

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом»

КвРКІ.180114.18.01.16 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-22-1

Керівник доктор техн. наук, професор
Науковий ступінь, вчене звання

До захисту допускаю:
Зав. кафедри КІС, д.т.н., проф.
Т.О. Говорущенко

23 04 2024 р.



Підпис

Питляк М.С.

Ініціали, прізвище



Підпис

Говорущенко Т.О.

Ініціали, прізвище

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Т.О.Говорушенко

" 01 " 09 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ)

Питляку Максиму Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Керівник проекту (роботи) Говорушенко Т.О., д.т.н., професор

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

Затверджена наказом ректора університету від 01.01.2024 р. № 1

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом





Моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Метод та алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

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

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Лисенко С.М., професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Нічепорук А.О., доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	01.09.2023	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2023	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2023	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2023	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.204	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2024	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.204	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2024	виконано
9	Попередній захист кваліфікаційної роботи	29.04.2024	виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	До 15.05.2024	


Студент


Підпис

Питляк М.С.

Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи)


Підпис

Говорущенко Т.О.

Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Автор роботи: Питляк М.С, студент групи КІ2М-22-1.

Керівник роботи: Говорущенко Т.О., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем.

Пояснювальна записка: 116 с., 23 рис., 5 табл., 2 дод., 89 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: мобільна кіберфізична система, датчик рівня глюкози в крові Senseonics Eversense XL, бездротовий протокол передачі даних Bluetooth, моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, інвазивна мобільна кіберфізична система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Предметом дослідження є метод та кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, яка забезпечує пацієнтам можливість правильно регулювати своє захворювання та запобігати його ускладненням.

Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів. При проведенні моделювання процесу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом та при розробленні методів моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом використано теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше розроблено метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді мобільної кіберфізичної системи та забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним; формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю;

2) вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка відрізняється від відомих нижчою ціною, зручністю та простотою у використанні та носінні, компактним розміром та забезпечує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові, яка допомагає пацієнтам із цукровим діабетом стежити за рівнем цукру в крові, вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану, а також отримувати невідкладну допомогу в разі загрози настання гіпо- чи гіперглікемічної коми. Пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ	9
1.1 Аналіз інвазивних та неінвазивних методів та засобів моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	9
1.2 Кіберфізичні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	20
1.3 Висновки. Постановка задачі	24
2 МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ	26
2.1 Нижній та середній рівні мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	26
2.2 Моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.....	Помилка! Закладку не визначено.
2.3 Висновки	41
3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ	43
3.1 Метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	43
3.2 Алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	53
3.3 Висновки	58
4 МОБІЛЬНА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ	59
4.1 Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	59

4.2 Приклади функціонування мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом	64
4.3 Висновки	80
ВИСНОВКИ	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	87
ДОДАТОК А. Копія статті	96
ДОДАТОК Б. Презентація до захисту кваліфікаційної роботи	107

ВСТУП

Цукровий діабет – це хвороба ендокринної системи, яка характеризується недостатністю інсуліну або зниженням чутливості до нього через порушення роботи підшлункової залози. Це хронічне захворювання призводить до порушення всіх видів обміну речовин, підвищення рівня глюкози у крові і може спричинити ураження нервової системи, судин, органів та інших систем, а також виникнення інших захворювань (наприклад, інфаркт, інсульт, ниркова або печінкова недостатність, втрата зору, ангіопатія тощо). Цукровий діабет входить до числа лідерів серед причин смертності та інвалідності [1-3].

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, кількість людей, хворих на цукровий діабет, становила більше 537 мільйонів осіб у 2021 році, що складає 10% від світового населення. Прогнозується, що ця кількість зросте до 643 мільйонів до 2030 року і до 783 мільйонів до 2045 року [4]. Занепокіливою тенденцією є збільшення поширення діабету серед молодших людей. Якщо 20 років тому цукровий діабет переважно діагностувався у осіб старше 25 років, то зараз 15% хворих – це підлітки та діти до 20 років [4].

Люди, які страждають на цукровий діабет, повинні постійно стежити за своїм здоров'ям, зокрема, ретельно контролювати рівень глюкози в крові, оскільки як її різке підвищення, так і різке падіння можуть бути смертельно небезпечними, викликаючи гіпер- або гіпоглікемічну кому. Нормальний рівень глюкози в крові здорової людини зазвичай коливається від 4,0 до 6,0 ммоль/л. Якщо рівень глюкози опуститься нижче 2 ммоль/л, це може призвести до гіпоглікемічної коми. У той же час, якщо рівень глюкози перевищить 16,5 ммоль/л, існує ризик гіперглікемічної коми. Рівень глюкози між 2 і 4 ммоль/л вказує на наявність гіпоглікемії, а діапазон від 6 до 16,5 ммоль/л вказує на гіперглікемію.

Оскільки люди, які страждають на цукровий діабет, щоденно приймають препарати для зниження цукру в крові, а рівень глюкози може коливатися залежно від прийому їжі, емоційного стану та фізичних навантажень, то необхідно постійно контролювати його. Самостійна оцінка та дозування препаратів пацієнтами можуть

бути ненадійними і призводити до небажаних періодів підвищеного або заниженого рівня глюкози в крові. Для таких людей важливо постійно визначати рівень глюкози в крові, оскільки це допомагає контролювати захворювання і правильно регулювати дози ліків [5, 6].

У зв'язку з цим, важливо мати максимально точний та швидкий спосіб вимірювання рівня глюкози. Один із таких способів – мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, яка надає можливість постійно контролювати рівень глюкози у крові. Це найбільш ефективний спосіб контролю на сьогоднішній день, що дозволяє хворим на діабет керувати своїм станом і запобігати ускладненням [7-9].

Отже, безперервний моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, безперервний контроль за рівнем глюкози у крові, із використанням мобільної автоматичної кіберфізичної системи є *актуальною задачею*. Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, яка забезпечує пацієнтам можливість правильно регулювати своє захворювання та запобігати його ускладненням.

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

- 1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- 2) моделювання кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- 3) розроблення методу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- 4) розроблення архітектури мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Предметом дослідження є метод та кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше розроблено метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді мобільної кіберфізичної системи та забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним; формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю;

2) вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка відрізняється від відомих нижчою ціною, зручністю та простотою у використанні та носінні, компактним розміром та забезпечує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові, яка допомагає пацієнтам із цукровим діабетом стежити за рівнем цукру в крові, вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану, а також отримувати невідкладну допомогу в разі загрози настання гіпо- чи

гіперглікемічної коми. Пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів. При проведенні моделювання процесу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом та при розробленні методів моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом використано теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у закордонному науковому виданні, що індексується в наукометричній базі Scopus (додаток А), та взято участь у 6-th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine (November 17-19 2023, Bratislava, Slovakia):

1) Т. Новорущенко, М. Пятляк, О. Новорущенко, І. Паюнк, В. Осядлий, А. Боярчук. Mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring. CEUR-WS. 2023. Vol. 3609. Pp. 27-36.

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

1.1 Аналіз інвазивних та неінвазивних методів та засобів моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Цукровий діабет – це захворювання, яке характеризується підвищеним рівнем глюкози (цукру) у крові.

Симптоми цукрового діабету можуть включати часті сильні спрагу і сильний апетит, часте сечопускання, втому, збільшену сонливість, роздратованість, розмите зору та підвищений ризик інфекцій.

Лікування цукрового діабету включає дієту, фізичну активність, моніторинг рівня цукру в крові та, у разі потреби, призначення лікарських препаратів або інсуліну. Важливо також уникати факторів ризику, таких як надмірна вага, неправильне харчування та малорухливий спосіб життя.

На даний момент існує кілька типів цукрового діабету.

Цукровий діабет першого типу характеризується частковим або повним припиненням вироблення інсуліну підшлунковою залозою, спричиненим атакою та знищенням імунною системою клітин, що виробляють інсулін. Відомо, що цей тип діабету становить приблизно 10-15% від усіх випадків захворювання. Основний метод лікування полягає в інсулінотерапії [10].

Цукровий діабет другого типу – у цьому випадку клітини стають менш чутливими до інсуліну, що виробляється організмом, тому він не використовує його ефективно. Цей тип діабету, який набувається, зазвичай розвивається у людей похилого віку. Лікування включає прийом цукрознижуючих препаратів, рідше – інсулінових ін'єкцій, а також дотримання дієти [11-14].

Гестаційний діабет виникає у вагітних жінок, які до вагітності не мали проблем з цукровим діабетом. Зазвичай рівень глюкози нормалізується після пологів, але жінки, які страждають на гестаційний діабет, мають підвищений ризик розвитку цукрового діабету другого типу у майбутньому [15, 16].

Переддіабет – це передстадія розвитку цукрового діабету, коли на фізіологічному рівні вже спостерігаються критичні порушення, що призводять до поступового розвитку хвороби (зменшення вироблення інсуліну, порушення метаболізму глюкози тощо) [12, 15].

Інсулін – це гормон, що виробляється підшлунковою залозою, який дозволяє клітинам використовувати глюкозу для отримання енергії.

Цукровий діабет може призвести до серйозних ускладнень, таких як проблеми з серцем, нирками, очима та нервовою системою.

Характерною особливістю цукрового діабету є виникнення гіперглікемії або гіпоглікемії. Гіперглікемія відбувається, коли рівень глюкози в крові стає патологічно високим. Це може бути наслідком різних причин, таких як недостатня продукція інсуліну організмом, недостатність ефективності інсуліну або велика кількість вуглеводів у їжі. Гіперглікемія часто спостерігається у людей з цукровим діабетом, особливо якщо не здійснюється контроль рівня цукру в крові. Симптоми гіперглікемії можуть включати часте сечовиділення, спрагу, сильну сонливість, незвичайну втомленість, подразненість та інші. Тривале перебування в гіперглікемії може призвести до гіперглікемічної коми та інших серйозних проблем з функціонуванням організму. Лікування гіперглікемії може включати вживання інсуліну або інших лікарських препаратів для зниження рівня цукру в крові, а також корекцію дієти та фізичної активності. Важливо вчасно виявляти та лікувати гіперглікемію, оскільки вона може призвести до серйозних ускладнень, таких як діабетичний кетоацидоз або гіперосмолярний синдром.

Гіпоглікемія, навпаки, відбувається, коли рівень глюкози в крові стає патологічно низьким. Це може статися, коли людина з цукровим діабетом або без нього занадто довго голодує, перебуває на строгій дієті, надто активно займається фізичними вправами або вживає надто велику дозу лікарських препаратів для зниження рівня цукру в крові. Симптоми гіпоглікемії можуть включати слабкість, дратівливість, голод, довколишній світло-жовтий колір обличчя, потило, затуманення свідомості, плутанинність та навіть втрату свідомості. Цей стан супроводжується дезорієнтацією, відчуттям страху, тривогою, а також може

викликати аритмію, порушення уваги та координації, надлишкову пітливість [5]. У випадках серйозної гіпоглікемії може знадобитися негайна медична допомога. Тривале перебування в гіпоглікемії може спричинити гіпоглікемічну кому. Лікування гіпоглікемії включає прийом швидко засвоюваних вуглеводів, таких як фруктозний сік або цукор, або застосування глюкагону (якщо доступно) у важких випадках. Важливо вчасно розпізнати та лікувати гіпоглікемію, оскільки вона може призвести до серйозних наслідків, включаючи втрату свідомості та кому.

