32 КБ
Зв'язок	Wi-Fi, Bluetooth 5 (LE)	Wi-Fi, BT 5.0, Ethernet	Wi-Fi, Bluetooth
Обробка даних	Придатний для DSP та ML	Висока (Linux OS)	Мінімальна (тільки збір)
Вартість	Доступна	Висока	Середня
Обчислювальна потужність	Середня	Висока	Низька

Для реалізації мобільного та енергоефективного рішення найкращим вибором є ESP32-S3. Цей контролер має двоядерний процесор Xtensa® LX7 із частотою до 240 МГц, що дозволяє розділити задачі: одне ядро відповідає за підтримку протоколів зв'язку, а інше – за математичну обробку біометричних сигналів у реальному часі. Наявність апаратної підтримки векторних інструкцій прискорює роботу нейромережових алгоритмів, що актуально для стадіювання сну безпосередньо «на периферії» (edge computing). Вибір ESP32-S3 обґрунтовується балансом між продуктивністю та енергоефективністю, що дозволяє системі працювати безперервно протягом усієї ночі, не створюючи надмірного теплового випромінювання.

Контролер ESP32-S3 (рис. 2.1) підтримує режими глибокого сну, що критично для безперервного нічного моніторингу. Наявність вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth 5 (LE) дозволяє збирати дані з носимих пристроїв та передавати їх у хмару без додаткових компонентів. Наявність векторних інструкцій прискорює обчислення таких параметрів, як *RMSSD* та *RR*.

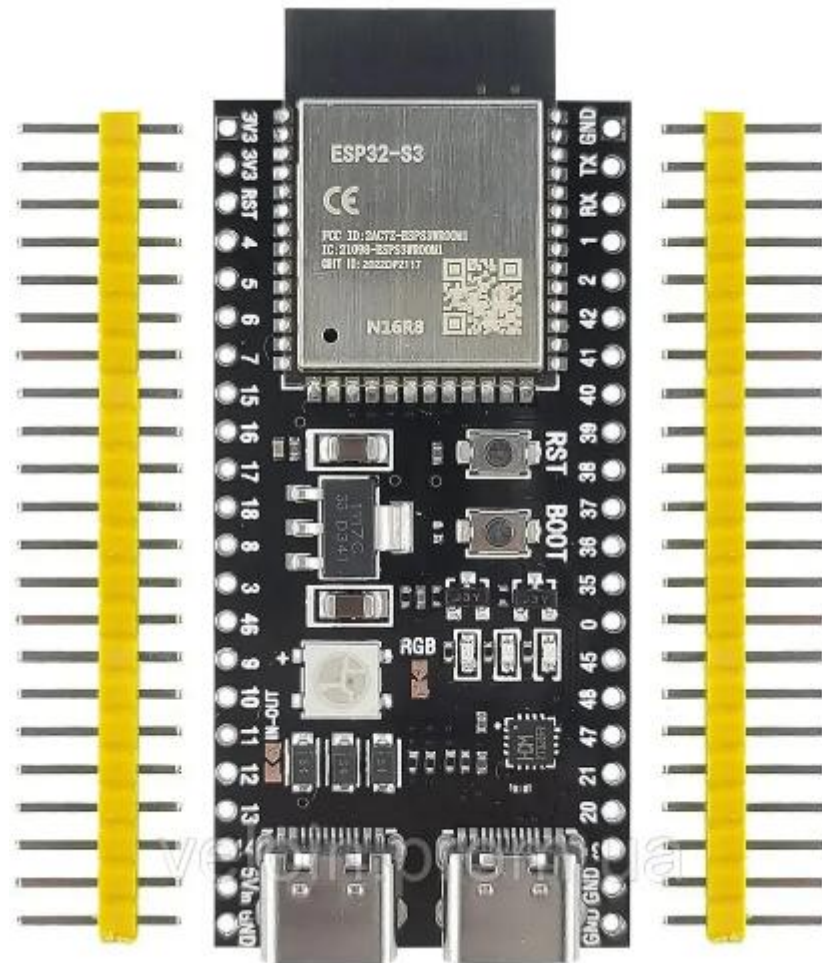


Рис. 2.1 – Контролер ESP32-S3

Контролер ESP32-S3 являє собою високоефективне рішення на базі архітектури Xtensa® LX7, що спеціально розроблене для складних завдань у галузі штучного інтелекту та інтернету речей. Головною особливістю цього мікроконтролера є наявність двох ядер, які здатні працювати на частоті до 240 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для паралельної обробки декількох потоків даних. Завдяки вбудованій апаратній підтримці векторних

інструкцій, ESP32-S3 демонструє значну перевагу в задачах цифрової обробки сигналів та прискоренні роботи нейронних мереж, що робить його ідеальним кандидатом для аналізу фізіологічних показників сну безпосередньо на периферійному пристрої.

Важливою перевагою цього контролера є його розширена комунікаційна здатність, що включає інтегровані модулі Wi-Fi 4 та Bluetooth 5 (LE) з підтримкою Mesh-мереж. Це дозволяє пристрою не лише підтримувати стабільне з'єднання з хмарними сервісами через бездротові мережі, але й ефективно взаємодіяти з великою кількістю периферійних датчиків при мінімальному енергоспоживанні. Наявність підтримки Bluetooth Long Range та високої швидкості передачі даних забезпечує надійне охоплення в межах домашнього середовища пацієнта, гарантуючи безперервність збору біометричної інформації навіть у складних умовах проходження сигналу.

Безпека даних у медичних системах є критичним фактором, і ESP32-S3 пропонує комплексний набір апаратних засобів захисту для забезпечення конфіденційності інформації. Контролер оснащений вбудованими алгоритмами шифрування AES, SHA та RSA, а також має виділений блок для безпечного завантаження прошивки та захищеного зберігання ключів у пам'яті OTP. Такі можливості дозволяють розробникам реалізовувати протоколи передачі даних з повним шифруванням, що повністю відповідає вимогам захисту персональних медичних даних при їх відправці до зовнішніх баз даних або медичних інформаційних систем.

Гнучкість налаштування периферійних інтерфейсів ESP32-S3 дозволяє легко інтегрувати його з різноманітними сенсорами через порти GPIO, SPI, I2C, I2S та UART, що значно розширює функціональність кінцевого пристрою. Завдяки наявності 45 програмованих контактів та підтримці великого обсягу зовнішньої флеш-пам'яті та PSRAM, розробник може створювати складні програмні додатки з великими буферами даних для накопичення тижневих матриць показників. Це забезпечує автономність системи у разі тимчасової відсутності зв'язку з сервером,

оскільки контролер здатний локально зберігати та обробляти значні масиви інформації до моменту відновлення мережевого з'єднання.

Екосистема розробки для цього контролера базується на потужному фреймворку ESP-IDF, який надає розробникам доступ до широкого спектру бібліотек для керування живленням, роботою мереж та математичними обчисленнями. Підтримка популярних середовищ програмування та наявність готових компонентів для інтеграції з MQTT-брокерами суттєво скорочує час виходу продукту на ринок. Завдяки високій надійності, низькій вартості та постійним оновленням безпеки, ESP32-S3 залишається одним із найбільш затребуваних рішень для створення сучасних кіберфізичних систем, де поєднуються вимоги до компактності, продуктивності та стабільності зв'язку.

Для передачі даних від носимих пристроїв (нижній рівень) до контролера (середній рівень) та від контролера до хмари (верхній рівень) необхідно використовувати комбінований підхід. Основним протоколом для збору даних з фітнес-браслетів та розумних годинників є Bluetooth Low Energy (BLE), оскільки він забезпечує мінімальне навантаження на акумулятор носимого гаджета.

Стандарт Bluetooth Low Energy (BLE), також відомий як Bluetooth Smart, є технологією бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням, спеціально розробленою для пристроїв інтернету речей та медичних гаджетів. На відміну від класичного Bluetooth, BLE оптимізовано для передачі невеликих обсягів даних через певні інтервали часу, що дозволяє носимим сенсорам працювати від однієї мініатюрної батареї протягом багатьох місяців або навіть років. У контексті моніторингу сну цей протокол забезпечує енергоефективний збір біометричних сигналів, таких як частота серцевих скорочень та рівень кисню, мінімізуючи навантаження на акумулятор фітнес-браслета під час тривалого нічного спостереження.

Технічна архітектура BLE базується на стеку протоколів, який включає профілі загального доступу (GAP) та загальні профілі атрибутів (GATT), що визначають спосіб ієрархічної організації та обміну інформацією між пристроями. Використання моделі «клієнт-сервер» дозволяє центральному вузлу, наприклад

контролеру ESP32, ефективно виявляти периферійні сенсори та зчитувати значення конкретних характеристик, як-от інтервали RR для аналізу варіабельності серцевого ритму. Завдяки підтримці адаптивного перескоку частоти, стандарт демонструє високу стійкість до перешкод у насиченому радіоефірі домашнього середовища, гарантуючи цілісність передачі критично важливих медичних даних.

Сучасні ітерації стандарту, починаючи з версії 5.0, пропонують значне розширення радіуса дії та пропускної здатності, що дозволяє реалізовувати складні кіберфізичні системи з високим рівнем автономності. BLE забезпечує надійне шифрування каналу зв'язку, що є критично важливим для захисту конфіденційності пацієнта при передачі даних з носимого пристрою до мобільного застосунку або шлюзу. Можливість швидкого встановлення з'єднання та передачі коротких пакетів даних робить цей стандарт ідеальним інструментом для безперервного моніторингу фізіологічних параметрів, забезпечуючи точне відстеження динаміки якості сну без втручання в особистий простір користувача.

Порівняльний аналіз протоколів передачі даних у хмару у кіберфізичній системі моніторингу якості сну наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняльний аналіз протоколів передачі даних у хмару у кіберфізичній системі моніторингу якості сну

Протокол	Накладні витрати	Енергоефективність	Надійність (QoS)	Сфера застосування
MQTT	Мінімальні	Висока	Так (3 рівні)	Телеметрія, медицина
HTTP (REST)	Високі	Середня	Ні	Веб-сервіси
CoAP	Мінімальні	Дуже висока	Так	Датчики з низькою потужністю
WebSocket	Середні	Середня	Так	Потокові дані

Для передачі показників у хмару найбільш доцільним є протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT працює поверх TCP/IP і розроблений спеціально для IoT-систем з обмеженими ресурсами. MQTT є стандартом для медичних IoT-систем завдяки своїй легкості та надійності. Він використовує модель «видавець-передплатник», що дозволяє системі миттєво доставляти повідомлення про критичні відхилення сімейному лікарю. Вибір MQTT дозволяє реалізувати замкнений цикл зворотного зв'язку. У разі фіксації проблем, система через MQTT-брокер ініціює сповіщення в мобільних застосунках пацієнта та лікаря, забезпечуючи оперативне реагування.

Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) є полегшеним мережевим протоколом прикладного рівня, що працює поверх стека TCP/IP і спеціально оптимізований для обміну даними між пристроями з обмеженими ресурсами в мережах з низькою пропускнуою здатністю. Його функціонування базується на моделі «видавець-передплатник», де центральний вузол, званий брокером, координує розподіл повідомлень між клієнтами, що дозволяє значно знизити навантаження на канали зв'язку порівняно з традиційною моделлю запит-відповідь. У контексті моніторингу сну цей протокол забезпечує ефективну передачу агрегованих матриць показників від контролера ESP32 до медичної хмари, споживаючи мінімальну кількість енергії та мережевого трафіку.

Однією з ключових переваг MQTT є наявність трьох рівнів якості обслуговування (QoS), які гарантують доставку критично важливих медичних даних навіть у нестабільних мережах. Перший рівень забезпечує доставку повідомлення хоча б один раз, а другий рівень гарантує отримання копії повідомлення строго один раз, що є критичним для точного формування тижневої динаміки сну без втрати чи дублювання параметрів. Завдяки компактному бінарному формату заголовків повідомлень, протокол мінімізує обсяг службової інформації, дозволяючи системі миттєво передавати Push-повідомлення про небезпечні відхилення фізіологічних показників, таких як десатурація або порушення дихання, на смартфони пацієнта та лікаря.

Інтеграція MQTT у кіберфізичну систему моніторингу якості сну дозволяє створити замкнений цикл зворотного зв'язку, де дані з носимих пристроїв оперативно оновлюються в електронній медичній картці пацієнта. Протокол підтримує шифрування TLS, що гарантує високий рівень конфіденційності при передачі біометричних сигналів через публічні мережі Інтернет. Завдяки можливості утримання постійного з'єднання з мінімальним споживанням ресурсів, MQTT стає ідеальним рішенням для тривалого нічного спостереження, перетворюючи розрізнені показники сенсорів на структурований потік інформації для превентивної діагностики та персоналізованої реабілітації.

Середній рівень системи також виконує функцію шлюзу для верифікації даних у системі medics.ua. Контролер ESP32 через захищене TLS-з'єднання забезпечує автентифікацію пацієнта та підвантаження його електронної медичної картки. Це дозволяє системі порівнювати поточні показники з попереднім анамнезом пацієнта, що підвищує точність діагностичного висновку.

Така конфігурація середнього рівня кіберфізичної системи забезпечує високу швидкість обробки даних та конфіденційність медичної інформації, що відповідає сучасним вимогам до медичних IoT-систем. Використання апаратного шифрування в ESP32 гарантує захист біометричних сигналів при передачі в хмару.

На середньому рівні ESP32-S3 формує матрицю тижневої динаміки. Це дозволяє уникнути перевантаження хмарного сервера сирими даними та підвищує конфіденційність, оскільки частина обробки відбувається локально. Контролер також відповідає за TLS-шифрування при передачі даних до системи medics.ua, що гарантує захист медичної інформації пацієнта.

Така структура середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу якості сну забезпечує високу швидкість реагування на проблеми зі сном та дозволяє системі стабільно функціонувати навіть при короткочасних розривах інтернет-з'єднання, накопичуючи дані у внутрішній пам'яті PSRAM.

## 2.4 Висновки

Отже, в розділі проведено комплексне обґрунтування вибору апаратних та програмних засобів для реалізації кіберфізичної системи моніторингу якості сну. Основна увага приділена формуванню вимог предметної галузі, де визначено критичну роль поєднання об'єктивних фізіологічних показників, таких як індекс фрагментації, варіабельність серцевого ритму та частота дихання, із суб'єктивними клінічними індексами PSQI та BDI-II. Такий мультимодальний підхід дозволяє системі не лише фіксувати тривалість відпочинку, а й ідентифікувати ранні ознаки депресивних станів, апное та серцево-судинних ризиків, що є фундаментальним для превентивної медицини та ефективної реабілітації пацієнтів.

Обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32-S3 як ключового елемента середнього рівня системи, що виконує функції інтелектуального шлюзу. Завдяки наявності двоядерного процесора з апаратним прискоренням алгоритмів штучного інтелекту та інтегрованим модулям бездротового зв'язку, обраний контролер забезпечує ефективну обробку даних на периферії (edge computing). Це дозволяє локально формувати тижневу матрицю динаміки, що суттєво знижує навантаження на хмарні сервіси, підвищує швидкість реагування системи на критичні відхилення та гарантує автономність моніторингу навіть при тимчасовій відсутності інтернет-з'єднання.