Дози інсуліну та інших препаратів для зниження цукру в крові зазвичай встановлюють лікарі, спеціалізовані в ендокринології або діабетології. Вони розробляють індивідуальний план лікування для кожного пацієнта з урахуванням його потреб, стану здоров'я, рівня цукру в крові та інших факторів. Проте саме на пацієнтів з цукровим діабетом щодня або декілька разів на день покладається відповідальність за правильність, вчасність та частоту прийому інсуліну, набір потрібної дози інсуліну або інших препаратів для зниження цукру в крові. Оскільки рівень глюкози у крові може коливатись в залежності від прийому їжі, емоційного стану та фізичних навантажень, хворим на цукровий діабет рекомендується вимірювати рівень глюкози перед кожним прийомом інсуліну або іншого препарату для зниження цукру в крові. Завдяки глюкометрам та системам моніторингу рівня глюкози в крові, які можна використовувати безпосередньо користувачем, стало можливим проводити такі вимірювання безпосередньо вдома, без участі фахівця або лікаря [17-20]. Системи моніторингу рівня глюкози в крові допомагають пацієнтам з цукровим діабетом контролювати їхній рівень глюкози в крові, щоб уникнути гіпоглікемії або гіперглікемії та забезпечити оптимальне управління цукровим діабетом. Ці системи дозволяють пацієнтам з цукровим діабетом відстежувати динаміку рівня глюкози в крові протягом дня, включаючи вимірювання вночі, без необхідності проведення окремих тестів крові.

На ринку доступні різні типи глюкозних моніторів, включаючи безперервні монітори глюкози, які в режимі реального часу надають точну інформацію про рівень глюкози в крові. Монітори рівня глюкози в крові поділяються на два типи: інвазивні і неінвазивні (рис. 1) [21-25].

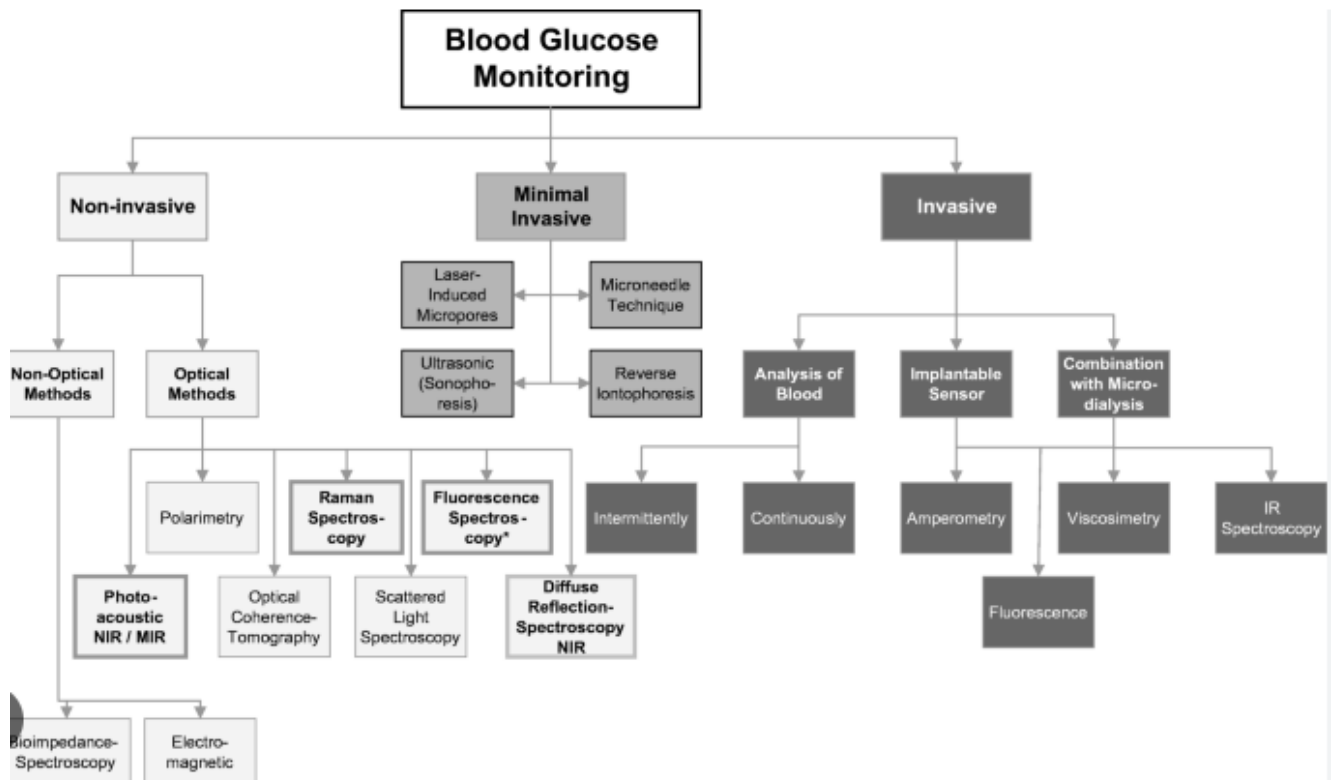


Рисунок 1.1 – Монітори рівня глюкози в крові [21]

Інвазивна система моніторингу рівня глюкози в крові використовується для постійного та точного вимірювання цукру у пацієнтів із цукровим діабетом. Безперервні глюкозні монітори регулярно визначають рівень глюкози кожні декілька хвилин за допомогою спеціального датчика, що встановлюється під шкіру, зазвичай у шиї, животі або плечі [26-28]. Інформація з датчика може передаватися безпосередньо на зовнішній пристрій або може бути зчитана за допомогою спеціального зчитувача, який накладається на шкіру над сенсором. Системи моніторингу глюкози надають дані про тенденції збільшення або зменшення рівня цукру, про динаміку його змін у крові, що допомагає пацієнтові контролювати рівень глюкози шляхом відповідного регулювання дози цукрознижуючого препарату та змін у раціоні харчування.

До переваг інвазивного моніторингу рівня глюкози в крові належать: неперервна доступність інформації про рівень глюкози, що дозволяє вести моніторинг за її динамікою та реагувати на будь-які відхилення вчасно; допомога у прийнятті ефективних рішень щодо харчування, активності та дози

цукрознижуючих препаратів, завдяки спостереженню їх впливу на рівень глюкози в крові [29, 30].

Однак, інвазивний моніторинг має й обмеження: високі витрати на придбання комерційних глюкозних інвазивних моніторів; можливість похибок у вимірюванні; необхідність правильного догляду та технічного обслуговування глюкозного монітору, що включає регулярну заміну датчиків та інші процедури; ризик ускладнень та можливість інфекцій при використанні підшкірного датчика; вплив різноманітних зовнішніх факторів на точність результатів моніторингу [29, 30].

Інвазивні глюкозні монітори поділяються на два типи: постійні глюкозо-моніторингові системи (системи, які безперервно вимірюють рівень глюкози в міжклітинній рідині за допомогою сенсора, встановленого під шкірою, автоматично передають дані про рівень цукру в крові на монітор або смартфон пацієнта, за допомогою чого можуть бути корисними для встановлення трендів рівня глюкози, ідентифікації паттернів та оцінки ефективності лікування цукрового діабету, можуть допомогти пацієнтам та їхнім лікарям приймати більш обґрунтовані рішення щодо корекції доз інсуліну або інших лікарських засобів) – рис. 1.2 [29], або миттєві (флеш) глюкозо-моніторингові системи (вимірюють рівень глюкози в крові за допомогою датчика, встановленого під шкірою, і можуть бути активовані пацієнтом для отримання результатів в будь-який час; можуть автоматично вимірювати рівень глюкози протягом усього дня, включаючи нічний час, без необхідності втручання пацієнта; забезпечують швидке і зручне вимірювання глюкози, дозволяючи пацієнтам більш точно контролювати свої рівні цукру в крові протягом дня; корисні для тих, хто хоче відстежувати свої рівні глюкози без зайвих зусиль; можуть допомогти виявити патерни та тренди рівня глюкози, що допоможе пацієнтам і їхнім лікарям в управлінні цукровим діабетом, оскільки забезпечують постійний моніторинг індивідуальної реакції на харчування, фізичну активність, ліки та інші фактори, що впливають на рівень глюкози в крові) – рис. 1.3 [30].



Рисунок 1.2 – Постійні глюкозо-моніторингові системи на базі інвазивного методу [29]

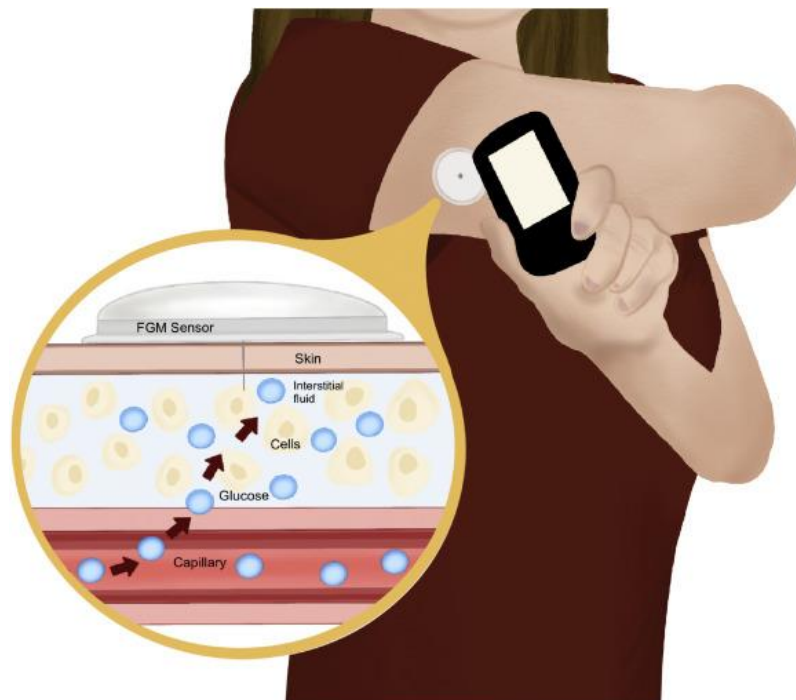


Рисунок 1.3 – Миттєва глюкозо-моніторингова система на базі інвазивного методу [30]

Неінвазивний моніторинг рівня глюкози у крові також може бути використаний для постійного контролю, проте він не передбачає вживлення датчика у організм. Неінвазивний моніторинг передбачає вимірювання глюкози зовнішніми пристроями. Однак, на сьогоднішній день методи та засоби неінвазивного моніторингу рівня глюкози у крові ще не мають такої надійності та точності, як методи та засоби інвазивного моніторингу [31-34].

Існує ряд пристроїв та алгоритмів неінвазивного моніторингу рівня глюкози у крові [31-38] – рис. 1.4, рис. 1.5.