Особливу увагу приділено вибору протоколів передачі даних, де для взаємодії між носимими пристроями та шлюзом обрано стандарт Bluetooth Low Energy (BLE) через його високу енергоефективність. Для передачі агрегованої інформації у хмарне сховище визначено доцільність використання протоколу MQTT, який завдяки легкій архітектурі та механізмам контролю якості обслуговування (QoS) гарантує надійну доставку телеметричних даних. Така комбінація технологій забезпечує стабільний зв'язок у реальному часі, що є необхідним для функціонування замкненого циклу зворотного зв'язку між пацієнтом та медичною інформаційною системою.

### 3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

#### 3.1 Метод моніторингу якості сну

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

добу  $SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{загальний час сну}} \cdot 100\%$ ; тривалість сну за добу  $SD$

(години); глибокий сон  $DS$  (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).

Крім вищеповисаних базових показників, зібраних з фітнес-браслета та/або смарт-годинника, розроблювана кіберфізична система моніторингу якості сну буде використовувати 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://cbt-therapist.net/BDI>).

Кіберфізична система моніторингу якості сну 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.

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;

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

7) накопичення показників за тиждень: динаміка тижневої якості сну  $WSQD$  – матриця розміром  $7 \times 8$ , 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  $7 \times 8$ , 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  $7 \leq wsqd[i,2] (i=1..7) \leq 9$  та  $15 \leq wsqd[i,3] (i=1..7) \leq 25$  та  $50 \leq wsqd[i,4] (i=1..7) \leq 60$  та  $40 \leq wsqd[i,5] (i=1..7) \leq 60$  та  $wsqd[i,6] (i=1..7) \geq 40$  та  $wsqd[i,7] (i=1..7) \geq 95$  та  $12 \leq wsqd[i,8] (i=1..7) \leq 20$  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  $wsqd[i,2] (i=1..7) \leq 6$ , то в пацієнта є проблеми з дефіцитом тривалості сну, що можуть вказувати на тривожність, ризик серцево-судинних захворювань;

якщо  $wsqd[i,2] (i=1..7) \geq 10$ , 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;

11) 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;

12) 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.

Запропонований метод моніторингу якості сну вирішує критичну проблему сучасної діагностики – розрив між високоточними клінічними дослідженнями та зручністю повсякденного використання. Його головна перевага полягає у створенні гібридної системи оцінки, яка нівелює похибки окремих типів даних за рахунок перехресної верифікації біометричних сигналів і психометричних показників. Це дозволяє отримати об'єктивну картину стану пацієнта навіть у тих випадках, коли носимі пристрої демонструють низьку специфічність, наприклад, під час нерухомого неспання, яке алгоритми часто помилково трактують як сон. Завдяки такій інтеграції система стає потужним інструментом для виявлення прихованих патологій, які неможливо зафіксувати епізодичними вимірюваннями.

Застосування математичного моделювання у формі тижневої матриці *WSQD* трансформує розрізнені щоденні показники у структурований масив даних, придатний для швидкого комп'ютерного аналізу. Такий підхід забезпечує високу швидкість обробки інформації, оскільки алгоритм порівнює кожен елемент матриці з індивідуальними та референтними нормами автоматично. Це дозволяє фахівцю миттєво побачити тренди погіршення чи покращення стану, що особливо важливо при тривалій реабілітації після травм або під час лікування хронічного стресу. Фактично, метод забезпечує «периферійний інтелект», де основна аналітична робота виконується без залучення хмарних ресурсів на етапі первинної обробки.

Інноваційність підходу полягає у переході від статички до динамічного аналізу, де тижнева матриця *WSQD* дозволяє нівелювати випадкові похибки одного невдалого нічного запису. На відміну від стандартних трекерів, що дають розрізнені звіти, цей метод фокусується на виявленні стійких патернів, що дозволяє відрізнити тимчасове безсоння через зовнішні чинники від клінічних ознак депресії. Це забезпечує вищу діагностичну цінність для лікаря, оскільки він отримує не просто набір цифр, а готову модель ризику, де кожен стовпець матриці відповідає за окрему фізіологічну систему.

Можливість прямої інтеграції з державними медичними інформаційними системами, такими як *medics.ua*, перетворює цей метод з побутового застосунка на повноцінний клінічний сервіс. Автоматичне документування результатів

моніторингу в електронну медичну карту усуває людський фактор і забезпечує лікарю доступ до достовірного анамнезу пацієнта в режимі реального часу. Це створює надійні юридичне та медичне підґрунтя для коригування терапевтичного плану без необхідності додаткових візитів до лабораторії. Для пацієнта це означає вищий рівень безпеки, оскільки система самостійно ініціює зв'язок із лікарем у разі критичних відхилень показників, як-от нічне апное.

Однак метод має і певні недоліки, зумовлені обмеженнями сучасної сенсорики, яка не здатна зчитувати електричну активність мозку безпосередньо, а робить це через опосередковані фізичні сигнали. Хоча використання показника *RMSSD* та частоти дихання значно підвищує точність, система все ще залишається залежною від правильності експлуатації гаджета користувачем. Нещільне прилягання браслета або його зміщення під час рухів уві сні може призвести до спотворення даних серцевого ритму або кисневої сатурації. Тому метод потребує високого рівня дисципліни від пацієнта та попереднього навчання правилам користування системою.

Сфера використання розробленого методу виходить далеко за межі кардіології чи сомнології, охоплюючи спортивну медицину, неврологію та геріатрію. В спортивній практиці моніторинг показника *RMSSD* дозволяє уникнути перетренованості, надаючи тренерам дані про якість відновлення нервової системи атлета. У роботі з літніми людьми система стає незамінним помічником для раннього виявлення депресивних станів, які часто маскуються під фізичну слабкість, але чітко відображаються у зміні фаз сну та фрагментації. Таким чином, метод виступає універсальною платформою для персоналізованої превентивної медицини, адаптованою до умов домашнього середовища.

Важливою перевагою є також економічна доступність системи, оскільки вона не потребує дорогавартісного спеціалізованого обладнання, адаптуючи вже наявні у пацієнтів комерційні гаджети. Метод фактично демократизує сомнологічну допомогу, роблячи якісний моніторинг доступним для широких верств населення, що особливо актуально в умовах дефіциту профільних фахівців. Це дозволяє

охопити превентивним наглядом групи ризику, які раніше ігнорували проблеми зі сном через складність лабораторної діагностики.

З іншого боку, суттєвим технологічним викликом залишається необхідність постійної синхронізації між трьома рівнями кіберфізичної системи, що вимагає стабільної роботи серверної частини. Будь-які збої у передачі даних через MQTT-брокер або помилки авторизації в системі `medics.ua` можуть призвести до пропуску важливих записів у тижневій матриці. Крім того, метод вимагає від розробників постійного оновлення алгоритмів фільтрації шумів, оскільки нові моделі носимих пристроїв можуть мати специфічні апаратні особливості зчитування сигналів.

Можливість використання методу в телемедицині відкриває шлях до створення «розумних» стаціонарів на дому, де пацієнт відчуває підтримку фахівця без постійного перебування в лікарні. Це суттєво знижує рівень госпітальної тривожності та дозволяє збирати дані у природному середовищі, де архітектура сну не порушується незручними клінічними датчиками чи чужою обстановкою. Таким чином, розроблений інструментарій стає базовим елементом для побудови персоналізованих стратегій довголіття, орієнтованих на збереження когнітивного здоров'я через управління нічним відновленням.

### 3.2 Алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну побудований на принципі безперервного циклу збору, фільтрації та інтелектуального аналізу даних, що забезпечує перехід від сирих сигналів до клінічно значущих висновків. В основі алгоритму лежить трирівнева обробка інформації, де кожен етап має чітко визначені математичні та логічні операції.

Етап 1. Ініціалізація та верифікація профілю.

На початковому етапі кіберфізична система моніторингу якості сну здійснює реєстрацію пацієнта в мобільному застосунку з обов'язковим зазначенням даних сімейного лікаря. Ключовою особливістю є автоматична верифікація лікаря через систему `medics.ua`, що дозволяє підвантажити актуальну електронну медичну

картку (ЕМК) пацієнта. Це забезпечує контекстуальність моніторингу, оскільки система враховує попередні діагнози та призначені ліки при аналізі поточних показників.

Етап 2: Збір та периферійна обробка даних (Edge Computing).

Кіберфізична система моніторингу якості сну постійно опитує носимий пристрій через протокол BLE для отримання мультимодальних сигналів. На середньому рівні (контролер ESP32-S3) виконується фільтрація артефактів руху та шумів, після чого розраховуються базові параметри: індекс фрагментації (*SFI*), тривалість сну (*SD*), фази (*DS*, *LS*), ЧСС (*HR*), варіабельність (*RMSSD*), сатурація (*BOS*) та частота дихання (*RR*). Такий підхід дозволяє локалізувати обчислення, підвищуючи конфіденційність та зменшуючи навантаження на мережу.

Етап 3: Матричне моделювання тижневої динаміки.

Отримані щоденні показники накопичуються в пам'яті системи для формування матриці тижневої якості сну *WSQD* розміром 7 x 8. Кожен рядок матриці відповідає дню тижня, а стовпці – восьми ключовим параметрам життєдіяльності (*SFI*, *SD*, *DS*, *LS*, *HR*, *RMSSD*, *BOS*, *RR* відповідно). Це дозволяє кіберфізичній системі моніторингу якості сну проводити глибоку аналітику не лише за окрему ніч, а й виявляти стійкі тренди та відхилення від референтних значень протягом повного циклу.

Етап 4: Інтелектуальна оцінка та зворотний зв'язок.

На фінальному етапі кіберфізична система моніторингу якості сну інтегрує матричні дані з результатами щотижневих опитувальників *PSQI* та *BDI-II*. Система виконує логічну перевірку умов: якщо показники виходять за межі норми, ідентифікується конкретна проблема (апноє, депресія, серцеві ризики). Результатом є автоматичне документування стану в ЕМК, візуалізація графіків для пацієнта та миттєве сповіщення лікаря про зафіксовані порушення через MQTT-брокер.

Запропонований алгоритм функціонування кіберфізичної системи забезпечує якісно новий рівень медичного обслуговування, перетворюючи розрізнені біометричні дані на структурований клінічний висновок. Головна перевага цього

підходу полягає у безперервності та автоматизації циклу збору й обробки інформації, що дозволяє виявляти патологічні зміни в стані здоров'я пацієнта на ранніх стадіях, коли клінічні симптоми ще не є очевидними. Використання периферійних обчислень на базі контролера ESP32-S3 суттєво підвищує конфіденційність персональних даних, оскільки первинна фільтрація та розрахунок ключових показників відбуваються локально, не перевантажуючи мережеву інфраструктуру та хмарні сховища.

Матричне моделювання тижневої динаміки сну у формі структури *WSQD* надає можливість проводити глибокий ретроспективний аналіз, що є значно ефективнішим за епізодичні вимірювання. Це дозволяє системі ідентифікувати не просто випадкові коливання, а стійкі негативні тренди у показниках фрагментації, варіабельності серцевого ритму чи кисневої сатурації. Такий аналітичний підхід забезпечує високу точність у розмежуванні фізіологічних розладів, таких як апное, від психоемоційних проблем, зокрема депресивних станів чи хронічного стресу.

Інтеграція алгоритму з медичною системою *medics.ua* через захищені протоколи гарантує надійність верифікації даних та контекстуальність моніторингу на основі реальної історії хвороби пацієнта. Це створює замкнений цикл зворотного зв'язку, де лікар отримує вже оброблену та систематизовану інформацію, що дозволяє йому оперативно реагувати на критичні зміни стану. Автоматичне документування результатів безпосередньо в електронну медичну карту значно спрощує бюрократичні процеси та мінімізує вплив людського фактора на діагностичний процес. Завдяки поєднанню об'єктивної біометрії з носимих пристроїв та суб'єктивних клінічних індексів *PSQI* і *BDI-II*, алгоритм формує багатовимірний профіль здоров'я користувача. Перевагою такої гібридної оцінки є можливість персоналізації реабілітаційних заходів та надання індивідуальних рекомендацій щодо гігієни сну в режимі реального часу. Це не лише підвищує ефективність медичної допомоги, а й активно залучає пацієнта до процесу управління власним здоров'ям через наочну візуалізацію динаміки показників у мобільному застосунку.

У підсумку, впровадження даного алгоритму дозволяє частково компенсувати дефіцит профільних медичних фахівців шляхом автоматизації рутинного аналізу великих масивів даних. Система забезпечує стабільне функціонування в умовах домашнього середовища, трансформуючи повсякденні гаджети на потужний інструмент превентивної діагностики. Це стратегічно важливий крок до переходу від реактивної моделі лікування до випереджального контролю за життєво важливими функціями організму, що суттєво покращує якість життя пацієнтів.

Впровадження даного алгоритму дозволяє змінити парадигму взаємодії між пацієнтом та медичною установою, перетворюючи пасивне очікування симптомів на активний превентивний контроль за функціональним станом організму. Завдяки автоматизованій системі аналізу, сімейний лікар отримує можливість фокусуватися на пацієнтах із групи високого ризику, оскільки система самостійно відфільтровує норму від патології на основі матриці *WSQD*. Це суттєво оптимізує робочий час медичного персоналу та дозволяє уникнути перевантаження клінік пацієнтами, чії показники знаходяться в межах референтних значень, забезпечуючи при цьому надійний дистанційний нагляд.

Технологічна гнучкість алгоритму забезпечує масштабованість системи, що дозволяє інтегрувати нові типи біометричних сенсорів та розширювати перелік аналізованих параметрів без зміни фундаментальної структури. Використання відкритих протоколів передачі даних, таких як MQTT, та стандартів BLE гарантує сумісність із широким спектром комерційних пристроїв, що робить систему універсальним інструментом для популяційних досліджень якості сну. Така відкритість сприяє постійному вдосконаленню математичних моделей стадіювання сну та підвищенню точності діагностичних прогнозів для різних вікових груп.

З точки зору пацієнта, алгоритм формує культуру відповідального ставлення до власного здоров'я, надаючи зрозумілу візуалізацію складних фізіологічних процесів через інтерфейс мобільного застосунку. Можливість бачити кореляцію між власним режимом дня, психоемоційним станом за шкалою BDI-II та об'єктивною якістю нічного відновлення мотивує користувача до корекції способу

життя. Це перетворює моніторинг на інтерактивний процес навчання, де кожна зміна в матриці *WSQD* стає зрозумілим сигналом про ефективність обраної стратегії реабілітації чи лікування.

Кінцевим результатом роботи алгоритму є створення єдиного інформаційного простору, де дані про якість сну стають невід'ємною частиною загальної стратегії управління здоров'ям людини. Це дозволяє не лише лікувати існуючі розлади, а й прогнозувати потенційні ризики, пов'язані з серцево-судинними захворюваннями чи когнітивним зниженням, на основі довготривалих трендів. Таким чином, кіберфізична система моніторингу якості сну стає надійним фундаментом для реалізації концепції персоніфікованої медицини, де кожне терапевтичне рішення базується на об'єктивній та всебічній цифровій копії сомнологічного профілю пацієнта.

Реалізація цього алгоритму дозволяє побудувати прогностичну модель здоров'я, яка здатна виявляти приховані взаємозв'язки між порушеннями сну та функціональними змінами в роботі внутрішніх органів ще до моменту звернення пацієнта за медичною допомогою. Використання матричної структури *WSQD* як бази знань забезпечує високу точність верифікації стану, оскільки система порівнює поточні відхилення не лише з загальними референтними нормами, а й з індивідуальним «цифровим слідом» конкретного користувача, що мінімізує кількість хибнопозитивних тривожних сповіщень. Це перетворює моніторинг на інтелектуальний фільтр, який виділяє найбільш значущі клінічні події та надає лікарю обґрунтовану доказову базу для прийняття швидких рішень у межах превентивної стратегії лікування.

Автоматизація рутинних операцій із заповнення медичної документації та дистанційний контроль за дотриманням рекомендацій щодо гігієни сну дозволяють системі виступати в ролі цілодобового асистента, що підвищує загальну прихильність людини до процесу реабілітації. У підсумку, такий підхід забезпечує не лише контроль за окремими фазами відпочинку, а й створює фундамент для довгострокового збереження когнітивного ресурсу та серцево-судинної безпеки населення в умовах сучасного темпу життя.

Блок-схема узагальненого алгоритму функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну представлена на рис. 3.1.

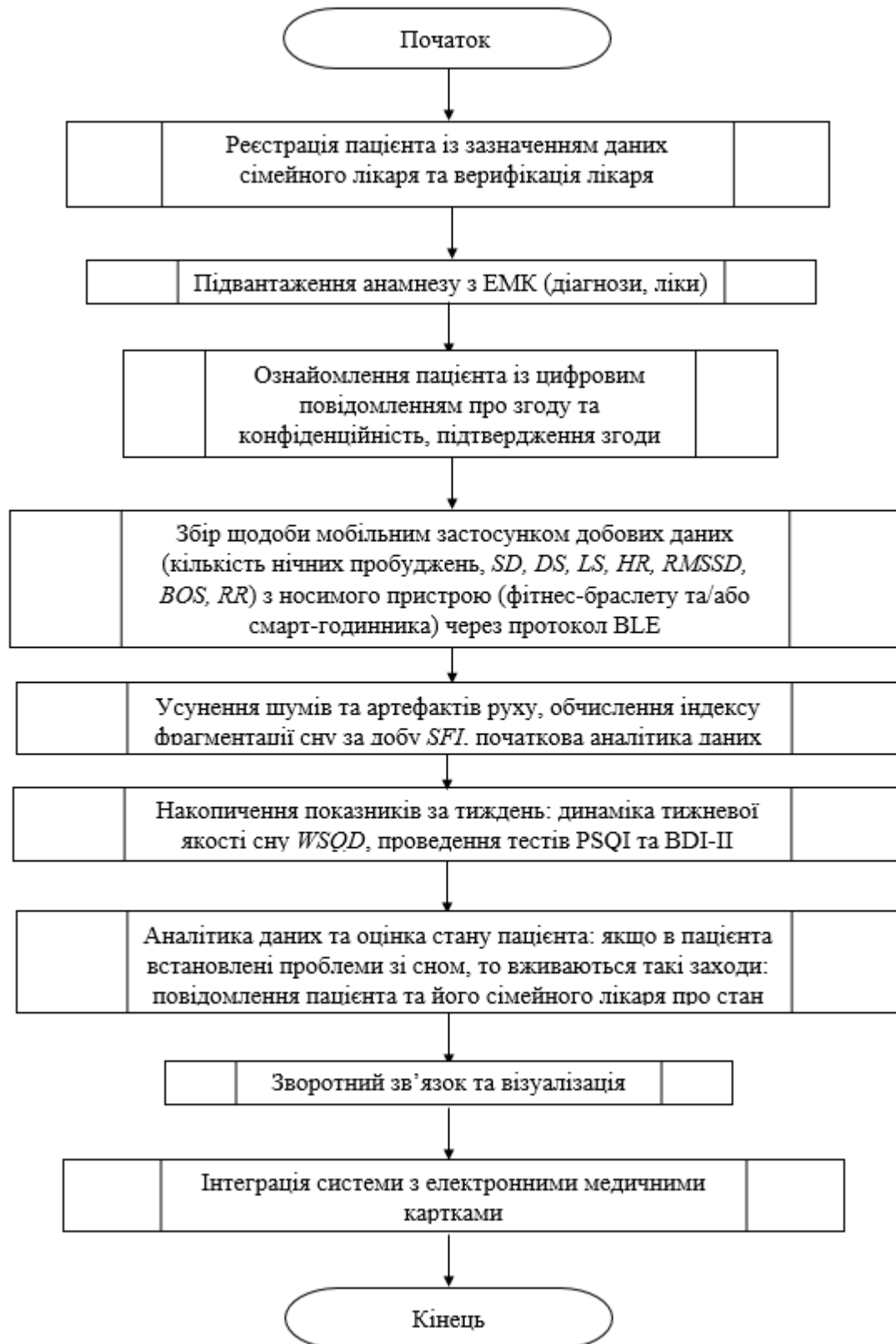


Рисунок 3.1 – Блок-схема узагальненого алгоритму функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну

### 3.3 Висновки

У третьому розділі розроблено метод та алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну, що базується на використанні носимих пристроїв для безперервного збору фізіологічних показників у домашніх умовах. Визначено перелік базових параметрів життєдіяльності, серед яких індекс фрагментації сну *SFI*, тривалість сну *SD*, фази сну *DS* та *LS*, частота серцевих скорочень *HR*, варіабельність ритму *RMSSD*, сатурація киснем *BOS* та частота дихання *RR*. Для забезпечення високої точності та клінічної значущості оцінки ці об'єктивні дані інтегруються із суб'єктивними показниками Піттсбурзького індексу якості сну *PSQI* та опитувальника депресії Бека *BDI-II*.

Запропонований метод реалізує повний цикл обробки інформації, починаючи від верифікації лікаря через систему *medics.ua* та підвантаження електронної медичної картки пацієнта для врахування попереднього анамнезу. Процес моніторингу передбачає щодобовий збір даних через енергоефективний протокол *BLE* та їх первинну фільтрацію від артефактів руху на середньому рівні системи за допомогою контролера *ESP32-S3*. Таке використання периферійних обчислень (*Edge Computing*) дозволяє локалізувати математичну обробку сигналів, підвищуючи конфіденційність медичної інформації та зменшуючи навантаження на мережеву інфраструктуру.

Наукова новизна методу полягає у застосуванні матричного моделювання тижневої динаміки сну у формі структури *WSQD* розміром 7 x 8. Ця модель дозволяє систематизувати накопичені за тиждень показники, трансформуючи розрізнені щоденні записи у структурований масив даних для виявлення стійких трендів та патологічних відхилень. Завдяки матричній структурі алгоритм проводить швидку автоматичну перевірку стану пацієнта за кожним параметром, порівнюючи результати з чітко визначеними референтними нормами для кожної фази сну та фізіологічного циклу.

Інтелектуальна складова алгоритму забезпечує ідентифікацію конкретних проблем зі здоров'ям, таких як обструктивне апное, депресивні розлади,

тривожність або серцево-судинні ризики, на основі логічного аналізу відхилень у показниках матриці *WSQD* та результатах щотижневого анкетування. У разі виявлення порушень система ініціює миттєве сповіщення сімейного лікаря через MQTT-брокер та надає пацієнту персоналізовані поради щодо профілактики в мобільному застосунку. Такий замкнений цикл зворотного зв'язку перетворює пасивне спостереження на активний інструмент превентивної медицини, забезпечуючи вчасне реагування на зміни стану організму.

Практична реалізація методу через інтеграцію з електронними медичними картками дозволяє автоматизувати документування результатів моніторингу, усуваючи людський фактор та надаючи лікарю об'єктивну доказову базу в режимі реального часу. Гібридна система оцінки нівелює похибки комерційних трекерів за рахунок перехресної верифікації сигналів, що дозволяє отримати достовірну картину навіть під час нерухомого неспання, яке традиційні пристрої часто трактують помилково. Це робить систему надійною платформою для дистанційної реабілітації та контролю за пацієнтами у їхньому природному домашньому середовищі, де архітектура сну не порушується незручними клінічними датчиками.

Важливою перевагою розробленого інструментарію є його економічна доступність та масштабованість, оскільки він адаптує вже наявні у пацієнтів гаджети без потреби у дороговартісному стаціонарному обладнанні. Відкритість алгоритму для інтеграції нових типів сенсорів забезпечує стабільне функціонування системи при оновленні модельного ряду носимих пристроїв, зберігаючи при цьому цілісність профілю здоров'я користувача.

У підсумку, впровадження запропонованого методу створює надійний фундамент для реалізації концепції персоніфікованої медицини, де кожне терапевтичне рішення базується на всебічній цифровій копії сомнологічного профілю пацієнта. Алгоритм формує культуру відповідального ставлення до здоров'я, мотивуючи користувачів до корекції способу життя через наочну візуалізацію взаємозв'язків між режимом дня та якістю нічного відновлення.

## 4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

### 4.1 Кіберфізична система моніторингу якості сну

Кіберфізична система моніторингу якості сну являє собою сучасну парадигму охорони здоров'я, що базується на тісній інтеграції обчислювальних ресурсів із фізичними процесами життєдіяльності людини. Актуальність розробки таких систем зумовлена стрімким зростанням кількості коморбідних розладів, спричинених хронічним стресом та порушенням циркадних ритмів, що негативно впливає на фізичне та емоційне благополуччя. Традиційні методи діагностики, такі як полісомнографія, є високовартісними та незручними для тривалого домашнього 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 пацієнта середовищі без втручання в його особистий простір.

Структура такої системи зазвичай будується за тривірневим принципом, де нижній рівень відповідає за безпосереднє зчитування біометричних сигналів через носимі сенсорні пристрої, такі як фітнес-браслети та смарт-годинники. Ці гаджети використовують акселерометри для фіксації рухів тіла та оптичні датчики пульсу (PPG) для вимірювання частоти серцевих скорочень, насичення крові киснем та варіабельності серцевого ритму. Завдяки використанню енергоефективного протоколу Bluetooth Low Energy (BLE), дані передаються на наступний рівень системи з мінімальним навантаженням на акумулятор носимого пристрою. Це забезпечує можливість стабільної роботи гаджета протягом усієї ночі, що є критично важливим для отримання повної картини нічного відпочинку.

Середній рівень кіберфізичної системи виконує роль інтелектуального шлюзу, де ключовим елементом виступає мікроконтролер, наприклад ESP32-S3, що володіє достатньою потужністю для периферійних обчислень (Edge Computing). На цьому етапі здійснюється попередня обробка даних, яка включає фільтрацію артефактів руху та шумів, що значно підвищує точність подальшого аналізу.

Використання апаратної підтримки векторних інструкцій дозволяє розраховувати складні параметри, такі як індекс фрагментації сну (*SFI*), безпосередньо на пристрої. Такий підхід не лише розвантажує хмарні сервіси, а й суттєво посилює конфіденційність, оскільки частина чутливої інформації обробляється локально.

Для передачі агрегованих даних з контролера у хмарне середовище використовується протокол MQTT, який є стандартом для IoT-систем завдяки своїй надійності та легкості. Модель «видавець-передплатник» та рівні якості обслуговування (QoS) гарантують доставку пакетів даних навіть у нестабільних домашніх мережах. Важливою частиною функціонування КФС є формування тижневої матриці динаміки якості сну *WSQD* розміром 7 x 8, де накопичуються ключові показники за повний цикл. Матрична структура дозволяє системі проводити глибоку аналітику та ідентифікувати стійкі тренди, які можуть вказувати на депресивні розлади, апное або серцево-судинні ризики.

Особливою рисою розробленої системи є інтеграція об'єктивної біометрії із суб'єктивними клінічними інструментами, такими як Піттсбурзький індекс (PSQI) та опитувальник Бека (BDI-II). Це дозволяє створити багатовимірний профіль здоров'я пацієнта, де цифрові дані з носимих пристроїв підкріплюються психометричними результатами. Система забезпечує замкнений цикл зворотного зв'язку, де лікар отримує доступ до верифікованої інформації через медичні платформи, наприклад *medics.ua*. Автоматичне документування стану пацієнта в електронній медичній картці мінімізує вплив людського фактора та прискорює процес прийняття діагностичних рішень.

Кіберфізична система також враховує специфічні особливості носимих пристроїв, такі як їхня чутливість до рухів та похибки в алгоритмічному визначенні фаз сну. Для підвищення достовірності моніторингу алгоритми системи аналізують частоту дихання та *RMSSD* для оцінки активності парасимпатичної нервової системи. Це дозволяє виявляти ранні сигнали перевтоми, стресу або хвороби ще до появи перших клінічних симптомів. Завдяки візуалізації денних та тижневих графіків у мобільному застосунку, пацієнт стає активним учасником процесу реабілітації, отримуючи персоналізовані поради щодо гігієни сну.

З технічної точки зору кіберфізична система моніторингу якості сну забезпечує високий рівень безпеки завдяки апаратному шифруванню та використанню захищених TLS-з'єднань при передачі даних у хмару. Це критично важливо для захисту персональних медичних даних пацієнта від несанкціонованого доступу. Система демонструє високу адаптивність, оскільки може працювати з різними моделями гаджетів (Garmin, Apple Watch, Samsung та інші), нівелюючи їхні недоліки через централізовану обробку на середньому рівні. Така масштабованість дозволяє легко інтегрувати нові типи сенсорів, наприклад для вимірювання температури шкіри чи виявлення апное.

Важливою перевагою впровадження такої моделі є часткова компенсація дефіциту профільних фахівців шляхом автоматизації первинного аналізу великих масивів даних. Система самостійно ідентифікує відхилення показників від референтних значень і надсилає попередження лікарю тільки у разі реальної потреби. Це дозволяє перейти від реактивної медицини до превентивної, забезпечуючи своєчасне втручання та підбір ефективної терапії. Для літніх людей або пацієнтів у процесі відновлення кіберфізична система стає надійним інструментом безперервного нагляду, що значно покращує якість їхнього життя.

У підсумку, кіберфізична система моніторингу якості сну перетворює повсякденні гаджети на потужний інструмент клінічної діагностики, доступний у домашніх умовах. Вона об'єднує цифрові технології, сенсорні мережі та інтелектуальні алгоритми для створення єдиного інформаційного простору навколо здоров'я пацієнта. Це створює надійне підґрунтя для реалізації концепції персоналізованої медицини, де кожен терапевтичний крок базується на об'єктивній цифровій копії сомнологічного профілю людини. Таким чином, розробка таких систем є стратегічним завданням для сучасної ІТ-галузі та охорони здоров'я.