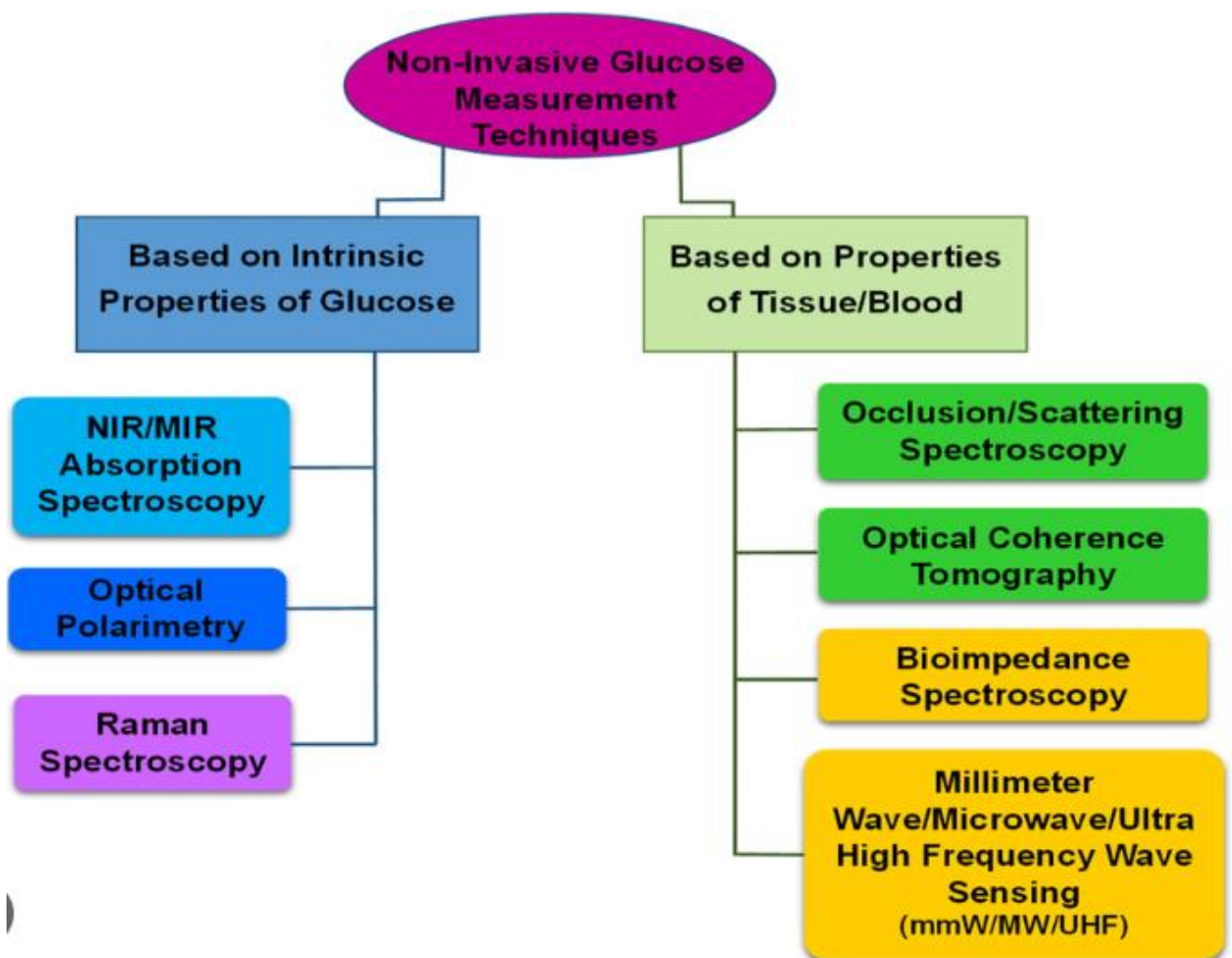


Рисунок 1.4 – Неінвазивні монітори рівня глюкози в крові [39]

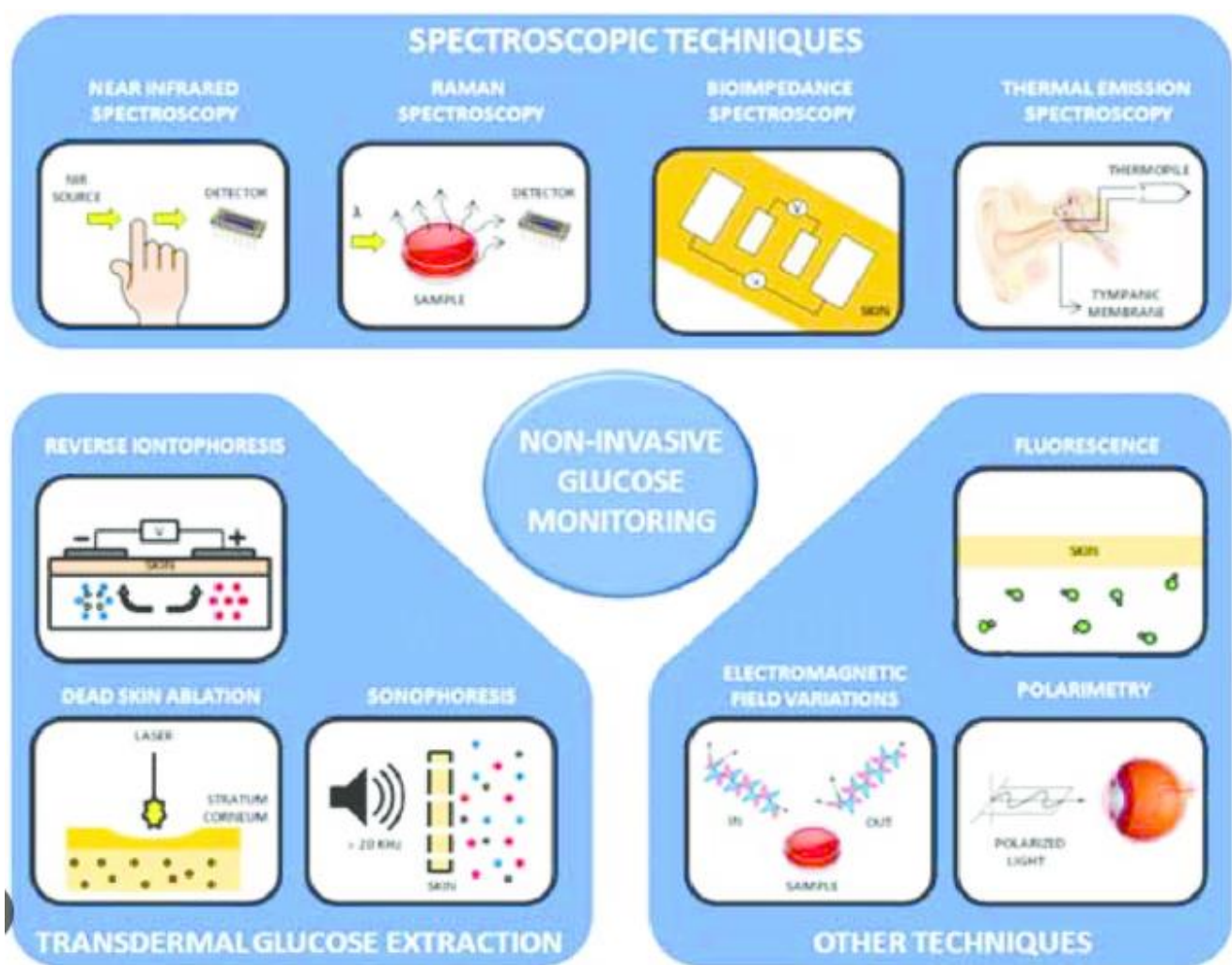


Рисунок 1.5 – Технології, що лежать в основі неінвазивних моніторів рівня глюкози в крові [40]

Типи неінвазивних глюкозних моніторів [31-34]:

1) глюкозний монітор на основі спектроскопії ближнього інфрачервоного світла – відомо, що світлові властивості тканин змінюються в залежності від рівня глюкози, тому для визначення рівня глюкози проводиться аналіз поглинання або відбиття інфрачервоного світла тканинами (рис. 1.6 [35]);

2) глюкозний монітор на основі електрохімічних сенсорів – для вимірювання рівня глюкози в крові використовуються електроди, які реагують з глюкозою, що міститься в крові, що приводить до генерації електричного сигналу, який далі вимірюється; однак інші речовини можуть також впливати на ці результати, що зменшує точність вимірювання (рис. 1.7 [41]);

3) глюкозний монітор на основі оптичних датчиків – ця технологія ґрунтується на факті, що оптичні властивості крові змінюються залежно від рівня глюкози, тому для визначення змін у рівні глюкози в крові використовуються оптичні методи, такі як фотоплезмографія;

4) глюкозний монітор на основі безконтактних технологій – використовує радіохвильові або мікрохвильові технології для безконтактного вимірювання рівня глюкози в крові;

5) дихальний глюкозний монітор – аналізується взаємозв'язок між рівнем глюкози в крові та її концентрацією у видиханому повітрі людини; для цього методу необхідне використання спеціального обладнання для аналізу видиханого повітря (рис. 1.8 [36]);

6) інші глюкозні монітори – рис. 1.9 [38].



Рисунок 1.6 – Глюкозний монітор на основі спектроскопії ближнього інфрачервоного світла [35]

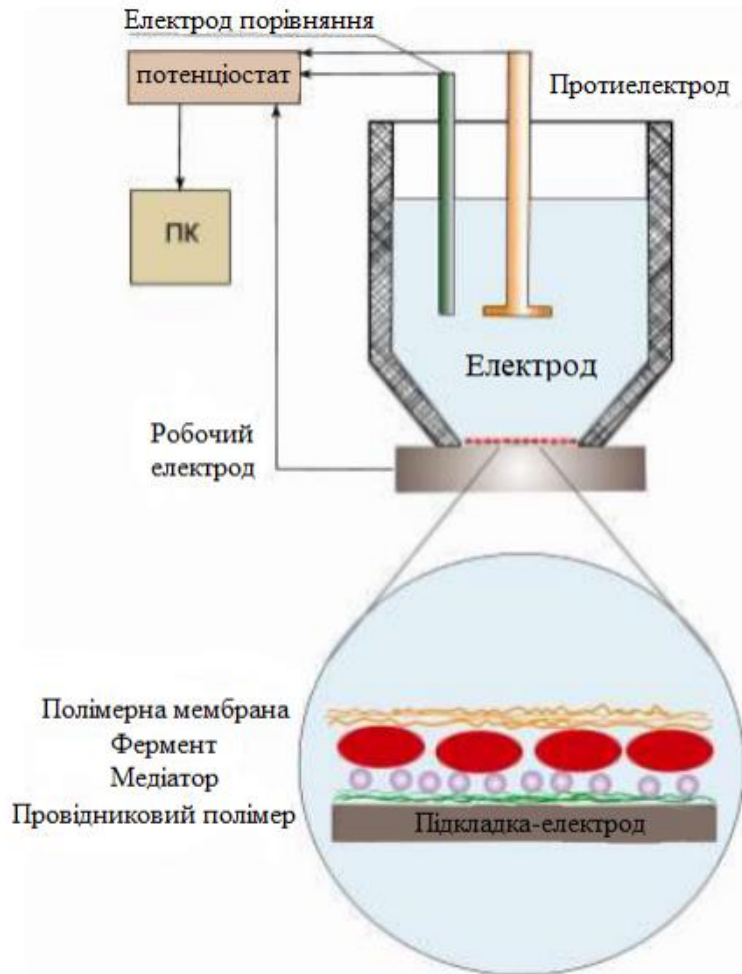


Рисунок 1.7 – Схема електрохімічного сенсору [41]

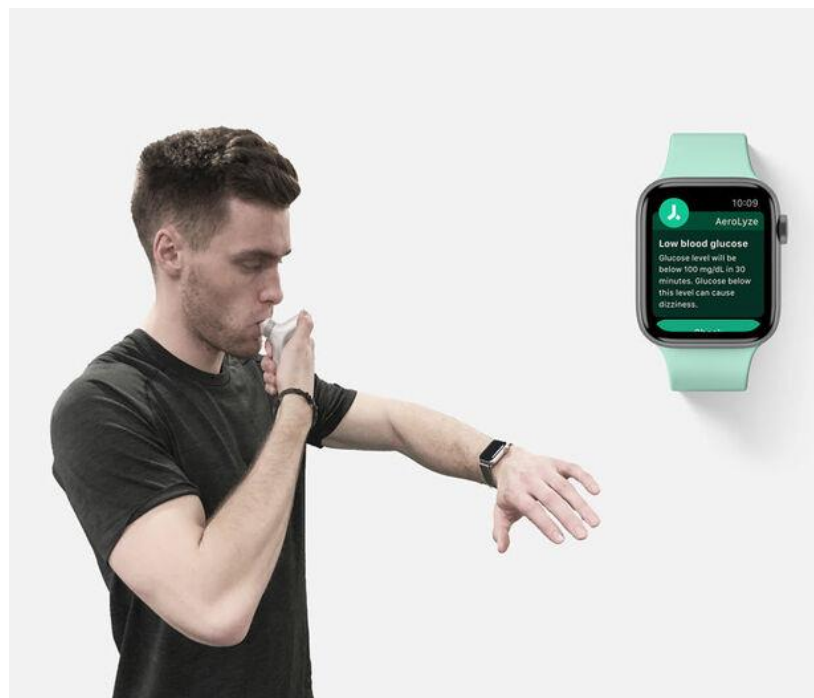


Рисунок 1.8 – Дихальний глюкозний монітор [36]

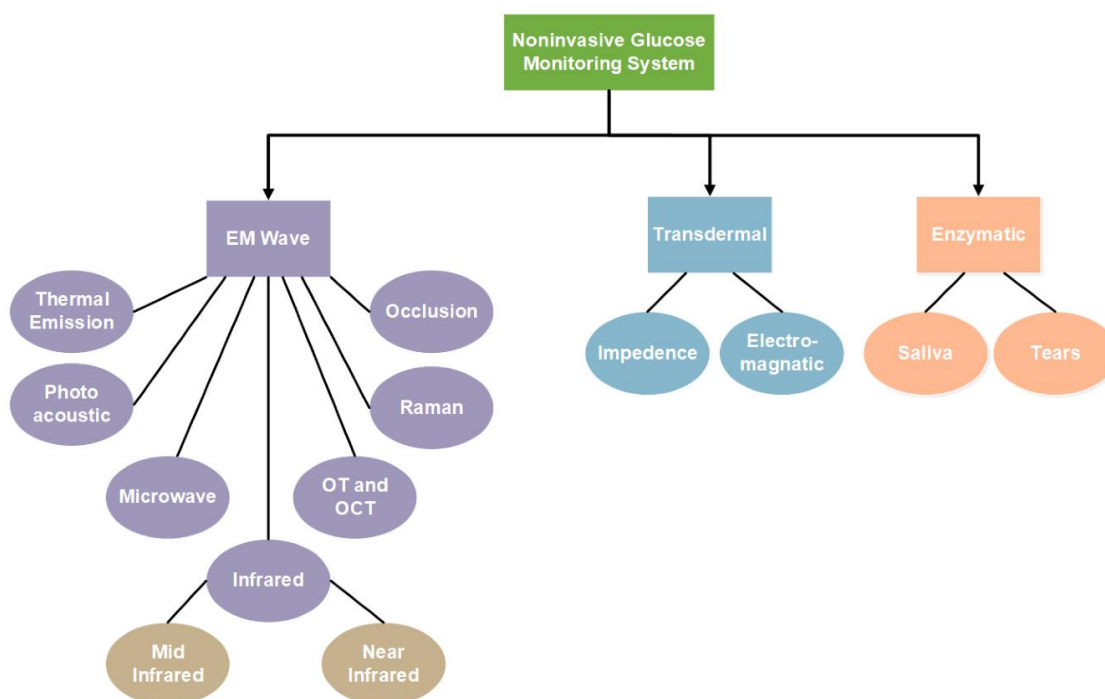


Рисунок 1.9 – Неінвазивні глюкозні монітори [38]

Очевидно, що на сьогоднішній день вчені та практики активно працюють над розробкою та вдосконаленням неінвазивних методів та засобів для вимірювання рівня глюкози в крові людини. Однак ці методи і засоби поки що не є настільки поширеними та розвинутими, як їх інвазивні аналоги.

Неінвазивні системи моніторингу глюкози мають ряд переваг для користувачів, зокрема:

- відсутність болю – не потрібно проколювати шкіру для вимірювання рівня глюкози в крові;
- зменшення ризику інфекцій – немає контакту з кров'ю та проколів шкіри;
- непомітність – легко заховуються, дозволяючи користувачам зберігати конфіденційність стосовно свого захворювання.

Незважаючи на великий потенціал неінвазивного моніторингу рівня глюкози в крові, більшість методів та засобів знаходяться лише на стадії дослідження та пілотного впровадження. Тому їхні надійність та точність ще потребують значних покращень. Основний напрямок розвитку полягає у створенні технологій, які забезпечують точний, зручний та безболісний постійний моніторинг рівня глюкози в крові.

1.2 Кіберфізичні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Кіберфізичні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів – це комплексні технологічні системи, які поєднують фізичні та кібернетичні компоненти для нагляду та аналізу стану здоров'я пацієнтів. Ці системи зазвичай використовують сенсори та збірники даних для збору інформації про різні фізіологічні параметри пацієнта, такі як температура тіла, артеріальний тиск, пульс, рівень глюкози тощо. Отримані дані передаються до централізованої системи, де їх обробляють та аналізують за допомогою алгоритмів штучного інтелекту чи інших методів аналізу даних для виявлення відхилень від норми та попередження можливих проблем зі здоров'ям пацієнта. Крім того, кіберфізичні системи моніторингу можуть надавати можливість взаємодії з медичним персоналом для надання рекомендацій або вжиття необхідних заходів в разі потреби.

Ці кіберфізичні системи можуть бути реалізовані у вигляді портативних пристроїв, які пацієнт може носити при собі або на собі, або вбудованими в різноманітні медичні пристрої та обладнання для автоматизованого моніторингу стану здоров'я в реальному часі. Основна мета таких систем полягає в тому, щоб надати пацієнтам та медичному персоналу доступ до надійних та зручних засобів моніторингу, які дозволять вчасно виявляти та втручатися у проблеми зі здоров'ям. Завдяки поєднанню фізичних та кібернетичних елементів, ці системи можуть ефективно слідкувати за станом здоров'я пацієнтів у реальному часі, що дозволяє підтримувати їхнє здоров'я на вищому рівні та запобігати можливим ускладненням.

Такі кіберфізичні системи використовують сенсори для збору даних про фізичну активність, пульс, кров'яний тиск, рівень кисню в крові та інші важливі параметри здоров'я. Зібрані дані можуть передаватися до хмарних обчислювальних центрів для аналізу та обробки, або оброблятися локально в самій системі. Важливою перевагою таких систем є їхня можливість надавати пацієнтам та медичному персоналу негайний доступ до важливої інформації про стан здоров'я, що сприяє оперативній реакції на будь-які зміни та дозволяє уникнути ускладнень.

Розглянемо відомі медичні кіберфізичні системи.

Так, стаття [42] обговорює ключові технології, які формують систему охорони здоров'я на основі Інтернету речей та виокремлює проблеми, які потрібно вирішити для забезпечення надійності таких систем.

Поступовий розвиток медичних пристроїв, підключених до Інтернету речей, сприяє зменшенню навантаження на сучасну систему охорони здоров'я, що дає можливість пацієнтам залишатися вдома під час лікування або реабілітації. У статті [43] розглядаються останні дослідження з використання Інтернету речей для моніторингу здоров'я та аналізується кілька потенційних варіантів використання цієї технології.

Стаття [44] досліджує можливості інтеперабельності медичних даних в хмарних медичних кіберфізичних системах та пропонує концептуальну основу для підтримки медичних працівників із зіставленням різних даних для аналізу, обміну та прийняття рішень.

Проблема безпеки даних у кіберфізичних системах є ключовою, оскільки доступ до них може здійснюватися з віддалених місць. Мета статті [45] полягає у наданні огляду проблем безпеки, вимог до безпеки та сучасних схем автентифікації у кіберфізичних системах для моніторингу здоров'я.

У роботі [46] створено фреймворк для обчислення та моніторингу стану здоров'я в кіберфізичних системах, використовуючи методи, що базуються на даних. Фреймворк містить чотири компоненти: збір даних та вилучення ознак, ідентифікація та оцінка стану в реальному часі, оцінка стану здоров'я та генерація попереджень для оператора.

У дослідженні [47] розроблено модуль для аналізу даних кіберфізичної системи централізованої охорони здоров'я, який спрямований на виявлення причин захворювань, дослідження нових патологій, автоматизацію моніторингу стану пацієнтів та віддалене лікування, а також надання актуальної інформації про захворювання та методи лікування для клінік централізованої охорони здоров'я, під'єднаних до кіберфізичної системи.

Стаття [48] пропонує механізм незалежного моніторингу стану як показника надійності системи, що визначає фактичні порушення обмежень та розраховує ймовірність порушень. Запропонований монітор стану здоров'я має дві складові: функції вимірювання стану здоров'я, які адаптовані до кожного компонента кіберфізичної системи, та імовірнісне визначення стану здоров'я, що впливає з методів байєсівської оцінки.

У статті [49] представлено архітектури та фреймворки медичних кіберфізичних систем, а також розглянуті методи моделювання, технології безпеки даних та інші аспекти, пов'язані з розвитком цих систем.

У своїй роботі [50] автори розглядають сучасний стан забезпечення якості обслуговування для віддалених медичних додатків, що базуються на Інтернеті речей, і вивчають проблеми, які важливі для задоволення потреб таких додатків у аналізі та висновках.

Автори [51] пропонують методологію кількісної оцінки надійності/готовності інфраструктури Інтернету медичних речей з використанням ієрархічної моделі трьох рівнів та досліджують тематичні аспекти цієї технології.

Розглянемо тепер відомі медичні кіберфізичні системи із цукровим діабетом.

Кіберфізичні системи з Інтернетом речей на основі штучного інтелекту лікарі можуть використовувати для виявлення таких захворювань у пацієнтів як діабет, хвороби серця та порушення ходи на основі штучного інтелекту. Кожна хвороба має різні симптоми у пацієнтів. Набір даних витягується з репозиторію Kaggle для виконання технології кіберфізичних систем з Інтернетом речей з використанням штучного інтелекту. Хмарне рішення Nightscout використовується для отримання даних про рівень глюкози в крові пацієнта, які постійно оновлюються завдяки комерційному натільному безперервному монітору глюкози [52-54].

Медична кіберфізична система контролю рівня глюкози в крові може складаєсь з трьох частин: системи безперервного моніторингу глюкози, інсулінової помпи та алгоритму управління замкнутим циклом. Система безперервного моніторингу глюкози та інсулінова помпа досягли значного прогресу за останні роки. Алгоритм керування замкненим контуром є життєво важливим і складним

для вивчення в цій системі з метою кращого контролю рівня глюкози та інсуліну в крові [55-57].

Вчені пропонують математичні моделі для відображення динаміки характеристик глюкози в крові (наприклад, залежної від часу фрактальної поведінки), що спостерігається в реальних вимірюваннях, за допомогою концепцій дробового числення. На основі такої фрактальної моделі, що залежить від часу, пропонуються апаратні архітектури для штучної підшлункової залози, яка ґрунтується на вирішенні обмеженої мультифрактальної задачі оптимального керування для регулювання ін'єкції інсуліну [58-61].

Близько 30%-40% пацієнтів з діабетом 1 типу використовують інсулінові помпи. Сучасні системи інфузійного введення інсуліну вимагають, щоб користувачі вручну вводили кількість вуглеводів у їжі та затверджували або змінювали запропоновану системою дозу інсуліну. Користувачі можуть вводити коригувальні дози інсуліну в будь-який час. Для аналізу та моделювання поведінки користувачів інсулінових pomp на основі клінічних даних використовуються методи машинного навчання для інтеграції моделі поведінки користувача з індивідуально параметризованою фізіологічною моделлю глюкози та імовірнісної перевірки моделі [62-65].

Безперервний моніторинг глюкози надає дані про короткострокову глікемічну варіабельність, яка асоціюється з несприятливими наслідками у людей з діабетом. Множинні показники глікемічної варіабельності вищі в осіб з предіабетом порівняно з особами без предіабету, і глікемічна варіабельність, як видається, обернено пропорційно пов'язана з функцією бета-клітин. На відміну від цього, глікемічна варіабельність не має чіткого зв'язку з чутливістю до інсуліну, жировою хворобою печінки, ожирінням, рівнем ліпідів у крові, артеріальним тиском або оксидативним стресом. Однак, глікемічна варіабельність може бути позитивно пов'язаний зі ступенем атеросклерозу та серцево-судинними подіями в осіб з ішемічною хворобою. Глікемічна варіабельність, підвищена при предіабеті, що потенційно пов'язано з дисфункцією бета-клітин, але менш чітко пов'язано з ожирінням або традиційними факторами ризику [66-70].

Моделі машинного навчання в поєднанні з безперервним моніторингом глюкози можуть допомогти ефективно аналізувати великі масиви даних глікемічних реакцій на їжу. Вхідними даними моделі є антропометричні характеристики людини, макроелементи та особливості, пов'язані з 24-годинним слідом глюкози, що передував прийому їжі. Вихід моделі складався з параметрів дзвоноподібного рівняння, яке використовується для аналітичного опису глікемічної реакції на їжу [71-73].