Використання кіберфізичної системи забезпечує не лише контроль за окремими фазами відпочинку, а й сприяє формуванню культури відповідального ставлення до власного організму. Пацієнт отримує можливість бачити прямий зв'язок між своїм способом життя та якістю нічного відновлення, що мотивує до позитивних змін. Система виступає у ролі цілодобового асистента, який підвищує

загальну прихильність до лікування та забезпечує довгострокове збереження когнітивного ресурсу. Це робить кіберфізичний підхід найбільш перспективним напрямком у розвитку сучасних засобів моніторингу здоров'я людини.

Спроекуємо архітектуру кіберфізичної системи моніторингу якості сну – рис. 4.1.

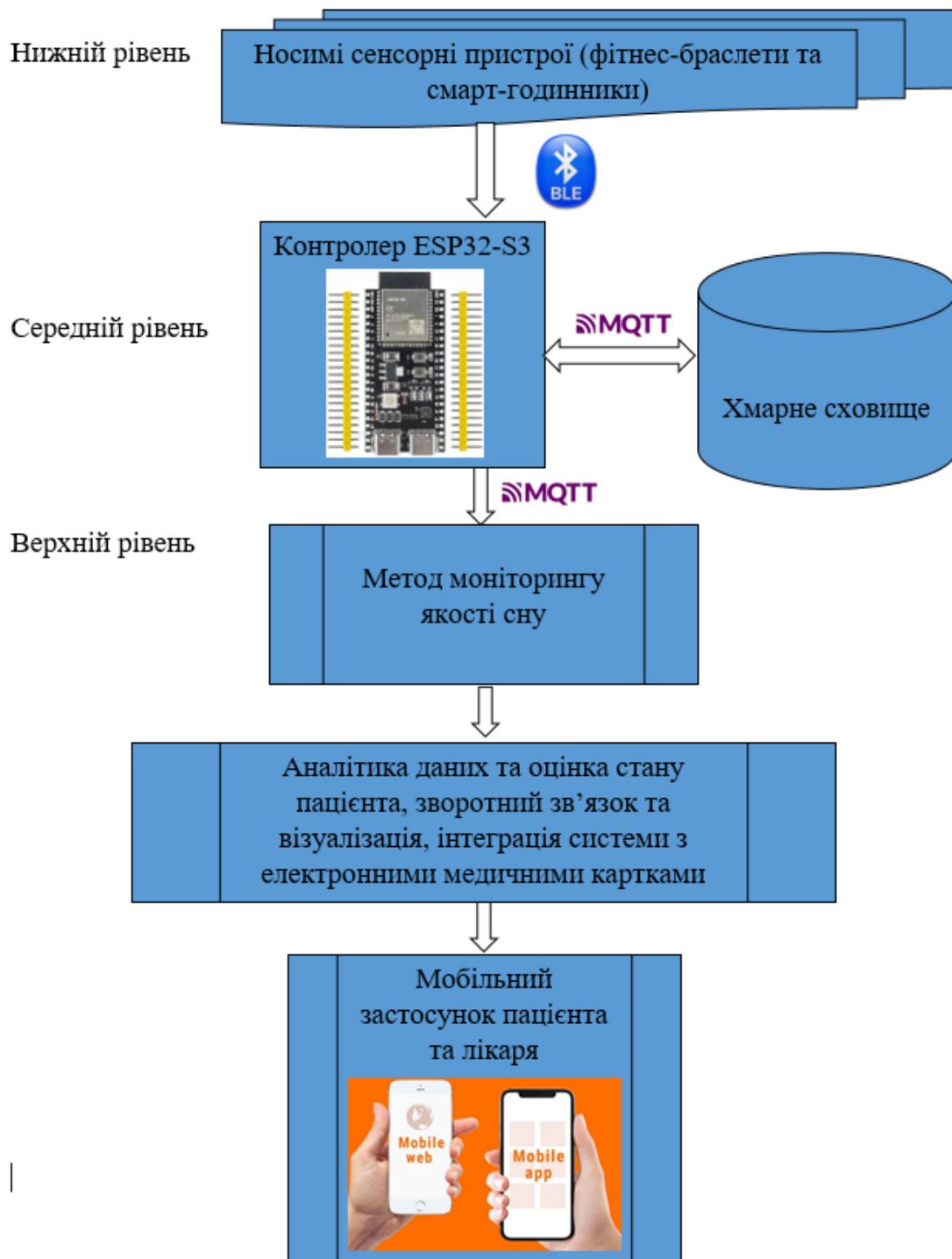


Рисунок 4.1 – Архітектура кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Представлена архітектура кіберфізичної системи моніторингу якості сну базується на сучасній трирівневій моделі, яка забезпечує тісну інтеграцію фізичних процесів організму з цифровими обчислювальними ресурсами. Основна мета системи полягає у розв'язанні актуальної науково-прикладної задачі безперервного, неінвазивного моніторингу сомнологічних показників пацієнта безпосередньо в домашніх умовах. Це дозволяє перейти від епізодичного клінічного спостереження до превентивної діагностики, що є критично важливим для раннього виявлення серцево-судинних захворювань, апное та депресивних станів. Завдяки такій структурі система стає базовим інструментом для персоналізованої реабілітації та підтримки когнітивного здоров'я пацієнта.

Ключовою особливістю нижнього рівня системи є використання комерційних носимих сенсорів, таких як фітнес-браслети та смарт-годинники, для збору мультимодальних фізіологічних сигналів. Ці пристрої вимірюють параметри серцевої діяльності, насичення крові киснем та рухову активність, передаючи дані через енергоефективний протокол Bluetooth Low Energy (BLE). Вибір BLE гарантує мінімальне навантаження на акумулятори носимих гаджетів, що дозволяє проводити безперервний моніторинг протягом усієї ночі. Це забезпечує об'єктивність даних у природному для пацієнта середовищі, усуваючи «ефект білого халата» та незручності стаціонарної полісомнографії.

Середній рівень системи, побудований на базі контролера ESP32-S3, виконує роль інтелектуального шлюзу для периферійних обчислень (Edge Computing). Вибір даного контролера обґрунтований його високою обчислювальною потужністю, наявністю двох ядер та апаратною підтримкою векторних інструкцій, що прискорює розрахунок показників. На цьому рівні відбувається фільтрація шумів та первинна аналітика, що підвищує конфіденційність системи, оскільки значна частина обробки відбувається локально. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг даних, що передаються у хмарне сховище, оптимізуючи навантаження на мережеву інфраструктуру.

Використання протоколу MQTT для зв'язку між шлюзом та хмарним сховищем забезпечує надійну та швидку передачу агрегованих показників. Модель

«видавець-передплатник» та рівні якості обслуговування (QoS) гарантують доставку критично важливої телеметрії навіть у нестабільних мережах. Це дозволяє системі миттєво доставляти Push-повідомлення про критичні відхилення, такі як десатурація або панічні атаки уві сні, на смартфони лікаря та пацієнта. Завдяки MQTT реалізується замкнений цикл зворотного зв'язку, що є фундаментом превентивної медицини.

Переваги розробленої архітектури полягають у гібридному оцінюванні, яке поєднує об'єктивні біометричні дані з результатами клінічних опитувальників PSQI та BDI-II. Це дозволяє нівелювати похибки носимих пристроїв, наприклад, при розпізнаванні нерухомого неспання, та сформувати багатовимірний профіль здоров'я користувача. Математичне моделювання тижневої динаміки у формі матриці *WSQD* розміром 7 x 8 дозволяє виявляти довгострокові тренди та стійкі порушення, які неможливо зафіксувати за одну ніч. Система забезпечує високу швидкість обробки даних та зручну візуалізацію динаміки показників для обох груп користувачів.

Можливості системи розширюються завдяки інтеграції з електронними медичними картками через систему *medics.ua*, що забезпечує автоматичне документування стану пацієнта. Це усуває людський фактор при заповненні анамнезу та надає лікарю об'єктивну базу для прийняття терапевтичних рішень у реальному часі. Для пацієнта система пропонує персоналізовані поради щодо гігієни сну та контроль за процесом реабілітації. Економічна доступність кіберфізичної системи моніторингу якості сну обумовлена можливістю використання вже наявних у користувачів гаджетів без потреби у дорогому медичному обладнанні.

Основним недоліком системи залишається опосередкований характер вимірювань, оскільки носимі пристрої не зчитують електричну активність мозку безпосередньо. Точність стадіювання сну (глибокий/легкий) все ще залежить від пропрієтарних алгоритмів виробників гаджетів та правильності їх експлуатації пацієнтом. Нещільне прилягання сенсорів або артефакти руху можуть спотворювати дані серцевого ритму та сатурації. Крім того, система вимагає

стабільної синхронізації між усіма рівнями та постійного оновлення методів фільтрації для нових моделей пристроїв.

Шляхи подальшого розвитку системи вбачаються у вдосконаленні методів фільтрації шумів та розширенні переліку аналізованих показників, зокрема температури шкіри та специфічних ознак апное. Перспективним напрямком є впровадження глибшого навчання (deep learning) на периферійному рівні для точнішого стадіювання сну безпосередньо на ESP32-S3. Також важливо розвивати модульність архітектури для інтеграції з безконтактними сенсорами, такими як UWB-радары або сенсорні простирадла. Це дозволить мінімізувати дискомфорт для пацієнта та підвищити результативність медичної допомоги у віддаленому режимі.

#### 4.2 Приклади функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну

Розглянемо приклади функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну.

Розглянемо приклад1 функціонування розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну для пацієнта з умовним ім'ям Олександр. Олександр завантажив мобільний застосунок, пройшов реєстрацію та вказав дані свого сімейного лікаря. Система автоматично верифікувала лікаря через базу medics.ua та підтягнула електронну медичну картку Олександра, щоб врахувати, що він не має хронічних захворювань і не вживає ліків, які могли б вплинути на серцевий ритм.

Протягом ночі смарт-годинник Олександра через протокол BLE передає «сирі» дані на контролер ESP32-S3. Контролер у реальному часі відфільтровує незначні рухи рукою та розраховує біометричні показники. Оскільки Олександр дотримується правил експлуатації (пристрій щільно прилягає до зап'ястя), датчик фіксує стабільний сигнал пульсу та насичення киснем.

За першу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 2, тривалість сну  $SD = 8.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 22\%$  / легкий сон  $LS = 50\%$ », частота серцевих скорочень уві

сні  $HR=52$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 48$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 16$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{2}{8.5} \cdot 100\% = 23.5\%.$$

За другу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 20\%$  / легкий сон  $LS = 53\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=57$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 14$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7.5} \cdot 100\% = 13.3\%.$$

За третю добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 2, тривалість сну  $SD = 9$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 24\%$  / легкий сон  $LS = 58\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=49$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 46$ , насичення крові киснем  $BOS = 100$ , частота дихання  $RR = 17$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{2}{9} \cdot 100\% = 22.2\%.$$

За четверту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 2, тривалість сну  $SD = 8.2$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 17\%$  / легкий сон  $LS = 53\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=58$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 42$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 19$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{2}{8.2} \cdot 100\% = 24.4\%.$$

За п'яту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7.6$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 23\%$  / легкий сон  $LS = 51\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=56$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 44$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 16$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7.6} \cdot 100\% = 13.2\%.$$

За шосту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 9$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 23\%$  / легкий сон  $LS = 50\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=57$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 100$ , частота дихання  $RR = 20$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{9} \cdot 100\% = 11.1\%.$$

За сьому добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 16\%$  / легкий сон  $LS = 59\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=55$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 46$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 16$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7} \cdot 100\% = 14.3\%.$$

Далі відбулась попередня обробка даних (фільтрація шумів) та початкова аналітика даних. Після цього була заповнена матриця динаміки тижневої якості сну  $WSQD$  – таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Матриця  $WSQD_i$  динаміки тижневої якості сну пацієнта Олександра

<i>SFI</i>	<i>SD</i>	<i>DS</i>	<i>LS</i>	<i>HR</i>	<i>RMSSD</i>	<i>BOS</i>	<i>RR</i>
23.5	8.5	22	50	52	48	98	16
13.3	7.5	20	53	57	43	99	14
22.2	9	24	58	49	46	100	17
24.4	8.2	17	53	58	42	99	19
13.2	7.6	23	51	56	44	98	16
11.1	9	23	50	57	43	100	20
14.3	7	16	59	55	46	98	16

В кінці тижня було проведено опитування пацієнта Олександра 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  $PSQI = 3$  та *BDI-II* (опитувальник Бека) (<https://cbt-therapist.net/BDI>) з отриманням індексу  $BDI = 8$ , що свідчить про відсутність тривоги чи депресії.

Далі відбулась аналітика даних та оцінка стану пацієнта. Система порівняла всі елементи матриці  $WSQD$  із референтними значеннями та виконала логічну перевірку. Оскільки  $wsqd[i,1] (i=1..7) \leq 25\%$  та  $7 \leq wsqd[i,2] (i=1..7) \leq 9$  та  $15 \leq wsqd[i,3] (i=1..7) \leq 25$  та  $50 \leq wsqd[i,4] (i=1..7) \leq 60$  та  $40 \leq wsqd[i,5] (i=1..7) \leq 60$  та  $wsqd[i,6] (i=1..7) \geq 40$  та  $wsqd[i,7] (i=1..7) \geq 95$  та  $12 \leq wsqd[i,8] (i=1..7) \leq 20$  та  $PSQI \leq 5$  та  $BDI \leq 14$ , то в пацієнта Олександра спостерігається висока якість сну.

В мобільному застосунку пацієнта Олександра відобразився денний та тижневий графіки його показників сну – зелені графіки стабільної динаміки; в мобільному застосунку лікаря відобразився тижневий звіт щодо показників сну пацієнта Олександра у фоновому режимі без тривожних сповіщень. Вся інформація про стан пацієнта Олександра була занесена в його електронну медичну картку.

Розглянемо приклад2 функціонування розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну для пацієнта з умовним ім'ям Ігор. Ігор завантажив мобільний застосунок, пройшов реєстрацію та вказав дані свого сімейного лікаря. Система автоматично верифікувала лікаря через базу medics.ua та підтягнула електронну медичну картку Ігоря. В анамнезі пацієнта зазначено надлишкову вагу, що автоматично підвищує пріоритет контролю дихальних циклів та сатурації.

Протягом ночі смарт-годинник Ігоря через протокол BLE передає «сирі» дані на контролер ESP32-S3. Контролер у реальному часі відфільтровує незначні рухи рукою та розраховує біометричні показники. Оскільки Ігор дотримується правил експлуатації (пристрій щільно прилягає до зап'ястя), датчик фіксує стабільний сигнал пульсу та насичення киснем.