Оскільки поширеність діабету стрімко зростає, загалом зростає використання безперервного моніторингу глюкози, який є ефективним для покращення глікемічного контролю при діабеті [74-83].

1.3 Висновки. Постановка задачі

Людям, які страждають від цукрового діабету, необхідно постійно контролювати рівень глюкози у своїй крові. Оскільки вони самі визначають дози цукрознижуючих препаратів (включаючи частоту прийому та обчислення доз), а рівень глюкози може коливатися через різні фактори, такі як харчування, емоційний стан, фізичні навантаження і т.д., неперервне визначення цього показника є важливим для контролю діабету та правильного використання цукрознижуючих препаратів.

Тому мобільна система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові (глюкозний монітор) стає ключовим інструментом для осіб із діабетом, надаючи можливість контролювати рівень глюкози і приймати необхідні заходи для його нормалізації. Це сприяє ефективному управлінню діабетом та зменшенню ризику ускладнень. Також ця система може бути корисною для пацієнтів з переддіабетом, оскільки попередню стадію цукрового діабету також можна визначити за допомогою вимірювання рівня глюкози в крові. Рання діагностика переддіабету може допомогти пацієнтам уникнути розвитку цукрового діабету.

З урахуванням високого рівня досліджень, точності та доступності інформації про рівень глюкози, а також доступності і недорогого підшкірного

датчика, розробка інвазивної мобільної системи безперервного моніторингу рівня глюкози в крові є сьогодні актуальною задачею для пацієнтів із цукровим діабетом.

Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом на основі інвазивних технологій, яка забезпечує пацієнтам можливість правильно регулювати своє захворювання та запобігати його ускладненням.

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

1) аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;

2) моделювання кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;

3) розроблення методу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;

4) розроблення архітектури мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;

5) проведення експериментів із використанням розробленої мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Предметом дослідження є метод та кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

2 МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

2.1 Нижній та середній рівні мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Будь-яка кіберфізична система складається з трьох рівнів – рис. 2.1 [84]. Нижній рівень представляє собою рівень, на якому розташовані датчики і виконавчі елементи, такі як сервоприводи. Середній рівень формує контролер, до якого підключаються ці датчики і сервоприводи. Верхній рівень складається з системи, яка здійснює збір, моніторинг та керування даними кіберфізичної системи в реальному часі.



Рисунок 2.1 – Узагальнена структура кіберфізичної системи [84]

Отже, для створення кіберфізичної системи потрібно вибрати відповідні датчики та сервоприводи для формування нижнього рівня, обрати контролер для створення середнього рівня і розробити сценарії та алгоритми для збору,

моніторингу та управління даними для верхнього рівня. Крім того, потрібно визначити спосіб та стандарт передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів.

Датчики інвазивної системи моніторингу рівня глюкози – це спеціальні сенсори, які встановлюються під шкірою користувача з метою постійного вимірювання рівня глюкози у крові. Ці датчики мають здатність неперервно вимірювати рівень глюкози у тканинах та рідині, що оточує клітини, таким чином надаючи інформацію про глюкозу в реальному часі.

Деякі з відомих датчиків інвазивних систем моніторингу рівня глюкози:

1) Dexcom G6 та G7 (рис. 2.2) – інвазивні датчики для постійного моніторингу рівня глюкози, які встановлюються під шкіру та підключаються до монітора глюкози; цей датчик автоматично вимірює рівень глюкози в міжклітинній рідині і передає дані безпосередньо до монітора або смартфона пацієнта; надає безперервні оновлення (кожні 5 хвилин) про рівень глюкози в реальному часі, а також надає сповіщення про гіпо- та гіперглікемію; цей датчик можна носити до 10 днів перед заміною; середня вартість 3600 грн. Сенсор Dexcom G6 – маленький за розміром медичний прилад, який: дозволяє здійснювати безперервний моніторинг рівня глюкози в крові; зручно та легко закріплюється на тілі з використанням автоматичного аплікатора; передає показники на смартфон кожні 5 хвилин; може бути використаний для дітей від двох років; надійно служить протягом десяти днів і є стійким до вологи; не вимагає додаткового калібрування, а також забезпечує високу точність вимірювань; допомагає вчасно приймати рішення з метою уникнення можливих ускладнень при різких змінах граничного рівня цукру. Особливості Dexcom G7: об'єднання трансмітера та сенсора в одному пристрої; можливість налаштованих сповіщень про високі та низькі рівні глюкози; можливість віддаленого моніторингу для співпраці з медичними командами та родичами; сенсор на 60% менший; сумісність з Apple Watch для зручного перегляду показників глюкози; сумісність із новітніми моделями iPhone та багатьма популярними пристроями Android;

2) Medtronic Guardian Sensor 3 (рис. 2.3) – використовується для інвазивного моніторингу рівня глюкози; встановлюється під шкіру і підключається до інсулінової помпи Medtronic для постійного контролю рівня глюкози та регулювання інсуліну; забезпечує безперервний моніторинг рівня глюкози в крові; має просте та зручне закріплення на тілі; має розмір дещо більше за монету та голки мікророзміру; утримується на тілі людини за допомогою липкої підложки; простий в установці та відрізняється прискореним запуском; середня вартість 2100 грн; зручний для носіння та може бути закріплений на животі, сідницях або на тильній стороні руки; показники рівня глюкози передаються з нього на смартфон або спеціальний приймач кожні 5 хвилин; може використовуватися навіть для дітей від двох років. Він надійно працює протягом 7 днів та має високу стійкість до вологи, для його функціонування не потрібне додаткове калібрування. Точність вимірювань відповідає високим стандартам, що дозволяє вчасно реагувати на зміни рівня цукру та уникати можливих ускладнень. Цей датчик дозволяє пацієнтам вчасно отримувати необхідні дані про рівень глюкози, що дає їм змогу приймати інформовані рішення щодо управління своїм захворюванням. Такий постійний моніторинг сприяє запобіганню гострих глюкозозалежних ускладнень та сприяє загальному підтриманню стабільного рівня глюкози в крові;

3) Abbott FreeStyle Libre (рис. 2.4) – інвазивний датчик, який розміщується під шкірою; має розмір не більше двох монеток в один американський цент, складених стопкою, товщина сенсора – 0.35 мм; має вбудований аплікатор для легшого встановлення; здатний бездротово самостійно передавати дані про рівень глюкози на смартфон щохвилини; сповіщає про низькі та високі показники з можливістю індивідуального налаштування; має можливість підключення сенсора одразу до 20 смартфонів, що дає можливість віддаленого моніторингу пацієнта його рідними; середня вартість 3250 грн; інноваційний засіб для безперервного моніторингу рівня глюкози в крові, який пропонує широкий спектр переваг. Він забезпечує можливість безболісного та зручного моніторингу, оскільки датчик легко наноситься на тіло та може працювати без перерви до 14 днів. Його компактний розмір і висока точність вимірювань роблять його ідеальним вибором

для пацієнтів будь-якого віку. Дані про рівень глюкози передаються на спеціальний смартфон або приймач, що дозволяє пацієнтам легко відстежувати їх і вживати необхідні заходи управління захворюванням;

4) Senseonics Eversense та Eversense XL (рис. 2.5) – вбудовується під шкіру пацієнта під наглядом лікаря, що дозволяє забезпечити довготривалу та надійну роботу від трьох місяців (Eversense) до шести місяців (Eversense XL); середня вартість 4000 грн; дані про рівень глюкози передаються на спеціальний приймач, який може бути сумісним зі смартфонами, щоб пацієнти могли легко відстежувати свій стан здоров'я; має високу точність; безперервний моніторинг рівня глюкози з допомогою Senseonics Eversense допомагає пацієнтам з цукровим діабетом приймати вчасні рішення та уникнути можливих ускладнень; одні з найдовших за терміном використання датчиків;

5) датчик Medtronic Enlite Sensor (рис. 2.6) – має свої унікальні характеристики та функції; компонент інвазивної системи моніторингу рівня глюкози, розроблений компанією Medtronic; також використовується для неперервного вимірювання рівня глюкози в міжклітинній рідині та надає користувачам зручний спосіб контролювати їхній рівень глюкози; середня вартість 2300 грн; зручний та точний в загальних вимірах і для виявлення гіпоглікемії; зручний і простий у використанні; може бути встановлений як на животі, так і сідницях, і використовуватися до шести днів; маленький розмір голки (9 мм) та «прихована» голка при установці сертером

Всі інвазивні датчики моніторингу рівня глюкози забезпечують надійний та точний постійний контроль за рівнем глюкози в організмі людини з цукровим діабетом. Вони дозволяють пацієнтам з цукровим діабетом моніторити рівень глюкози в крові з високою точністю та безперервно, що допомагає в управлінні їх станом здоров'я.

Для реалізації мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом використовуватимемо датчик Senseonics Eversense XL завдяки його середній ціні при найбільш тривалій роботі – шість місяців, тобто пацієнт потребує лише двох процедур інсталяції та видалення датчика на рік.



Рисунок 2.2 – Датчик Dexcom G6 [85]



Рисунок 2.3 – Датчик Medtronic Guardian Sensor 3 [86]



Рисунок 2.4 – Датчик Abbott FreeStyle Libre [87]



Рисунок 2.5 – Датчик Senseonics Eversense [88]



Рисунок 2.6 – Датчик Medtronic Enlite Sensor [89]

Оберемо тепер контролер для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

Контролери для кіберфізичних систем – це електронні пристрої, які відповідають за керування та координацію діяльності компонентів фізичної і кібернетичної складових системи. Вони забезпечують збір, аналіз та обробку даних, приймання рішень та відповідне реагування на зміни в середовищі або умовах. Контролери можуть бути реалізовані у вигляді мікроконтролерів, спеціалізованих програмних платформ або хмарних систем керування. Вони грають ключову роль у забезпеченні взаємодії між фізичними та кібернетичними компонентами, забезпечуючи оптимальну працездатність і ефективність системи в цілому.

Для кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом можуть використовуватись різні типи контролерів залежно від специфіки системи та її функціональних вимог. Ось деякі типи контролерів, які можуть бути використані:

1) вбудовані мікроконтролери – компактні електронні пристрої, які забезпечують основну обробку даних та управління датчиками та іншими компонентами системи. Вони можуть бути використані у портативних медичних пристроях або імплантованих системах, де відіграють ключову роль у забезпеченні функціональності, зборі, обробці та передачі даних. Вбудовані мікроконтролери забезпечують необхідну функціональність та продуктивність для створення ефективних кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. Вони дозволяють збирати, обробляти та передавати дані з датчиків у реальному часі, що дозволяє моніторувати та керувати цукровим діабетом з високою точністю і ефективністю:

1.1) ARM Cortex-M – мікроконтролери від ARM, які є популярними в вбудованих системах, оскільки вони мають хорошу продуктивність, низьке споживання енергії і широкі можливості вводу-виводу, що дозволяє їх використовувати для збору та обробки даних в реальному часі;

1.2) ESP8266/ESP32 – мікроконтролери від Espressif, які є популярними у сфері Інтернету речей через їх вбудований Wi-Fi. Вони забезпечують можливість бездротового зв'язку, що дозволяє передавати дані між пристроями та хмарними серверами для аналізу та звітності;

1.3) Arduino – відома платформа для розробки вбудованих систем, яка використовує мікроконтролери AVR або ARM Cortex-M. Вона надає простий інтерфейс програмування та багато різноманітних модулів та датчиків для збору даних;

1.4) Raspberry Pi – одноплатна комп'ютерна система, яка має вбудований процесор ARM і використовується для різних задач, включаючи обробку даних з датчиків, зберігання та відображення інформації. Вона часто використовується для реалізації складніших систем моніторингу та управління;

2) комп'ютери на основі мікроконтролерів – це розширені мікроконтролери, які мають додаткові функції обробки даних та зв'язку. Вони можуть використовуватися для надання додаткового функціоналу, такого як зберігання та аналіз даних у реальному часі. Дозволяють створювати потужні та ефективні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, які можуть збирати, обробляти та передавати дані для подальшого аналізу та керування цукровим діабетом:

2.1) Raspberry Pi – одноплатний комп'ютер, який використовується як контролер у багатьох системах моніторингу здоров'я. Він має достатньо обчислювальної потужності для обробки даних та взаємодії з іншими пристроями, такими як датчики глюкози та вимірювачі та відправка цих даних на хмарні сервери для аналізу;

2.2) Arduino – популярна платформа для розробки вбудованих систем, яка може використовуватися для створення комп'ютерів на основі мікроконтролерів. Вона зазвичай використовується для збору даних з датчиків глюкози та передачі їх на інші пристрої для обробки та відображення;

2.3) BeagleBone – платформа одноплатних комп'ютерів, яка використовується для розробки кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я. Вона має вбудовані можливості зв'язку та може бути використана для обробки даних з датчиків та взаємодії з іншими пристроями;

3) персональний комп'ютер або хмарні системи керування – можуть використовуватися для централізованого контролю та моніторингу даних з багатьох пристроїв моніторингу глюкози; використовуються для кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом для збору, обробки та аналізу даних про рівень глюкози в крові та інших параметрів здоров'я; дозволяють пацієнтам з цукровим діабетом ефективно моніторити свій стан здоров'я, отримувати необхідні дані та рекомендації для керування захворюванням і підтримки здорового способу життя. Ці системи можуть включати в себе програмне забезпечення для аналізу даних, графічні інтерфейси та можливості спільного доступу до даних:

3.1) персональні комп'ютери – можуть використовуватися пацієнтами або медичним персоналом для моніторингу та управління рівнем глюкози в крові. Вони надають зручний інтерфейс для перегляду даних, налаштування сповіщень та аналізу результатів в реальному часі. Персональні комп'ютери можуть бути також використані для збереження та архівування даних для подальшого використання або аналізу;

3.2) хмарні системи керування – дозволяють зберігати дані про рівень глюкози в крові та інші параметри здоров'я на віддалених серверах, що забезпечує доступ до них з будь-якого пристрою з підключенням до Інтернету. Це дозволяє пацієнтам та їх медичному персоналу отримувати доступ до даних в будь-який час і з будь-якого місця. Крім того, хмарні системи забезпечують можливість автоматичного аналізу даних, генерації звітів та надання рекомендацій щодо керування цукровим діабетом;

4) мобільні пристрої (смартфони, планшети) – можуть використовуватися як контролери для підключення до датчиків глюкози через бездротові технології, такі як Bluetooth. Додатки для мобільних пристроїв можуть забезпечувати зручний інтерфейс для відображення даних та керування системою. На мобільних пристроях можна встановити спеціальні додатки для моніторингу рівня глюкози в крові, які можуть отримувати дані з датчиків глюкози та відображати їх на екрані смартфона або планшета в реальному часі. Мобільні пристрої можуть служити для отримання сповіщень про рівень глюкози в крові, а також для тривалого моніторингу цього параметру. Вони можуть надсилати сповіщення користувачам про низькі або високі рівні глюкози та надавати рекомендації щодо подальших дій. Мобільні пристрої можуть використовуватися для збереження та аналізу даних про рівень глюкози в крові. Вони можуть зберігати історію вимірювань, графіки зміни рівня глюкози та інші параметри здоров'я, що дозволяє пацієнтам та їх медичному персоналу проводити детальний аналіз стану здоров'я. Мобільні пристрої можуть надавати користувачам доступ до інформації про цукровий діабет, поради щодо керування захворюванням, дієтотерапію та фізичну активність. Вони також можуть

підтримувати спілкування з медичними фахівцями або іншими людьми з цукровим діабетом через спеціальні форуми або чати;

5) інтернет-платформи для медичного моніторингу – надають можливість підключення датчиків глюкози до веб-інтерфейсу або мобільного додатка через Інтернет. Вони забезпечують можливість віддаленого моніторингу стану глюкози пацієнтів медичними працівниками та надання рекомендацій з лікування; дозволяють забезпечити ефективний моніторинг стану здоров'я та підтримку від медичних фахівців у будь-який час та в будь-якому місці. Є важливим інструментом для забезпечення ефективного контролю за цим захворюванням та забезпечення пацієнтам доступу до необхідної медичної інформації:

5.1) веб-портали моніторингу здоров'я – дозволяють пацієнтам реєструвати та відстежувати свої показники здоров'я, такі як рівень глюкози в крові, споживана їжа, фізична активність, а також інші параметри здоров'я. Вони забезпечують можливість вести журнал здоров'я та аналізувати зміни в параметрах здоров'я протягом часу;

5.2) мобільні додатки для медичного моніторингу – дозволяють пацієнтам вести контроль за своїм станом здоров'я, включаючи рівень глюкози, за допомогою смартфонів або планшетів. Вони забезпечують зручний спосіб введення та відстеження показників здоров'я, а також можуть надавати корисні поради та рекомендації щодо керування захворюванням;

5.3) хмарні платформи для зберігання даних – дозволяють пацієнтам зберігати свої медичні дані в безпечному хмарному сховищі та отримувати доступ до них з будь-якого пристрою з підключенням до Інтернету. Вони забезпечують зручний спосіб зберігання, організації та обміну медичною інформацією між пацієнтами та медичними фахівцями;

5.4) спеціалізовані платформи для медичного спілкування – надають можливість спілкування пацієнтів з медичними фахівцями, обміну порадами та досвідом, а також отримання консультацій з питань лікування та керування захворюванням, що допомагає пацієнтам отримувати підтримку та інформацію від кваліфікованих фахівців;

б) спеціалізовані медичні пристрої з контролерами – деякі виробники медичного обладнання розробляють спеціалізовані пристрої для моніторингу глюкози, які включають в себе вбудовані контролери; є ефективними інструментами для керування цукровим діабетом, оскільки дозволяють автоматизувати процес моніторингу та лікування, зменшуючи навантаження на пацієнта і покращуючи якість життя. Ці пристрої можуть мати додаткові функції, такі як вбудовані алгоритми для розрахунку доз інсуліну:

6.1) інсулінові помпи – використовуються для автоматичної подачі інсуліну у пацієнтів із цукровим діабетом. Вони мають вбудований контролер, який керує рівнем інсуліну у відповідності з програмованими параметрами, такими як рівень глюкози в крові та час доби;

6.2) континуальні глюкозметри – вимірюють рівень глюкози в крові протягом дня і ночі, надаючи пацієнтам постійну інформацію про їхній глюкозовий профіль. Вони можуть бути інтегровані з контролерами, що дозволяє автоматично регулювати рівень інсуліну в залежності від отриманих даних;

6.3) комбіновані системи моніторингу глюкози та інсуліну – об'єднують у собі як моніторинг рівня глюкози, так і подачу інсуліну. Вони мають вбудований контролер, який автоматично аналізує дані про рівень глюкози та вирішує, коли і як подавати інсулін;

6.4) системи замкнутого контуру інсуліну – інноваційні системи, які автоматично регулюють рівень інсуліну в організмі, використовуючи дані з моніторів глюкози та алгоритми керування. Вони мають вбудований контролер, який забезпечує автономне керування подачею інсуліну без необхідності втручання пацієнта.

Ці типи контролерів можуть використовуватися окремо або в поєднанні для створення комплексних систем моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом залежно від їх потреб та умов використання.

Для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом оберемо інтернет-платформи для медичного моніторингу.

Визначимо тепер спосіб та стандарт передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. Бездротові передавачі даних можуть використовуватись для передачі даних з датчиків глюкози на інші пристрої або до хмарних обчислювальних платформ. Це дозволяє пацієнтам та медичним працівникам отримувати доступ до даних моніторингу глюкози в реальному часі з будь-якого місця.

Бездротові передавачі даних є важливою складовою кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, оскільки дозволяють передавати важливу інформацію про рівень глюкози в крові або інші медичні параметри безпосередньо на монітор або мобільний пристрій пацієнта.

Розглянемо деякі типи бездротових передавачів даних:

1) Bluetooth використовується для безпроводного зв'язку між глюкометрами, медичними пристроями та мобільними пристроями. Пацієнти можуть переглядати дані про рівень глюкози на своєму смартфоні або планшеті через застосунки, які синхронізуються з бездротовими передавачами;

2) RFID (Radio-Frequency Identification) використовується для безконтактного зчитування інформації з датчиків або медичних пристроїв. Це може бути корисно для автоматичного збору даних про рівень глюкози в медичних установах або для надання додаткової інформації медичному персоналу;

3) NFC (Near Field Communication) дозволяє бездротово обмінюватися даними між пристроями на відносно короткій відстані. Це може бути використано для безперервного моніторингу рівня глюкози, де датчик підключений до мобільного пристрою через NFC для передачі даних;

4) Wi-Fi дозволяє безпроводне підключення медичних пристроїв до інтернету для передачі даних у хмарне сховище або до медичних систем керування. Це дозволяє медичному персоналу віддалено моніторити стан пацієнтів та надавати необхідну допомогу;

5) Cellular (мобільний зв'язок) дозволяє пацієнтам і медичному персоналу отримувати дані про рівень глюкози в реальному часі навіть без доступу до Wi-Fi.

Ці бездротові передавачі даних відіграють ключову роль у забезпеченні безперервного моніторингу та ефективного керування цукровим діабетом, дозволяючи пацієнтам та медичному персоналу отримувати доступ до важливої інформації у зручний і ефективний спосіб.

Для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом оберемо бездротовий протокол передачі даних Bluetooth.

2.2 Моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Нормальний рівень глюкози в крові здорової людини зазвичай коливається від 4,0 до 6,0 ммоль/л. Якщо рівень глюкози опуститься нижче 2 ммоль/л, це може призвести до гіпоглікемічної коми. У той же час, якщо рівень глюкози перевищить 16,5 ммоль/л, існує ризик гіперглікемічної коми. Рівень глюкози між 2 і 4 ммоль/л вказує на наявність гіпоглікемії, а діапазон від 6 до 16,5 ммоль/л вказує на гіперглікемію.

Нехай bgl – показник рівня цукру в крові пацієнта. Тоді, враховуючи вищезазначені референтні значення рівня глюкози, сформуємо наступні *правила для аналізу показника bgl* :

- якщо $bgl \geq 4$ ммоль/л та $bgl \leq 6$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається;
- якщо $bgl < 4$ ммоль/л та $bgl \geq 2$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – нижче норми, і пацієнту видається повідомлення: «Гіпоглікемія»;
- якщо $bgl > 6$ ммоль/л та $bgl \leq 16,5$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – вище норми, і пацієнту видається повідомлення: «Гіперглікемія»;
- якщо $bgl < 2$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – критично низький, і повідомлення «Загроза гіпоглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним (у повідомлення додається також геолокація пацієнта та його ім'я і прізвище);

– якщо $bgl > 16,5$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – критично високий, і повідомлення «Загроза гіперглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним (у повідомлення додається також геолокація пацієнта та його ім'я і прізвище).

Тоді задача мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом полягає у наступному: для змінної bgl (показник рівня цукру в крові пацієнта) та відомих відповідей $Y = y(bgl) \in \{\text{«норма»}; \text{«гіпоглікемія»}; \text{«гіперглікемія»}, \text{«загроза гіпоглікемічної коми»}; \text{«загроза гіперглікемічної коми»}\}$ існує метод a , що наближує Y на всій множині об'єктів bgl , тобто $a: bgl \rightarrow Y$ (рис. 2.7).