За першу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 5, тривалість сну  $SD = 8.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 12\%$  / легкий сон  $LS = 70\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=82$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 48$ , насичення крові киснем  $BOS = 88$ , частота дихання  $RR = 10$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{5}{8.5} \cdot 100\% = 58.8\%.$$

За другу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 7, тривалість сну  $SD = 8$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 73\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=77$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 45$ , насичення крові киснем  $BOS = 89$ , частота дихання  $RR = 11$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{7}{8} \cdot 100\% = 87.5\%.$$

За третю добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 6, тривалість сну  $SD = 9$ , фази сну

«глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 80\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=89$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 46$ , насичення крові киснем  $BOS = 90$ , частота дихання  $RR = 10$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{6}{9} \cdot 100\% = 66.7\%.$$

За четверту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 8, тривалість сну  $SD = 8.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 8\%$  / легкий сон  $LS = 89\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=88$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 42$ , насичення крові киснем  $BOS = 89$ , частота дихання  $RR = 11$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{8}{8.5} \cdot 100\% = 94.1\%.$$

За п'яту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 7, тривалість сну  $SD = 7.3$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 6\%$  / легкий сон  $LS = 72\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=86$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 44$ , насичення крові киснем  $BOS = 88$ , частота дихання  $RR = 9$  тощо. Було

виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{7}{7.3} \cdot 100\% = 95.9\%.$$

За шосту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 5, тривалість сну  $SD = 8$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 13\%$  / легкий сон  $LS = 70\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=77$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 90$ , частота дихання  $RR = 10$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{5}{8} \cdot 100\% = 62.5\%.$$

За сьому добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 6, тривалість сну  $SD = 9$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 79\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 75$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 46$ , насичення крові киснем  $BOS = 89$ , частота дихання  $RR = 11$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{6}{9} \cdot 100\% = 66.7\%.$$

Далі відбулась попередня обробка даних (фільтрація шумів) та початкова аналітика даних. Після цього була заповнена матриця динаміки тижневої якості сну  $WSQD$  – таблиця 4.2.

Таблиця 4.2 – Матриця  $WSQD_2$  динаміки тижневої якості сну пацієнта Ігоря

<i>SFI</i>	<i>SD</i>	<i>DS</i>	<i>LS</i>	<i>HR</i>	<i>RMSSD</i>	<i>BOS</i>	<i>RR</i>
58.8	8.5	12	70	82	48	88	10
87.5	8	10	73	77	45	89	11
66.7	9	10	80	89	46	90	10
94.1	8.5	8	89	88	42	89	11
95.9	7.3	6	72	86	44	88	9
62.5	8	13	70	77	43	90	10
66.7	9	10	79	75	46	89	11

В кінці тижня було проведено опитування пацієнта Ігоря 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  $PSQI = 8$  (сильна денна сонливість) та BDI-II (опитувальник Бека) (<https://cbt-therapist.net/BDI>) з отриманням індексу  $BDI = 15$ .

Далі відбулась аналітика даних та оцінка стану пацієнта. Система порівняла всі елементи матриці  $WSQD$  із референтними значеннями та виконала логічну перевірку.

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

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

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

Оскільки  $wsqd[i,5] (i = 1..7) > 60$ , 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.

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

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

Оскільки  $PSQI > 5$ , то в пацієнта спостерігається низька якість сну.

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

В мобільному застосунку пацієнта Ігоря відобразився денний та тижневий графіки його показників сну. В пацієнта Ігоря встановлені проблеми зі сном, тому були вжиті 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. Система миттєво відправила через MQTT-брокер Push-повідомлення пацієнту Ігорю про підозру на апное та сповістила про це сімейного лікаря. Лікар, бачачи об'єктивні графіки в мобільному застосунку, призначив Ігорю термінову консультацію та додаткове обстеження (СПАП-терапію). Дані про критичну десатурацію та фрагментацію автоматично були занесені в електронну медичну картку Ігоря у системі medics.ua. Мобільний застосунок також виконував нагадування пацієнту про запланований візит до сімейного лікаря та надавав поради щодо профілактики проблем зі сном (зокрема, з апное сну) в мобільному застосунку.

Розглянемо приклад функціонування розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну для пацієнтки з умовним ім'ям Марія. Марія завантажила мобільний застосунок, пройшла реєстрацію та вказала дані свого сімейного лікаря. Система автоматично верифікувала лікаря через базу medics.ua та підтягнула електронну медичну картку Марії. На початковому етапі система фіксує відсутність фізичних патологій, проте враховує вік та професійну діяльність пацієнтки для подальшої персоналізованої аналітики.

Протягом ночі смарт-годинник Марії через протокол BLE передає «сирі» дані на контролер ESP32-S3. Контролер у реальному часі відфільтровує незначні рухи рукою та розраховує біометричні показники. Оскільки Марія дотримується правил експлуатації (пристрій щільно прилягає до зап'ястя), датчик фіксує стабільний сигнал пульсу та насичення киснем. Система фіксує не лише фізіологічні показники, а й складні часові залежності. Контролер на периферійному рівні обробляє сигнали, виділяючи патерни ранніх пробуджень, які є характерними для ментальних розладів.

За першу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 4, тривалість сну  $SD = 11$ , фази сну

«глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 55\%$ », частота серцевих скорочень у ві сні  $HR=52$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 33$ , насичення крові киснем  $BOS = 97$ , частота дихання  $RR = 17$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{4}{11} \cdot 100\% = 36.4\%.$$

За другу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 3, тривалість сну  $SD = 10.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 53\%$ », частота серцевих скорочень у ві сні  $HR=57$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 34$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 15$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{3}{10.5} \cdot 100\% = 28.6\%.$$

За третю добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 4, тривалість сну  $SD = 11.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 56\%$ », частота серцевих скорочень у ві сні  $HR=59$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 33$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 20$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{4}{11.5} \cdot 100\% = 34.8\%.$$

За четверту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 4, тривалість сну  $SD = 10.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 8\%$  / легкий сон  $LS = 59\%$ », частота серцевих скорочень у ві сні  $HR=58$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 32$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 18$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{4}{10.5} \cdot 100\% = 38.1\%.$$

За п'яту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 4, тривалість сну  $SD = 11.3$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 11\%$  / легкий сон  $LS = 52\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=56$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 34$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 19$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{4}{11.3} \cdot 100\% = 35.4\%.$$

За шосту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 3, тривалість сну  $SD = 10$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 13\%$  / легкий сон  $LS = 60\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=57$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 33$ , насичення крові киснем  $BOS = 100$ , частота дихання  $RR = 20$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{3}{10} \cdot 100\% = 30\%.$$

За сьому добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 4, тривалість сну  $SD = 11$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 10\%$  / легкий сон  $LS = 59\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR=55$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 36$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 19$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{4}{11} \cdot 100\% = 36.4\%.$$

Далі відбулась попередня обробка даних (фільтрація шумів) та початкова аналітика даних. Після цього була заповнена матриця динаміки тижневої якості сну *WSQD* – таблиця 4.3.

Таблиця 4.3 – Матриця *WSQD<sub>3</sub>* динаміки тижневої якості сну пацієнтки Марії

<i>SFI</i>	<i>SD</i>	<i>DS</i>	<i>LS</i>	<i>HR</i>	<i>RMSSD</i>	<i>BOS</i>	<i>RR</i>
36.4	11	10	55	52	33	97	17
28.6	10.5	10	53	57	34	99	15
34.8	11.5	10	56	59	33	98	20
38.1	10.5	8	59	58	32	99	18
35.4	11.3	11	52	56	34	98	19
30	10	13	60	57	33	100	20
36.4	11	10	59	55	36	99	19

В кінці тижня було проведено опитування пацієнта Ігоря 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* = 8 (сильна денна сонливість) та *BDI-II* (опитувальник Бека) (<https://cbt-therapist.net/BDI>) з отриманням індексу *BDI* = 19 (що відповідає помірній депресії).

Далі відбулась аналітика даних та оцінка стану пацієнта. Система порівняла всі елементи матриці *WSQD* із референтними значеннями та виконала логічну перевірку.

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

Оскільки  $wsqd[i,2] (i = 1..7) \geq 10$ , то в пацієнтки є проблеми з надлишком тривалості сну, що можуть вказувати на клінічну депресію, діабет, системні запалення.

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

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

Оскільки  $PSQI > 5$ , то в пацієнтки спостерігається низька якість сну.

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

В мобільному застосунку пацієнтки Марії відобразився денний та тижневий графіки її показників сну. В пацієнтки Марії встановлені проблеми зі сном, тому були вжиті такі заходи: повідомлення пацієнтки та її сімейного лікаря про стан пацієнтки – які порушення сну зафіксовані та на які проблеми зі здоров'ям вони можуть вказувати. Система визначає низьку якість сну, яка супроводжується ростом фрагментації та зміною фаз, що вказує на депресивний розлад. Пацієнтка Марія отримує сповіщення про необхідність консультації, а її сімейний лікар через MQTT-брокер отримує звіт із вказанням конкретних порушень. Результати автоматично заносяться в електронну медичну картку пацієнтки у системі medics.ua, що дозволяє лікарю вчасно призначити психотерапевтичну підтримку або медикаментозну корекцію. Мобільний застосунок також виконував нагадування пацієнтці про запланований візит до сімейного лікаря та надавав їй поради щодо профілактики проблем зі сном та депресивних розладів у мобільному застосунку.

Розглянемо приклад<sup>4</sup> функціонування розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну для пацієнтки з умовним ім'ям Ірина. Ірина завантажила мобільний застосунок, пройшла реєстрацію та вказала дані свого сімейного лікаря. Система автоматично верифікувала лікаря через базу medics.ua та підтягнула

електронну медичну картку Ірини, щоб врахувати, що вона не має хронічних захворювань і не вживає ліків, які могли б вплинути на серцевий ритм.

Протягом ночі смарт-годинник Ірини через протокол BLE передає «сирі» дані на контролер ESP32-S3. Контролер у реальному часі відфільтровує незначні рухи рукою та розраховує біометричні показники. Оскільки Ірина дотримується правил експлуатації (пристрій щільно прилягає до зап'ястя), датчик фіксує стабільний сигнал пульсу та насичення киснем.

За першу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 18\%$  / легкий сон  $LS = 54\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 50$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 19$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7.5} \cdot 100\% = 13.3\%.$$

За другу добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 22\%$  / легкий сон  $LS = 52\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 52$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 18$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7.5} \cdot 100\% = 13.3\%.$$

За третю добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 23\%$  / легкий сон  $LS = 53\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 53$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 42$ , насичення крові киснем  $BOS = 100$ , частота дихання  $RR = 17$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7} \cdot 100\% = 14.3\%.$$

За четверту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 22\%$  / легкий сон  $LS = 54\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 52$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 42$ , насичення крові киснем  $BOS = 99$ , частота дихання  $RR = 19$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7} \cdot 100\% = 14.3\%.$$

За п'яту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7.5$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 23\%$  / легкий сон  $LS = 53\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 53$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 19$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7.5} \cdot 100\% = 13.3\%.$$

За шосту добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 7.2$ , фази сну «глибокий сон  $DS = 23\%$  / легкий сон  $LS = 52\%$ », частота серцевих скорочень уві сні  $HR = 54$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 43$ , насичення крові киснем  $BOS = 100$ , частота дихання  $RR = 20$  тощо.

Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{7.2} \cdot 100\% = 13.9\%.$$

За сьому добу мобільним застосунком зібрано такі добові дані з носимого пристрою: кількість нічних пробуджень – 1, тривалість сну  $SD = 8$ , фази сну

«глибокий сон  $DS = 22\%$  / легкий сон  $LS = 53\%$ », частота серцевих скорочень у ві сні  $HR = 55$ , середньоквадратичне значення послідовних різниць у серцевому ритмі  $RMSSD = 42$ , насичення крові киснем  $BOS = 98$ , частота дихання  $RR = 18$  тощо. Було виконано обчислення показника індексу фрагментації сну

$$SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\% = \frac{1}{8} \cdot 100\% = 12.5\%.$$

Далі відбулась попередня обробка даних (фільтрація шумів) та початкова аналітика даних. Після цього була заповнена матриця динаміки тижневої якості сну  $WSQD$  – таблиця 4.4.

Таблиця 4.4 – Матриця  $WSQD_4$  динаміки тижневої якості сну пацієнтки Ірини

$SFI$	$SD$	$DS$	$LS$	$HR$	$RMSSD$	$BOS$	$RR$
13.3	7.5	18	54	50	43	99	19
13.3	7.5	22	52	52	43	99	18
14.3	7	23	53	53	42	100	17
14.3	7	22	54	52	42	99	19
13.3	7.5	23	53	53	43	98	19
13.9	7.2	23	52	54	43	100	20
12.5	8	22	53	55	42	98	18

В кінці тижня було проведено опитування пацієнтки Ірини 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  $PSQI = 2$  та  $BDI-II$  (опитувальник Бека) (<https://cbt-therapist.net/BDI>) з отриманням індексу  $BDI = 6$ , що свідчить про відсутність тривоги чи депресії.

Далі відбулась аналітика даних та оцінка стану пацієнтки. Система порівняла всі елементи матриці  $WSQD$  із референтними значеннями та виконала логічну перевірку. Оскільки  $wsqd[i,1] (i=1..7) \leq 25\%$  та  $7 \leq wsqd[i,2] (i=1..7) \leq 9$  та  $15 \leq wsqd[i,3] (i=1..7) \leq 25$  та  $50 \leq wsqd[i,4] (i=1..7) \leq 60$  та  $40 \leq$

$wsqd[i,5] (i = 1..7) \leq 60$  та  $wsqd[i,6] (i = 1..7) \geq 40$  та  $wsqd[i,7] (i = 1..7) \geq 95$  та  $12 \leq wsqd[i,8] (i = 1..7) \leq 20$  та  $PSQI \leq 5$  та  $BDI \leq 14$ , то в пацієнтки Ірини спостерігається висока якість сну.

В мобільному застосунку пацієнтки Ірини відобразився денний та тижневий графіки її показників сну – зелені графіки стабільної динаміки; в мобільному застосунку лікаря відобразився тижневий звіт щодо показників сну пацієнтки Ірини у фоновому режимі без тривожних сповіщень. Вся інформація про стан пацієнтки Ірини була занесена в її електронну медичну картку.

### 4.3 Висновки

У четвертому розділі проведено практичну апробацію розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну, що дозволило підтвердити ефективність запропонованих методів та алгоритмів у реальних умовах. Основна увага була приділена перевірці працездатності трирівневої архітектури, яка забезпечує стабільний збір біометричних даних через носимі пристрої та їх подальшу інтелектуальну обробку на периферійному рівні за допомогою контролера ESP32-S3. Результати впровадження продемонстрували, що система успішно справляється з фільтрацією артефактів руху та шумів, забезпечуючи високу точність розрахунку базових сомнологічних показників, таких як індекс фрагментації, варіабельність серцевого ритму та сатурація киснем.

Практичні експерименти за участю пацієнтів із різними профілями здоров'я дозволили наочно продемонструвати можливості системи щодо ідентифікації специфічних порушень. Зокрема, було детально розглянуто сценарій функціонування системи в умовах відсутності патологій, де результати моніторингу повністю корелювали із суб'єктивним відчуттям пацієнта та низькими балами за клінічними опитувальниками PSQI та BDI-II. Це підтвердило адекватність встановлених референтних значень та надійність алгоритму перевірки

логічних умов, який автоматично класифікував стан як високу якість сну без потреби у додатковому втручанні лікаря.

Окремим важливим етапом апробації став аналіз роботи системи при виявленні ознак обструктивного апное сну, що супроводжувалося фіксацією критичних епізодів десатурації та високої фрагментації відпочинку. Система продемонструвала здатність у реальному часі виявляти падіння рівня кисню в крові нижче 95% та корелювати ці події із різкими стрибками частоти серцевих скорочень. Завдяки використанню протоколу MQTT та інтеграції з медичною платформою medics.ua, сповіщення про ці порушення були оперативно доставлені сімейному лікарю, що довело високу швидкість реакції кіберфізичної інфраструктури на загрози життю та здоров'ю пацієнта.

Дослідження також підтвердило ефективність методу у виявленні маркерів депресивних станів через аналіз архітектури сну та змін у фазах глибокого відпочинку. На прикладі пацієнтки із тривалою гіперсомнією та високим індексом SFI було показано, як система інтегрує об'єктивну матрицю тижневої динаміки WSQD із високими балами за опитувальником Бека для формування комплексного клінічного висновку. Такий мультимодальний підхід дозволив системі ідентифікувати приховані психоемоційні розлади, які часто ігноруються при використанні звичайних фітнес-трекерів, що не мають доступу до клінічного анамнезу та інтелектуальної аналітики.

Експериментально було доведено перевагу використання периферійних обчислень на базі мікроконтролера ESP32-S3 для забезпечення конфіденційності та автономності системи. Локальна обробка даних дозволила суттєво зменшити обсяг інформації, що передається у хмарне сховище, зберігаючи при цьому повноту діагностичної картини за рахунок формування стислої, але інформативної матриці тижневої динаміки. Це підтвердило технічну життєздатність обраної апаратної платформи для тривалого нічного моніторингу, оскільки пристрій демонстрував стабільну роботу без перегріву та збоїв у передачі телеметричних даних.

Інтеграція системи з державними електронними медичними картками дозволила автоматизувати процес ведення документації, що було позитивно

оцінено в ході апробації. Автоматичне занесення результатів моніторингу в систему medics.ua усунуло необхідність ручного заповнення щоденників сну пацієнтами та надало лікарям доступ до структурованих звітів безпосередньо під час консультацій. Це підтвердило практичну цінність розробки як інструменту підтримки прийняття лікарських рішень, що базується на об'єктивній доказовій базі, зібраній у природному середовищі життєдіяльності пацієнта.

Аналіз результатів впровадження також виявив високу прихильність користувачів до моніторингу завдяки зручності мобільного застосунку та наочності візуалізації даних. Пацієнти відзначали корисність персоналізованих рекомендацій щодо гігієни сну, які генерувалися системою на основі виявлених відхилень у матриці WSQD. Це дозволило зробити висновок про значний реабілітаційний потенціал системи, оскільки вона не лише діагностує проблеми, а й активно залучає людину до процесу корекції способу життя через зворотний зв'язок у реальному часі.

Водночас апробація дозволила окреслити межі застосування системи та виявити фактори, що впливають на точність вимірювань, такі як правильність фіксації браслета на зап'ясті. Було встановлено, що для отримання максимально достовірних значень варіабельності серцевого ритму необхідне чітке дотримання правил експлуатації носимих пристроїв. Отриманий досвід практичного використання став основою для формування переліку практичних рекомендацій для лікарів та пацієнтів, що дозволить мінімізувати кількість хибних тривожних сповіщень та підвищити якість діагностики у майбутньому.

Технічна перевірка комунікаційних протоколів BLE та MQTT підтвердила їхню енергоефективність та стійкість до розривів з'єднання, що є критично важливим для домашнього використання. Система успішно відновлювала передачу даних після тимчасової відсутності інтернету, не втрачаючи при цьому цілісності матриці тижневої динаміки за рахунок буферизації на середньому рівні. Це підкреслило надійність розробленої кіберфізичної інфраструктури та її готовність до масштабування для великої кількості одночасних користувачів без втрати швидкості обробки запитів.

## ВИСНОВКИ

Дана кваліфікаційна робота забезпечила автоматизацію процесу безперервного та неінвазивного моніторингу якості сну в домашніх умовах шляхом розроблення методу та архітектури кіберфізичної системи, що інтегрує об'єктивні біометричні дані з носимих пристроїв із суб'єктивними клінічними показниками. Завдяки використанні периферійних обчислень на базі контролера ESP32-S3 та математичного моделювання тижневої динаміки у формі матриці *WSQD*, було реалізовано замкнений цикл зворотного зв'язку між пацієнтом та медичною інфраструктурою через систему medics.ua. Це дозволило трансформувати епізодичне спостереження на постійний діагностичний інструмент, здатний виявляти ранні ознаки апное, депресивних станів та серцево-судинних ризиків, одночасно підвищуючи конфіденційність даних та мінімізуючи вплив людського фактора на оцінку стану здоров'я.

Актуальність розроблення кіберфізичної системи моніторингу якості сну зумовлена стрімким зростанням кількості сомнологічних розладів та коморбідних станів, що виникають внаслідок хронічного стресу, гіподинамії та порушення циркадних ритмів у сучасному суспільстві. Традиційні методи діагностики, зокрема стаціонарна полісомнографія, попри високу точність, залишаються високовартісними, складними в організації та створюють незручності для пацієнта, що унеможлиблює проведення тривалого спостереження у природному домашньому середовищі. Створення інтелектуальної системи на базі доступних носимих пристроїв дозволяє подолати ці бар'єри, забезпечуючи лікарів об'єктивною доказовою базою для раннього виявлення патологій, які часто ігноруються пацієнтами на початкових етапах.

Впровадження такої системи має стратегічне значення для переходу від реактивної моделі медицини до превентивної, де фокус зміщується на випередження розвитку серйозних ускладнень, таких як інсульт, депресивні розлади та когнітивні порушення. Автоматизація збору й аналізу біометричних сигналів за допомогою периферійних обчислень дозволяє не лише розвантажити

медичний персонал, а й забезпечити пацієнтам безперервний контроль за станом здоров'я без зміни їхнього звичного способу життя. Це створює умови для персоналізованої реабілітації та суттєвого зниження ризику летальних наслідків через вчасне сповіщення про критичні зміни фізіологічних показників, що є критично важливим в умовах сучасного темпу життя.

В роботі проведено всебічний аналіз відомих методів та технологічних рішень для моніторингу якості сну, що дозволило систематизувати сучасні підходи від стаціонарних клінічних систем до гнучких кіберфізичних рішень. Досліджено функціональні можливості існуючих розробок на базі Інтернету речей, периферійних обчислень та штучного інтелекту, зокрема використання мереж Ві-GRU та GAN для стадіювання сну безпосередньо на пристроях. Особливу увагу приділено порівнянню контактних методів, таких як портативна електроенцефалографія, із безконтактними рішеннями у вигляді UWB-радарів та розумних ліжок, що дало змогу виявити їхні ключові переваги та недоліки в умовах домашнього середовища.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір критично важливих параметрів моніторингу, які відображають стан нервової, серцево-судинної та дихальної систем організму. До переліку базових показників включено індекс фрагментації сну *SFI*, тривалість відпочинку *SD*, фазову структуру *DS* та *LS*, а також гемодинамічні параметри – частоту серцевих скорочень *HR*, варіабельність ритму *RMSSD*, рівень сатурації киснем *BOS* та частоту дихання *RR*. Результатом розділу став висновок про необхідність розроблення гібридного методу, який поєднує ці об'єктивні біомаркери з валідованими клінічними індексами *PSQI* та *BDI-II* для забезпечення ранньої діагностики коморбідних розладів.

У дослідженні також було здійснено обґрунтований вибір апаратно-програмних компонентів, що стали фундаментом для побудови надійної кіберфізичної системи моніторингу якості сну. На основі аналізу предметної галузі було сформовано перелік базових сомнологічних показників. Особливу увагу приділено інтеграції цих даних із клінічними індексами *PSQI* та *BDI-II*, що дозволяє створити багатовимірний профіль здоров'я пацієнта для діагностики депресивних станів та серцево-судинних ризиків.

Для реалізації середнього рівня системи, що виконує роль інтелектуального шлюзу, було обрано мікроконтролер ESP32-S3, який продемонстрував найкращий баланс між обчислювальною потужністю та енергоефективністю порівняно з іншими платформами. Завдяки двоядерній архітектурі та апаратній підтримці векторних інструкцій, цей контролер забезпечує швидку обробку біометричних сигналів безпосередньо «на периферії», що критично важливо для стабілізації сну та фільтрації шумів у реальному часі. Вибір даної платформи також зумовлений наявністю вбудованих засобів криптографічного захисту, що гарантує конфіденційність персональних медичних даних пацієнта.

Заключним етапом розділу стало проєктування комунікаційної інфраструктури системи з використанням комбінованого підходу до передачі даних. Для збору інформації з носимих пристроїв обрано протокол Bluetooth Low Energy (BLE) через його здатність забезпечувати тривалу автономну роботу гаджетів під час нічного моніторингу. Для трансляції агрегованих матриць показників у хмарне сховище обґрунтовано використання протоколу MQTT, який завдяки трьом рівням якості обслуговування (QoS) гарантує доставку критично важливих повідомлень про десатурацію або зупинки дихання навіть у нестабільних мережах.

В результаті дослідження було розроблено метод та алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну, що базується на безперервному циклі збору, фільтрації та інтелектуального аналізу мультимодальних сигналів. Метод передбачає інтеграцію об'єктивних параметрів життєдіяльності, таких як індекс фрагментації *SFI*, тривалість сну *SD*, фазова структура *DS* та *LS*, гемодинамічні показники *HR* і *RMSSD*, сатурація *BOS* та частота дихання *RR*, із суб'єктивними клінічними індексами *PSQI* та *BDI-II*. Процес моніторингу включає етапи реєстрації пацієнта, верифікації лікаря через систему *medics.ua* та підвантаження електронної медичної картки для забезпечення контекстуальності діагностики на основі попереднього анамнезу.

Ключовою науковою новизною розділу є впровадження математичного моделювання тижневої динаміки сну у формі матриці *WSQD* розміром 7 x 8. Ця

структура дозволяє систематизувати щоденні показники за повний тижневий цикл, трансформуючи розрізнені дані у впорядкований масив, придатний для виявлення стійких патернів та відхилень від референтних значень. Такий підхід забезпечує високу швидкість автоматизованої перевірки стану пацієнта, оскільки алгоритм порівнює кожен елемент матриці з індивідуальними нормами, що дозволяє диференціювати тимчасові розлади від хронічних патологій, таких як депресія або апное.

Розроблений алгоритм реалізує трирівневу обробку інформації, де на периферійному рівні контролера ESP32-S3 виконується усунення шумів та артефактів руху, а на верхньому рівні проводиться інтелектуальна оцінка та формування зворотного зв'язку. Система автоматично ідентифікує конкретні проблеми зі здоров'ям у разі виходу показників за межі норми та ініціює миттєве сповіщення лікаря через MQTT-брокер. Результатом функціонування алгоритму є створення єдиного інформаційного простору, що забезпечує автоматичне документування стану в електронній медичній картці та візуалізацію динаміки показників у мобільному застосунку, перетворюючи систему на активний інструмент превентивної медицини.

В роботі також проведено практичну апробацію розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну, що дозволило підтвердити ефективність запропонованого методу в реальних умовах експлуатації. Основна увага була приділена перевірці працездатності трирівневої архітектури, де контролер ESP32-S3 успішно виконував роль інтелектуального шлюзу, забезпечуючи стабільну фільтрацію шумів та обчислення біометричних показників на периферійному рівні. В ході експериментів було продемонстровано надійність передачі даних через протоколи BLE та MQTT, а також успішну інтеграцію системи з медичною платформою medics.ua для автоматичного заповнення електронних медичних карток пацієнтів.

Експериментальні дослідження на конкретних прикладах функціонування системи підтвердили її здатність до точної ідентифікації станів здоров'я: від високої якості сну без відхилень до виявлення критичних маркерів патологій. Зокрема, було

доведено ефективність алгоритму у фіксації епізодів десатурації та фрагментації для діагностики обструктивного апное сну, а також у виявленні специфічних змін архітектури сну, що вказують на розвиток депресивних розладів. Апробація показала, що використання матричного моделювання тижневої динаміки *WSQD* у поєднанні з клінічними опитувальниками *PSQI* та *BDI-II* забезпечує високу діагностичну цінність системи та дозволяє лікарю оперативно реагувати на негативні тренди у стані пацієнта.

У підсумку, результати повністю підтвердили висунуту наукову гіпотезу про ефективність поєднання кіберфізичних технологій з інтелектуальними методами аналізу якості сну. Створена система демонструє високу діагностичну цінність, економічну доступність та легкість у використанні, що робить її перспективною для впровадження в сучасну практику сімейної медицини та спортивної реабілітації. Успішна апробація на конкретних прикладах апное та депресії дає підстави рекомендувати розроблений метод для широкого застосування як засобу превентивного контролю за здоров'ям населення.

*Наукова новизна отриманих результатів:* розроблено метод моніторингу якості сну, що відрізняється від існуючих аналогів поєднанням об'єктивних даних з носимих пристроїв із суб'єктивними показниками клінічних опитувальників *PSQI* та *BDI-II* та забезпечує оперативне реагування на виявлені порушення, автоматизований зв'язок між пацієнтом та його сімейним лікарем у разі фіксації проблем, що можуть вказувати на депресію, апное або серцево-судинні ризики.

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу якості сну, яка дозволяє не лише збирати щоденні параметри, а й верифікувати дані пацієнта через медичні системи, забезпечуючи підвантаження актуальної електронної медичної картки.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

1) Говорущенко Т.О., Роюк Р.В., Питляк М.С., Говорущенко О.О. Метод моніторингу якості сну. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2026. №1. С. \_\_\_\_\_.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

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  $\alpha$ -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 Measure Métrologie*. 2024. Vol. 23, no. 6. P. 431–440. URL: <https://doi.org/10.18280/i2m.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>.

26. Use of remote monitoring and integrated platform for the evaluation of sleep quality in adult-onset idiopathic cervical dystonia / G. A. Bailey et al. *Journal of Neurology*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11490-4>.

27. Hareva D. H., Senjoyo J., Lazarusli I. A. Sleep Quality Monitoring based on Sleep Stage, Vital Sign, and PSQI. *2023 7th International Conference on New Media Studies (CONMEDIA)*, Bali, Indonesia, 6–8 December 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/conmedia60526.2023.10428167>.