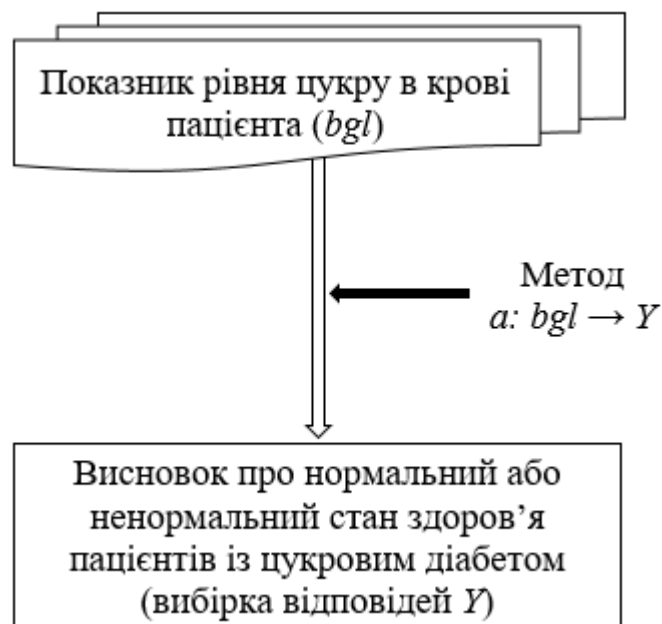


Рисунок 2.7 – Концептуальна модель мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Для побудови інформаційної моделі мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, визначимо її інформаційні потоки. Основним джерелом інформації є показник рівня цукру в крові пацієнта, який передається бездротовим протоколом передачі даних Bluetooth від датчика нижнього рівня системи Senseonics Eversense XL.

Результатом функціонування мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом повинен бути висновок про нормальний стан здоров'я пацієнта із цукровим діабетом (рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається), або про один з ненормальних станів здоров'я пацієнта із цукровим діабетом (рівень цукру в крові пацієнта – нижче норми, тоді пацієнту видається повідомлення: «Гіпоглікемія»; рівень цукру в крові пацієнта – вище норми, тоді пацієнту видається повідомлення: «Гіпоглікемія»; рівень цукру в крові пацієнта – критично низький, тоді повідомлення «Загроза гіпоглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним із додаванням геолокації пацієнта та його імені й прізвища; рівень цукру в крові пацієнта – критично високий, тоді повідомлення «Загроза гіперглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним із додаванням геолокації пацієнта та його імені й прізвища).

Отже, на основі аналізу показника рівня цукру в крові пацієнта формується висновок про нормальний стан здоров'я пацієнта із цукровим діабетом або про один з ненормальних станів здоров'я пацієнта із цукровим діабетом, а також порядок дій в кожному з випадків. Якщо показник рівня цукру в крові пацієнта, знятий датчиком нижнього рівня системи Senseonics Eversense XL, належить множині референтних значень [4; 6], то формується висновок про нормальний стан здоров'я пацієнта із цукровим діабетом. Якщо ж показник рівня цукру в крові пацієнта, знятий датчиком нижнього рівня системи Senseonics Eversense XL, не належить множині референтних значень [4; 6], то формується висновок про один з ненормальних станів здоров'я пацієнта із цукровим діабетом, а також порядок дій в кожному з випадків.

Тоді інформаційна модель мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом (модель, що відображає істотні параметри такого рівня, інформаційні потоки між ними, інформаційні входи і виходи) має вигляд – рис. 2.8.

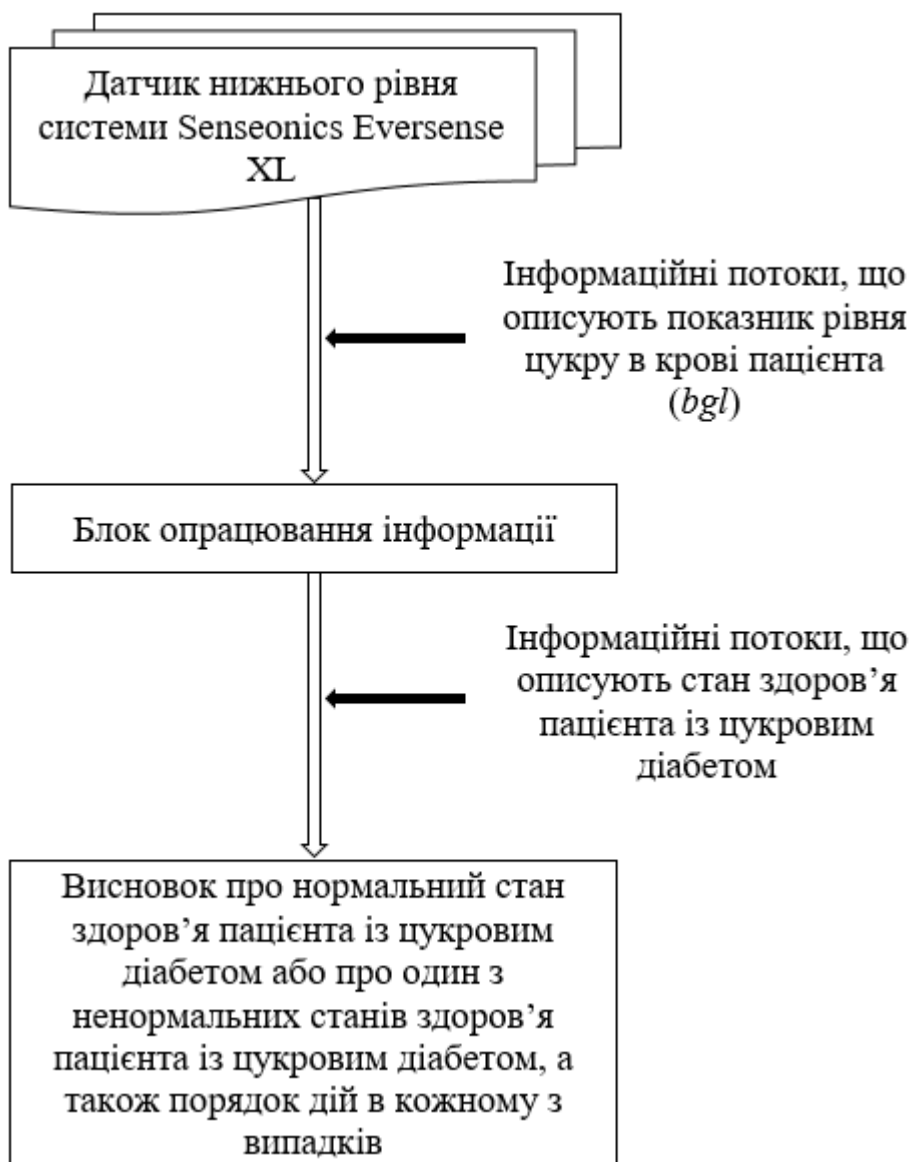


Рисунок 2.8 – Інформаційна модель мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

2.3 Висновки

У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчика для формування нижнього рівня та вибір контролера для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також вибір протоколу передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів кіберфізичної системи.

Для реалізації мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом використовуватимемо датчик Senseonics Eversense XL завдяки його середній ціні при найбільш тривалій роботі – шість місяців, тобто пацієнт потребує лише двох процедур інсталяції та видалення датчика на рік.

Для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом оберемо інтернет-платформи для медичного моніторингу.

Для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом оберемо бездротовий протокол передачі даних Bluetooth.

Крім цього, проведено моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. Зокрема, на основі референтних значень рівня глюкози сформовані правила для аналізу показника рівня цукру в крові пацієнта, а також розроблені концептуальна та інформаційна моделі мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

3.1 Метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом – це систематичне та постійне відстеження рівня глюкози в крові та інших параметрів, що дозволяє контролювати стан хворого і приймати необхідні медичні рішення. Цей процес може включати в себе:

1) вимірювання рівня глюкози в крові – використання глюкометрів або бездротових датчиків для вимірювання рівня цукру в крові в різні часи доби;

2) моніторинг фізичної активності – відстеження рівня активності пацієнта та впливу фізичних вправ на рівень глюкози;

3) відслідковування харчування – записування щоденного раціону харчування та впливу різних продуктів на рівень цукру в крові;

4) медикаментозний контроль – систематичне вживання лікарських препаратів та відстеження їхнього впливу на глюкозу;

5) відслідковування симптомів і ускладнень – реєстрація симптомів гіпо- та гіперглікемії, а також виявлення можливих ускладнень діабету;

6) збереження та аналіз даних – запис і аналіз історії вимірювань глюкози, фізичної активності, харчування та інших показників для виявлення тенденцій та оптимізації лікування;

7) взаємодія з медичним персоналом – передача отриманих даних медичним фахівцям для консультацій та корекції лікування;

8) управління стресом та емоціями – моніторинг стану здоров'я також включає в себе врахування емоційного стану пацієнта та його впливу на рівень глюкози в крові; стрес, тривога та інші емоційні фактори можуть призвести до змін у рівні цукру, тому важливо вести журнал та аналізувати такі ситуації;

9) належне користування технологіями – пацієнти повинні бути навчені правильно використовувати медичні пристрої для моніторингу, включаючи

глюкометри, бездротові передавачі та інші пристрої; неправильне використання може призвести до неточних результатів;

10) забезпечення регулярного моніторингу – важливо виконувати моніторинг рівня глюкози в крові на регулярній основі згідно з рекомендаціями лікаря; це дозволить вчасно виявляти зміни та адекватно реагувати на них;

11) освіта та підтримка – пацієнти повинні отримати достатню освіту щодо важливості моніторингу глюкози, а також підтримку з боку медичного персоналу та спільноти для досягнення ефективного контролю над цукровим діабетом.

Моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом є ключовим елементом управління цією хворобою, дозволяючи пацієнтам зберігати стабільний рівень глюкози в крові і попереджати можливі ускладнення. Моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом допомагає пацієнтам та їхнім лікарям ефективно контролювати захворювання та запобігати можливим ускладненням.

Моніторинг рівня глюкози в крові є критично важливим для пацієнтів з цукровим діабетом з наступних причин:

1) контроль рівня глюкози – пацієнти з цукровим діабетом повинні зберігати рівень глюкози в межах прийнятних норм для запобігання гіпер- або гіпоглікемії; моніторинг дозволяє відстежувати цей рівень та приймати необхідні заходи для його контролю;

2) корекція дії інсуліну та інших препаратів – пацієнти з цукровим діабетом, які приймають інсулін або інші препарати для зниження рівня глюкози, повинні відповідно коригувати дозу залежно від поточного рівня глюкози в крові; моніторинг дозволяє визначити потребу в таких корекціях;

3) зменшення ризику ускладнень – підтримання стабільного рівня глюкози допомагає уникнути серйозних ускладнень, сприяє зменшенню ризику розвитку хронічних ускладнень, таких як діабетична ретинопатія, нефропатія та невропатія;

4) покращення якості життя – правильний контроль рівня глюкози може покращити якість життя пацієнтів, дозволяючи їм більш активно і повноцінно жити; підтримка стабільного рівня глюкози сприяє загальному самопочуттю, дозволяючи пацієнтам активно працювати та займатися різними видами діяльності

без перерв через коливання рівня глюкози; забезпечення стабільного рівня глюкози дозволяє пацієнтам активно брати участь у повсякденних справах, покращує їх енергію та настрій і зменшує ризик розвитку серйозних ускладнень;

5) персоналізоване лікування – кожен пацієнт має унікальні фізіологічні особливості та реакцію на лікування; моніторинг глюкози допомагає адаптувати режим лікування для кожного пацієнта з урахуванням його індивідуальних потреб; інформація, отримана в результаті моніторингу, дозволяє медичним фахівцям налаштовувати лікування для кожного пацієнта індивідуально, забезпечуючи оптимальний контроль за захворюванням;

6) попередження надзвичайних ситуацій – моніторинг дозволяє виявити швидкі зміни рівня глюкози, що може бути сигналом про надзвичайні стани, такі як гіпоглікемія або гіперглікемія, і вчасно реагувати на них;

7) спрощення самоконтролю – монітори глюкози надають пацієнтам можливість здійснювати постійний контроль за своїм станом без необхідності постійно відбирати кров для аналізу;

8) попередження критичних станів – передчасне виявлення аномальних значень глюкози дозволяє уникнути розвитку гіпер- чи гіпоглікемії або кетоацидозу;

9) покращення зв'язку з медичними фахівцями – моніторинг глюкози дозволяє пацієнтам та їх медичним фахівцям спілкуватися на основі конкретних даних та приймати більш обґрунтовані рішення щодо лікування;