28. Impact of 6 months' Use of Intermittently Scanned Continuous Glucose Monitoring on Habitual Sleep Patterns and Sleep Quality in Adolescents and Young Adults with Type 1 Diabetes and High-Risk HbA1c / S. Rose et al. *Pediatric Diabetes*. 2023. Vol. 2023. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/1842008>.

29. Modified Bald Eagle Search Algorithm with Deep Learning-Driven Sleep Quality Prediction for Healthcare Monitoring Systems / R. Alabdan et al. *IEEE Access*. 2023. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3337647>.

30. Sleep Quality Monitoring IoT-Based Healthcare System / L.-W. Jiang et al. *2023 IEEE 5th Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS)*, Tainan, Taiwan, 2–4 June 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ecbios57802.2023.10218456>.

31. Monitoring Sleep and Scratch Improves Quality of Life in Patients with Atopic Dermatitis / K.-i. Yasuda et al. *Acta Dermato-Venereologica*. 2023. Vol. 103. P. adv11922. URL: <https://doi.org/10.2340/actadv.v103.11922>.

32. A Multi-wavelength Photoplethysmography System for Sleep Quality Monitoring / S. Nabavi et al. *2023 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, 6–8 January 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icce56470.2023.10043410>.

33. A Review on Deep Learning Algorithms for Sleep Quality Monitoring in Osteoporosis Patients / B. N et al. *2023 1st International Conference on Optimization*

*Techniques for Learning (ICOTL)*, Bengaluru, India, 7–8 December 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icotl59758.2023.10435351>.

34. Improving Sleep Quality Through an Arduino-Based Environment Sleep Monitoring System / C. Salvade et al. *IEEE EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Technologies*, Torino, Italy, 6–8 July 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/eurocon56442.2023.10199012>.

35. Wearables-Assisted Smart Health Monitoring for Sleep Quality Prediction Using Optimal Deep Learning / M. A. Hamza et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 2. P. 1084. URL: <https://doi.org/10.3390/su15021084>.

36. Van der Watt A. S. J., Dalvie N., Seedat S. Weekly telephone mood monitoring is associated with decreased suicidality and improved sleep quality in a clinical sample. *Psychiatry Research*. 2022. P. 114821. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2022.114821>.

37. Association of sleep quality with glycemic variability assessed by flash glucose monitoring in patients with type 2 diabetes / Y. Yang et al. *Diabetology & Metabolic Syndrome*. 2021. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13098-021-00720-w>.

38. Lachenmeier W., Lachenmeier D. W. Home Monitoring of Oxygen Saturation Using a Low-Cost Wearable Device with Haptic Feedback to Improve Sleep Quality in a Lung Cancer Patient: A Case Report. *Geriatrics*. 2022. Vol. 7, no. 2. P. 43. URL: <https://doi.org/10.3390/geriatrics7020043>.

39. Çiçekli E., Emre E. The effect of tension variability for sleep quality in headache patients: A Holter monitoring study. *Medicine*. 2022. Vol. 101, no. 30. P. e29876. URL: <https://doi.org/10.1097/md.00000000000029876>.

40. A low-cost IoT mobile system for sleep quality monitoring / A. L. M. Brandao et al. *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, Taipei, Taiwan, 6–8 July 2022*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/icce-taiwan55306.2022.9869091>.

41. Monitoring the Quality of Sleep Using a Smart Bracelet at Different Light Spectrum / N. Frcncík et al. *2022 IEEE 16th International Scientific Conference on*

*Informatics (Informatics)*, Poprad, Slovakia, 23–25 November 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/informatics57926.2022.10083398>.

42. Naser A., Lotfi A., Zhong J. Contactless sleep quality monitoring through thermal vision. *PETRA '22: The 15th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu Greece. New York, NY, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3529190.3534716>.

43. Skin-inspired wearable self-powered electronic skin with tunable sensitivity for real-time monitoring of sleep quality / O. Yue et al. *Nano Energy*. 2022. Vol. 91. P. 106682. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106682>.

44. Monitoring the Changing Patterns in Perceived Learning Effort, Stress, and Sleep Quality during the Sports Training Period in Elite Collegiate Triathletes: A Preliminary Research / Y.-H. Liao et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, no. 8. P. 4899. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19084899>.

45. Gan W., Dao M.-S., Zettsu K. Monitoring and Improving Personalized Sleep Quality from Long-Term Lifelogs. *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Osaka, Japan, 17–20 December 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/bigdata55660.2022.10020829>.

46. Monitoring and Predicting Occupant's Sleep Quality by Using Wearable Device OURA Ring and Smart Building Sensors Data (Living Laboratory Case Study) / E. Malakhatka et al. *Buildings*. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 459. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings11100459>.

47. Telemedicine during the SARS-Cov-2 pandemic lockdown: Monitoring stress and quality of sleep in patients with epilepsy / S. Olivo et al. *Epilepsy & Behavior*. 2021. Vol. 118. P. 107864. URL: <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2021.107864>.

48. Fotino K. A Quality Improvement Project for Monitoring Surgical Patients With Obstructive Sleep Apnea. *Clinical Nurse Specialist*. 2021. Vol. 35, no. 3. P. 147–155. URL: <https://doi.org/10.1097/nur.0000000000000589>.

49. Kim J.-Y., Chu C.-H., Kang M.-S. IoT based Unobtrusive Sensing for Sleep Quality Monitoring and Assessment. *IEEE Sensors Journal*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3022915>.
50. Kuramoto K., Kumagai S. An IoT-Based Intelligent Sleep Quality Monitoring System. *2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Kyoto, Japan, 12–15 October 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/gcce53005.2021.9621354>.
51. Sleep Quality Monitoring with Human Assisted Corrections / I. Konstantoulas et al. *2nd International Workshop on Smart, Personalized and Age-Friendly Working Environments*, Valletta, Malta, 25–27 October 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.5220/0010727100003063>.
52. An approach for continuous sleep quality monitoring integrated in the SmartWork system / I. Konstantoulas et al. *2020 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, Seoul, Korea (South), 16–19 December 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/bibm49941.2020.9313527>.
53. Sleep quality impairments in schizophrenia and bipolar affective disorder patients continue during periods of remission: a casecontrolled study / Y. Hacimusalar et al. *Sleep Science*. 2022. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.5935/1984-0063.20210036>.
54. IoT System for Sleep Quality Monitoring using Ballistocardiography Sensor / N. Surantha et al. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. Vol. 11, no. 1. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2020.0110126>.
55. Subjective Sleep Quality Monitoring with the Hypnos Digital Sleep Diary: Evaluation of Usability and User Experience / T. Văcărețu et al. *12th International Conference on Health Informatics*, Prague, Czech Republic, 22–24 February 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.5220/0007407601130122>.
56. IoT Healthcare: Design of Smart and Cost-Effective Sleep Quality Monitoring System / K. Saleem et al. *Journal of Sensors*. 2020. Vol. 2020. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/8882378>.

57. Chen J.-R., Vision-based Sleep Monitoring System : Thesis. 2013. URL: <http://ndltd.ncl.edu.tw/handle/45359085932998376259>.
58. Huang Y., Xiao B., Liang L. Sleep Quality Assessment of the Elderly Based on Intelligent Mattress Monitoring Data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1237. P. 022156. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/2/022156>.
59. A Lightweight and Affordable Sleep Quality Monitoring and Visualization System with a GSR Sensor for Users in Rural Areas to Facilitate Tele-Health / Y. Du et al. *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Healthcare Applications*. Cham, 2019. P. 41–49. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22219-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22219-2_3).
60. Ferster M. L., Lustenberger C., Karlen W. Configurable Mobile System for Autonomous High-Quality Sleep Monitoring and Closed-Loop Acoustic Stimulation. *IEEE Sensors Letters*. 2019. Vol. 3, no. 5. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/lens.2019.2914425>.
61. The Effects of Ambulatory Blood Pressure Monitoring on Sleep Quality in Men and Women With Hypertension: Dipper vs. Nondipper and Race Differences / A. Sherwood et al. *American Journal of Hypertension*. 2018. Vol. 32, no. 1. P. 54–60. URL: <https://doi.org/10.1093/ajh/hpy138>.
62. Measuring Sleep Quality and Efficiency With an Activity Monitoring Device in Comparison to Polysomnography / M. Spielmanns et al. *Journal of Clinical Medicine Research*. 2019. Vol. 11, no. 12. P. 825–833. URL: <https://doi.org/10.14740/jocmr4026>.
63. Which parameters to use for sleep quality monitoring in team sport athletes? A systematic review and meta-analysis / J. G. Claudino et al. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*. 2019. Vol. 5, no. 1. P. bmjsem–2018–000475. URL: <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2018-000475>.
64. Sleep Pattern Monitoring and Analysis to Improve the Health and Quality of Life of People / R. V. S. N. Y. Sainath et al. *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Bangalore, 19–22 September 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/icacci.2018.8554930>.

65. An IoT-based smart pillow for sleep quality monitoring in AAL environments / A. Veiga et al. *2018 Third International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, Barcelona, 23–26 April 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/fmec.2018.8364061>.
66. Løberg F., Goebel V., Plagemann T. Quantifying the Signal Quality of Low-cost Respiratory Effort Sensors for Sleep Apnea Monitoring. *MM '18: ACM Multimedia Conference*, Seoul Republic of Korea. New York, NY, USA, 2018. URL: <https://doi.org/10.1145/3264996.3264998>.
67. Wireless Wearable Magnetometer-Based Sensor for Sleep Quality Monitoring / S. Milici et al. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, no. 5. P. 2145–2152. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2791400>.
68. A lightweight sensing platform for monitoring sleep quality and posture: a simulated validation study / R. M. Kwasnicki et al. *European Journal of Medical Research*. 2018. Vol. 23, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40001-018-0326-9>.
69. Quality of an ambulatory monitoring technique for diagnosing obstructive sleep apnea under conditions of limited resources / M. d. C. Hernández-Bendezú et al. *Sleep Science*. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 269–273. URL: <https://doi.org/10.5935/1984-0063.20180042>.
70. Investigating the application of motion accelerometers as a sleep monitoring technique and the clinical burden of the intensive care environment on sleep quality: study protocol for a prospective observational study in Australia / L. J. Delaney et al. *BMJ Open*. 2018. Vol. 8, no. 1. P. e019704. URL: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019704>.
71. Evaluation of a Multichannel Non-Contact ECG System and Signal Quality Algorithms for Sleep Apnea Detection and Monitoring / I. Castro et al. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 577. URL: <https://doi.org/10.3390/s18020577>.
72. Effectiveness of a mobility monitoring system included in the nursing care process in order to enhance the sleep quality of nursing home residents with cognitive impairment / H. Gattinger et al. *Health and Technology*. 2016. Vol. 7, no. 2-3. P. 161–171. URL: <https://doi.org/10.1007/s12553-016-0168-9>.

73. Surantha N., Kusuma G. P., Isa S. M. Internet of things for sleep quality monitoring system: A survey. *2016 11th International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems (KICSS)*, Yogyakarta, Indonesia, 10–12 November 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/kicss.2016.7951426>.
74. Development of sleep monitoring system for observing the effect of the room ambient toward the quality of sleep / W. H. M. Saad et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 210. P. 012050. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/210/1/012050>.
75. An Internet of Things-Based Home Telehealth System for Smart Healthcare by Monitoring Sleep and Water Usage: A Preliminary Study / Z. Tang et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 17. P. 3652. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12173652>.
76. Mohd Saad W. H. Preliminary study on sleep monitoring system configuration toward an optimal ambient condition setting on the quality of sleep. *Asian Journal Of Medical Technology*. 2021. Vol. 1, no. 1. P. 60–72. URL: <https://doi.org/10.32896/ajmedtech.v1n1.60-72>.
77. Kahveci A. Y., Alemdar H., Ersoy C. Sleep quality monitoring with ambient and mobile sensing. *2015 23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Malatya, Turkey, 16–19 May 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/siu.2015.7129871>.
78. Multimodal Low-Invasive System for Sleep Quality Monitoring and Improvement / F. M. F. Lobato et al. *Internet of Things*. Cham, 2017. P. 223–242. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50758-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50758-3_9).
79. Validation of non-invasive monitoring device to evaluate sleep quality / E. J. Pino et al. *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, 25–29 August 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/embc.2015.7320242>.
80. Ambient Intelligence System for the Remote Monitoring and Control of Sleep Quality / C. Occhiuzzi et al. *Wearable Electronics Sensors*. Cham, 2015. P. 263–282. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18191-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18191-2_11).

81. A longitudinal, randomized, and prospective study of nocturnal monitoring in children and adolescents with epilepsy: Effects on quality of life and sleep / P. Borusiak et al. *Epilepsy & Behavior*. 2016. Vol. 61. P. 192–198. URL: <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.05.035>.
82. Parental sleep quality and continuous glucose monitoring system use in children with type 1 diabetes / Z. Landau et al. *Acta Diabetologica*. 2013. Vol. 51, no. 3. P. 499–503. URL: <https://doi.org/10.1007/s00592-013-0545-z>.
83. Brain and cognitive correlates of sleep fragmentation in elderly subjects with and without cognitive deficits / C. André et al. *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 142–150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dadm.2018.12.009>.
84. CrossFusionSleepNet: A multimodal deep learning model for automatic sleep stage classification / Y. Cao et al. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2026. Vol. 112. P. 108538. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2025.108538>.
85. Wearable Sleep Technology in Clinical and Research Settings / M. DE ZAMBOTTI et al. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2019. Vol. 51, no. 7. P. 1538–1557. URL: <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001947>.
86. Associations between Sleep Quality and Heart Rate Variability: Implications for a Biological Model of Stress Detection Using Wearable Technology / T. Chalmers et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, no. 9. P. 5770. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19095770>.
87. Validation of sleep measurement in a multisensor consumer grade wearable device in healthy young adults / J. C. Kanady et al. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. 2020. Vol. 16, no. 6. P. 917–924. URL: <https://doi.org/10.5664/jcsm.8362>.
88. Quantification of Differences in Sleep Measurement by a Wrist-Worn Consumer Wearable Compared to Research-Grade Accelerometry and Sleep Diaries of Female Adults in Free-Living Conditions / C. Hu et al. *Nature and Science of Sleep*. 2025. Volume 17. P. 1973–1983. URL: <https://doi.org/10.2147/nss.s530812>.

**ДОДАТОК А**  
(обов'язковий)

**КОПІЇ СТАТТІ У ФАХОВОМУ НАУКОВОМУ ВИДАННІ**

1) Говорущенко Т.О., Роюк Р.В., Питляк М.С., Говорущенко О.О. Метод моніторингу якості сну. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2026. №1. С. \_\_\_\_\_.

УДК 004.9

Т. О. ГОВОРУЩЕНКО<sup>1</sup>, Р. В. РОЮК<sup>2</sup>, М. С. ПИТЛЯК<sup>3</sup>, О. О. ГОВОРУЩЕНКО<sup>4</sup><sup>1,2,3</sup>Хмельницький національний університет, <sup>4</sup>Вінницький національний медичний університет ім. М. І. ПироговаORCID ID: 0000-0002-7942-1857<sup>1</sup>, 0009-0001-3149-8783<sup>3</sup>, 0000-0001-6583-5699<sup>4</sup>e-mail: [hovorushchenko@khmnu.edu.ua](mailto:hovorushchenko@khmnu.edu.ua)<sup>1</sup>, [roiuk@gmail.com](mailto:roiuk@gmail.com)<sup>2</sup>, [m.pytlyak@i.ua](mailto:m.pytlyak@i.ua)<sup>3</sup>, [govorushchenko@gmail.com](mailto:govorushchenko@gmail.com)<sup>4</sup>

## 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 високоартістичними 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 сформулювати 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 архітектури кіберфізичної системи, яка включає мобільні застосунки для пацієнта та лікаря, марку платформи 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.

Т. О. HOVORUSHCHENKO<sup>1</sup>, R. V. ROIUK<sup>2</sup>, M. S. PYTLYAK<sup>3</sup>, O. O. HOVORUSHCHENKO<sup>4</sup><sup>1,2,3</sup>Khmelnitskyi National University, <sup>4</sup>National Pirogov Memorial Medical Universit

## 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.

## Вступ

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'єктно-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 розряджання акумуляторів.

Моніторинг дихання в режимі реального часу є ключовим для оцінки розладів, пов'язаних зі сном, проте звичайні одноmodalні датчики стикаються з критичними обмеженнями в надійності в складних фізіологічних умовах. У роботі [16] представлено біоміметичну двомодальну платформу, що поєднує чутливий до тиску аерогель (TCMA) та чутливу до вологості плівку (TCMF), обидві виготовлені з нановолокон целюлози, окислених методом TEMPO (TOCNF), та композитів MXene. 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 (Піттсбурзький 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 пропрієтарних 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 (Піттсбурзький 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 Піттсбурзького 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  $\alpha$ -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 надширококутового (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 простирadlo 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 безпилівій 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 підкреслив 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 вмiло фіксує довгострокові часові залежності 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-радары, розумні ліжка з балістокардіографією або сенсорні простирадла. 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.

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, гіперзбудливість 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 $RMSSD > 40$ 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 $> 1^{\circ}\text{C}$ 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)

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.

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 ременями); 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  $SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{засальний час сну}} \cdot 100\%$ ;

тривалість сну за добу  $SD$  (години); глибокий сон  $DS$  (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://cbt-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  $7 \times 8$ , 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  $7 \times 8$ , 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  $7 \leq wsqd[i,2]$  ( $i=1..7$ )  $\leq 9$  та  $15 \leq wsqd[i,3]$  ( $i=1..7$ )  $\leq 25$  та  $50 \leq wsqd[i,4]$  ( $i=1..7$ )  $\leq 60$  та  $40 \leq wsqd[i,5]$  ( $i=1..7$ )  $\leq 60$  та  $wsqd[i,6]$  ( $i=1..7$ )  $\geq 40$  та  $wsqd[i,7]$  ( $i=1..7$ )  $\geq 95$  та  $12 \leq wsqd[i,8]$  ( $i=1..7$ )  $\leq 20$  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  $wsqd[i,2]$  ( $i=1..7$ )  $\leq 6$ , то в пацієнта є проблеми з дефіцитом тривалості сну, що можуть вказувати на тривожність, ризик серцево-судинних захворювань;

якщо  $wsqd[i,2]$  ( $i=1..7$ )  $\geq 10$ , 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, переважно, 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

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 замкненого 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.

### Література

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  $\alpha$ -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 Measure 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>.

## 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.
2. Gender specific associations and interactions of fat quality with sleep and mental health in the elderly / B. Ghosh et al. *Journal of Health, Population and Nutrition*. 2025.
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. Ghosh et al. *BMC Public Health*. 2025.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
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.
19. Monitoring Sleep Quality Through Low  $\alpha$ -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.
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.
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.
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.
23. Sleep Quality Index for Sensor Data in Eldercare Monitoring / K. K. Hasan et al. *Instrumentation Measure Métrologie*. 2024. Vol. 23, no. 6. P. 431–440.
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.
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.

Рецензия / Peer review:

Надрукована / Printed:

Рецензент: д.т.н., проф., профессор кафедры КИС ХНУ С. Г. Гнатчук

**ДОДАТОК Б**  
(обов'язковий)

**ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

# МЕТОД ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

Студент Роман РОЮК  
Керівник Світлана САЧЕНКО

- **Мета кваліфікаційної роботи** – автоматизація процесу моніторингу якості сну, зокрема, вимірювання індексу фрагментації сну за добу, тривалості сну за добу, тривалості глибокого сну, тривалості легкого сну, частоти серцевих скорочень уві сні, варіабельності серцевого ритму уві сні, насичення крові киснем уві сні, частоти дихання уві сні
- **Об'єкт дослідження** – процес автоматизації моніторингу якості сну
- **Предмет дослідження** – метод та кіберфізична система моніторингу якості сну

- **Наукова новизна отриманих результатів:** розроблено метод моніторингу якості сну, що відрізняється від існуючих аналогів поєднанням об'єктивних даних з носимих пристроїв із суб'єктивними показниками клінічних опитувальників PSQI та BDI-II та забезпечує оперативне реагування на виявлені порушення, автоматизований зв'язок між пацієнтом та його сімейним лікарем у разі фіксації проблем, що можуть вказувати на депресію, апное або серцево-судинні ризики.
- **Практична значущість отриманих результатів** полягає у реалізації кіберфізичної системи моніторингу якості сну, яка дозволяє не лише збирати щоденні параметри, а й верифікувати дані пацієнта через медичні системи, забезпечуючи підвантаження актуальної електронної медичної картки.

## Публікація

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б:

Говорущенко Т.О., Роюк Р.В., Питляк М.С., Говорущенко О.О. Метод моніторингу якості сну. [Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». 2026. №1. С. \\_\\_\\_\\_\\_.](#)

## АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- 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.
- 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.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

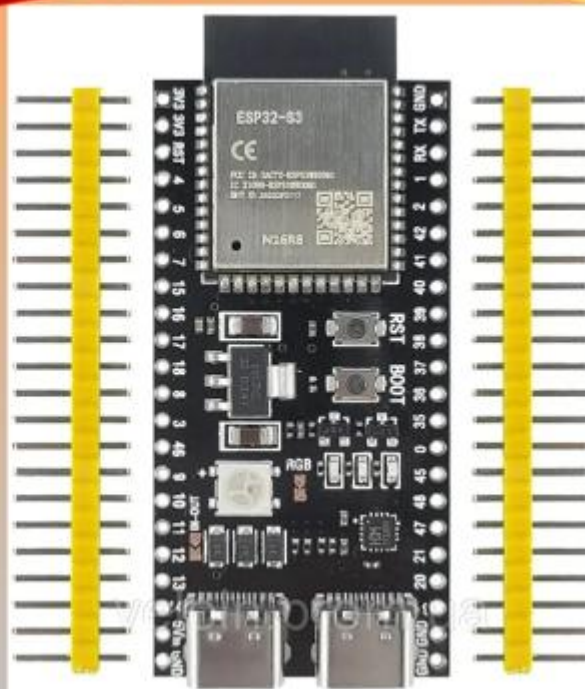
**Для розроблення кіберфізичної системи моніторингу якості сну слід розв'язати наступні задачі:**

- аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну;
- вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- розроблення методу функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- розроблення архітектури кіберфізичної системи моніторингу якості сну;
- проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи моніторингу якості сну.

## ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СНУ

Показник	Нормалні (референтні) значення	Значення, що вказують на проблеми	На які проблеми вказують відхилення
Фрагментація сну (індекс пробудження) ( <i>SFI</i> )	Менше 25%	Понад 25%	Депресивні стани, хронічний стрес, апное, синдром неспокійного сну
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
Частота серцевих скорочень (у ні сні) ( <i>HR</i> )	40-60 уд/хв (залежить від віку та тривожності)	Понад 60 уд/хв у стані спокою	Вегетативна дисфункція, перетренованість, серцева недостатність, інфекційні процеси
Варіабельність серцевого ритму ( <i>RMSSD</i> )	Висока (залежить середньосадиричне значення послідовних різниць <i>RMSSD</i> > 40 мс)	Низька (монотонний ритм)	Хронічний стрес, перетренованість, ризик раптової смертності серця, депресія
Насичення крові киснем ( <i>BO5</i> )	95-100%	Менше 95% (десатурація)	Обструктивне апное сну, гіпоксія, захворювання легень
Частота дихання ( <i>RF</i> )	12-20 циклів за хвилину	Менше 12 або понад 20	Дихальна недостатність, серцева декомпенсація, паничні атаки (у ні сні)

## СЕРЕДНІЙ РІВЕНЬ СИСТЕМИ – КОНТРОЛЕР



## МЕТОД МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ:

- 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 щодоби:  $SFI = \frac{\text{кількість нічних пробуджень}}{\text{тривалість сну}} \cdot 100\%$
- 6) попередня обробка даних (фільтрація шумів) та початкова аналітика даних;
- 7) накопичення показників за тиждень: динаміка тижневої якості сну WSQD – матриця розміром 7x8, 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) з отриманням індексу PSQI та BDI-II (опитувальник Бека) з отриманням індексу BDI;

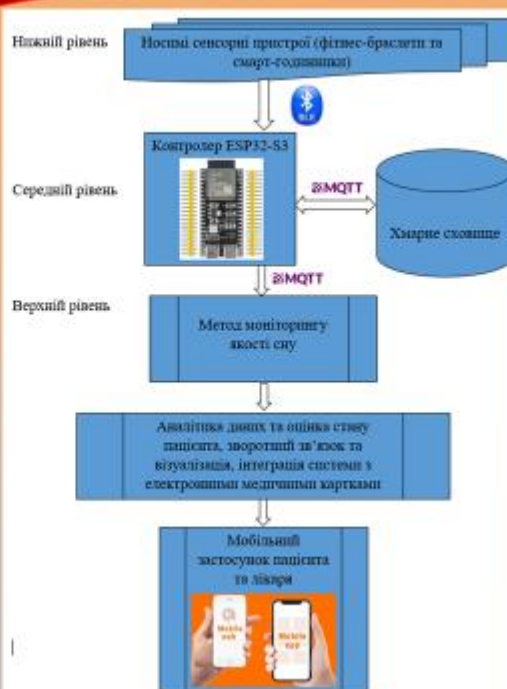
9) аналітика даних та оцінка стану пацієнта;

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;

11) 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;

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

## АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ



## ПРИКЛАД ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СНУ

<i>SFI</i>	<i>SD</i>	<i>DS</i>	<i>LS</i>	<i>HR</i>	<i>RMSSD</i>	<i>BOS</i>	<i>RR</i>
58.8	8.5	12	70	82	48	88	10
87.5	8	10	73	77	45	89	11
66.7	9	10	80	89	46	90	10
94.1	8.5	8	89	88	42	89	11
95.9	7.3	6	72	86	44	88	9
62.5	8	13	70	77	43	90	10
66.7	9	10	79	75	46	89	11

В мобільному застосунку пацієнта Ігоря відобразився денний та тижневий графіки його показників сну. В пацієнта Ігоря встановлені проблеми зі сном, тому були вжиті 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.

Система миттєво відправила через MQTT-брокер Push-повідомлення пацієнту Ігорю про підозру на апное та сповістила про це сімейного лікаря. Лікар, бачачи об'єктивні графіки в мобільному застосунку, призначив Ігорю термінову консультацію та додаткове обстеження (СІПАП-терапію). Дані про критичну десатурацію та фрагментацію автоматично були занесені в електронну медичну картку Ігоря у системі medics.ua. Мобільний застосунок також виконував нагадування пацієнту про запланований візит до сімейного лікаря та надавав поради щодо профілактики проблем зі сном (зокрема, з апное сну) в мобільному застосунку.

## ВИСНОВКИ

Дана кваліфікаційна робота забезпечила автоматизацію процесу безперервного та неінвазивного моніторингу якості сну в домашніх умовах шляхом розроблення методу та архітектури кіберфізичної системи, що інтегрує об'єктивні біометричні дані з носимих пристроїв із суб'єктивними клінічними показниками.

У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну.

У розділі 2 здійснений вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну.

У розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблені метод та алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну.

У розділі 4 спроектовано кіберфізичну систему моніторингу якості сну.

Зав. кафедри КІС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Роман РОЮК

---

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-24-2

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

20 квітня 2026 року



## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Роман РОЮК

**Співавтор:**

**Назва:** Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну

**Експерт:** Світлана САЧЕНКО

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 5.1%

**Коефіцієнт подібності 2:** 1.81%

**Мікропробіли:** 0

**Заміна букв:** 0

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2026-04-20 11:25:45.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

**Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.**

**Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.**

**Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.**

**Обґрунтування:**

2026-04-20

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

### КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну

Автор Роюк Роман Віталійович

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Саченко Світлана Іванівна, к.е.н., доцент

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

#### Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальнонавчаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

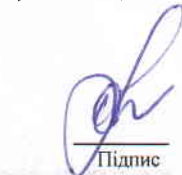
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5,10% і адресується до 39 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 17%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

20.04.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

  
Підпис

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег САВЕНКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Світлана САЧЕНКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Mon Apr 20 11:13:09 EEST 2026, Медзятий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

**Максимальне співпадіння з одним документом 17.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 15%**

ID: 270546 Назва: МКР Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну Додано в БД: 2026-04-20 Автора: Роман РОЮК Керівники: Світлана САЧЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	166901	935	30112 (18%)	203 (22%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269857	Назва: Звіт з НДП Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну Додано в БД: 2026-03-18 Автора: Роюка Р.В. Керівники: Саченко С.І. Консультанти: Опоненти:	28724 (17.0%)	183 (20.0%)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Роюк Роман Віталійович

Тема: Метод та кіберфізична система моніторингу якості сну

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки \_\_\_\_\_

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу моніторингу якості сну, зокрема, вимірювання індексу фрагментації сну за добу, тривалості сну за добу, тривалості глибокого сну, тривалості легкого сну, частоти серцевих скорочень уві сні, варіабельності серцевого ритму уві сні, насичення крові киснем уві сні, частоти дихання уві сні.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу якості сну. У розділі 2 здійснений вибір компонентів для кіберфізичної системи моніторингу якості сну. У розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблені метод та алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу якості сну. У розділі 4 спроектовано кіберфізичну систему моніторингу якості сну.

4. Позитивні сторони роботи: розроблення методу та архітектури кіберфізичної системи

5. Негативні сторони роботи: мало уваги приділено формалізації системи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з діючими стандартами оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на середньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: добре/В (85).

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

Бєдранюк Леонід Петрович, зав. каф 1173  
ХНУ

“22” квітня 2026 р.

 (підпис)