10) самомоніторинг і самокерування – постійний доступ до даних про рівень глюкози допомагає пацієнтам більш ефективно контролювати своє захворювання та здійснювати своєчасні корекції в режимі лікування; моніторинг глюкози надає пацієнтам можливість самостійно відслідковувати власний стан здоров'я та мотивує до дотримання рекомендацій з лікування, що сприяє покращенню результатів терапії;

11) оптимізація дії ліків – постійний моніторинг рівня глюкози дозволяє пацієнтам та їх медичним фахівцям відстежувати ефективність застосування ліків і вчасно коригувати їх дози для досягнення оптимального контролю рівня глюкози;

12) сприяння веденню здорового способу життя – моніторинг глюкози надає пацієнтам об'єктивні дані про вплив харчування, фізичної активності та стресу на рівень цукру в крові, що може стимулювати здорові звички і сприяти загальному самопочуттю;

13) підтримка прийняття рішень – пацієнти та їх медичні фахівці можуть використовувати дані моніторингу глюкози для інформованого прийняття рішень щодо режиму харчування, фізичної активності, лікування та інших аспектів управління цукровим діабетом;

14) підвищення ефективності лікування – моніторинг глюкози надає зворотний зв'язок про ефективність лікування, що дозволяє пацієнтам та їх медичним фахівцям вчасно внести зміни в терапію для досягнення кращого контролю над рівнем глюкози;

15) сприяння освіченості пацієнта – моніторинг глюкози стимулює пацієнтів дізнаватися більше про своє захворювання, виявляти тенденції та взаємозв'язки між різними факторами, що впливають на рівень глюкози, та активно взаємодіяти з медичним персоналом для ефективного управління діабетом; моніторинг рівня глюкози надає пацієнтам і їхнім близьким більшу обізнаність щодо управління діабетом та сприяє освіченості щодо важливості контролю цукрового рівня для здоров'я;

16) оптимізація динамічного режиму лікування – моніторинг глюкози у реальному часі дозволяє адаптувати та коригувати режим лікування в залежності від потреб організму в конкретний момент, що сприяє більш ефективному контролю рівня глюкози;

17) можливість прогнозування змін рівня глюкози – деякі системи моніторингу глюкози надають пацієнтам можливість прогнозувати зміни рівня глюкози на основі попередніх даних, що допомагає уникнути негативних станів;

18) підвищення рівня безпеки та самопідтримки – моніторинг рівня глюкози забезпечує пацієнтів додатковим інструментом для контролю над власним станом здоров'я, що знижує ризик виникнення критичних ситуацій та підвищує рівень самопідтримки;

19) управління станом діабету в реальному часі – моніторинг рівня глюкози в реальному часі дозволяє негайно виявляти зміни в рівні цукру в крові і вживати необхідні заходи для корекції, що сприяє підтримці оптимального стану здоров'я;

20) оцінка ефективності лікування – систематичне відслідковування рівня глюкози дозволяє оцінювати ефективність застосованих методів лікування та вносити необхідні зміни для досягнення бажаних показників;

21) покращення дотримання лікування – передача даних про рівень глюкози на мобільні пристрої або в хмарне сховище надає можливість медичним працівникам та близьким моніторити стан пацієнта, що сприяє підвищенню дотримання лікування;

22) відслідковування впливу факторів на рівень глюкози – моніторинг глюкози дозволяє відслідковувати вплив фізичної активності, харчування, стресу та інших факторів на рівень цукру в крові, що допомагає пацієнтам приймати обґрунтовані рішення щодо свого життєвого стилю.

Ці причини демонструють важливість постійного моніторингу рівня глюкози в крові для забезпечення ефективного контролю за цукровим діабетом та підвищення якості життя пацієнтів, а також підкреслюють важливість моніторингу рівня глюкози в крові для забезпечення ефективного управління цукровим діабетом і покращення якості життя пацієнтів.

Як показав проведений вище аналіз, наразі існує ряд методів моніторингу рівня глюкози в крові:

1) традиційний підйомний тест крові вимагає взяття краплі крові з пальця за допомогою пристрою для вимірювання глюкози; тестова смужка одразу ж вимірює рівень глюкози в крові; цей метод дозволяє одноразово вимірювати рівень глюкози, але не надає безперервного моніторингу протягом тривалого періоду;

2) бездротові системи моніторингу глюкози (CGM) використовують бездротові сенсори, які вбудовані в тіло, щоб неперервно вимірювати рівень глюкози в міжклітинній рідині; дані передаються на спеціальний приймач або

мобільний пристрій, що дозволяє пацієнтам і медичному персоналу в реальному часі відстежувати рівень глюкози та виявляти тренди;

3) замір глюкози в крові за допомогою імплантованих датчиків використовує імплантовані датчики, які автоматично вимірюють рівень глюкози в крові; імплантовані пристрої можуть бути використані на тривалий період часу, що робить їх зручними для пацієнтів;

4) флеш-глюкометри поєднують в собі переваги традиційних глюкометрів та бездротових систем моніторингу глюкози; вони дозволяють користувачам одноразово вимірювати рівень глюкози за допомогою тестових смужок, а також використовувати бездротові сенсори для неперервного моніторингу;

5) замір глюкози в сечовині вимагає збору зразків сечі для визначення рівня глюкози; метод не такий популярний, оскільки глюкоза в сечі може відрізнитися від рівня глюкози в крові, особливо при низьких або високих рівнях;

6) глюкоза в слізі або слині – деякі дослідження вивчають можливість вимірювання рівня глюкози в слізі або слині, але ці методи ще не настільки розвинені, щоб бути широко використовуваними в клінічній практиці;

7) неінвазивні оптичні методи – досліджуються різні технології, такі як спектроскопія та фотометрія, для безболісного вимірювання рівня глюкози в крові через шкіру; ці методи показують перспективи, але потребують подальших досліджень для встановлення їх ефективності та точності;

8) електрохімічні сенсори – метод полягає у використанні електрохімічних сенсорів для вимірювання рівня глюкози; електрохімічні сенсори використовують електроди для виявлення оксидоредукційних процесів, пов'язаних з концентрацією глюкози в крові; сенсори виявляють зміни в електричних властивостях, спричинені взаємодією з глюкозою, що дозволяє вимірювати її концентрацію у крові; ці сенсори можуть бути імплантовані або використовуватися у зовнішніх пристроях;

9) фотометричні методи використовуються для безконтактного вимірювання рівня глюкози шляхом аналізу оптичних властивостей крові; вони базуються на використанні світла різної довжини хвилі для вимірювання абсорбції крові, що змінюється залежно від її глюкозового рівня;

10) акустичні методи використовують акустичні хвилі для вимірювання рівня глюкози в крові; вони базуються на властивостях звукових хвиль, що змінюються внаслідок взаємодії з глюкозою, що дозволяє визначити її концентрацію;

11) методи спектроскопії використовують властивості спектра поглинання або розсіювання світла для вимірювання концентрації глюкози в крові; спектроскопія може бути здійснена за допомогою різних технік, таких як інфрачервона спектроскопія, Раманівська спектроскопія тощо;

12) наноматеріали і наносенсори – використання наноматеріалів та наносенсорів дозволяє створювати надзвичайно чутливі та точні пристрої для вимірювання рівня глюкози в крові; наносенсори можуть бути імплантовані або використовуватися у формі зовнішніх пристроїв;

13) методи молекулярного визначення дозволяють виявляти та кількісно визначати глюкозу в крові за допомогою взаємодії між біомолекулами та глюкозою; ці методи можуть використовувати антитіла, ферменти та інші біомолекули для виявлення глюкози;

14) імпедансна спектроскопія використовується для вимірювання змін електричного опору крові, які виникають через взаємодію з глюкозою; метод робить можливим вимірювання рівня глюкози в реальному часі;

15) безпроводні системи передачі даних дозволяють передавати отримані вимірювання рівня глюкози в крові на пристрої збереження або до хмарних систем для подальшого аналізу та обробки;

16) інтегровані системи моніторингу поєднують в собі кілька методів моніторингу для отримання більш точних та надійних результатів; ці системи можуть включати комбінації різних типів сенсорів та аналізаторів даних;

17) системи штучного інтелекту та машинного навчання дозволяють аналізувати великі обсяги даних з моніторингу рівня глюкози та надавати корисні рекомендації для пацієнтів та медичних фахівців.

Ці методи надають пацієнтам можливість ефективно вимірювати та відстежувати рівень глюкози в крові, що допомагає керувати цукровим діабетом та

уникнути ускладнень. Кожен з цих методів має свої переваги і обмеження, і вибір конкретного методу залежить від потреб пацієнта, його способу життя та інших факторів. Ці методи постійно вдосконалюються і дозволяють забезпечувати більш точний та зручний моніторинг рівня глюкози в крові для пацієнтів із цукровим діабетом, щоб забезпечити кращий контроль за цукровим діабетом та підвищити якість життя пацієнтів.

Розробимо метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, на основі якого виконуватиметься постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; на основі аналізу результатів такого моніторингу відбуватиметься оперативне повідомлення пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичуватиметься і відобразатиметься (у вигляді цифр та діаграм) динаміка змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року тощо.

Метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом складається з наступних кроків:

1) вимірювання рівня цукру в крові пацієнта (змінна *bgl*) кожні 10 хвилин;
2) аналіз показника рівня цукру в крові пацієнта (змінної *bgl*) згідно із правилами для аналізу показника *bgl*, розробленими у розділі 2:

– якщо $bgl \geq 4$ ммоль/л та $bgl \leq 6$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається;

– якщо $bgl < 4$ ммоль/л та $bgl \geq 2$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – нижче норми, і пацієнту видається повідомлення: «Гіпоглікемія»;

– якщо $bgl > 6$ ммоль/л та $bgl \leq 16,5$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – вище норми, і пацієнту видається повідомлення: «Гіперглікемія»;

– якщо $bgl < 2$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – критично низький, і повідомлення «Загроза гіпоглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним (у повідомлення додається також геолокація пацієнта та його ім'я і прізвище);

– якщо $bgl > 16,5$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – критично високий, і повідомлення «Загроза гіперглікемічної коми» видається пацієнту, а

також надсилається його рідним (у повідомлення додається також геолокація пацієнта та його ім'я і прізвище);

3) формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу (множина $DBGL$): $DBGL = \{bgl_1, bgl_2, bgl_3, \dots, bgl_{144}\}$ – така множина доступна в мобільному додатку пацієнта (у вигляді цифр та/або діаграм), щоб він та його лікар могли побачити динаміку змін рівня глюкози у крові протягом доби (у добі – 24 години, 1440 хвилин, тобто 144 10-хвилинних інтервалів);

4) розрахунок середньодобового (144 10-хвилинних інтервали) показника рівня цукру в крові пацієнта за формулою:

$$adbgl = (\sum_{i=1}^{144} bgl_i) / 144 \quad (3.1)$$

5) формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць (множина $MBGL$): $MBGL = \{adbgl_1, asbgl_2, \dots, adbgl_m\}$ – така множина також доступна в мобільному додатку пацієнта (у вигляді цифр та/або діаграм), щоб він та його лікар могли побачити динаміку змін середньодобового рівня цукру в крові протягом місяця (вважаємо, що в місяці m днів);

б) розрахунок середньомісячного показника рівня цукру в крові пацієнта за формулою:

$$ambgl = (\sum_{j=1}^m adbgl_j) / m \quad (3.2)$$

7) формування множини середньомісячних показників рівня цукру в крові пацієнта за рік (множина $YBGL$): $YBGL = \{ambgl_1, ambgl_2, \dots, ambgl_{12}\}$ – така множина також доступна в мобільному додатку пацієнта (у вигляді цифр та/або діаграм), щоб він та його лікар могли побачити динаміку змін середньомісячного рівня цукру в крові протягом року.

Розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом є основою для інвазивної мобільної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові.

Схема методу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом представлена на рис. 3.1.

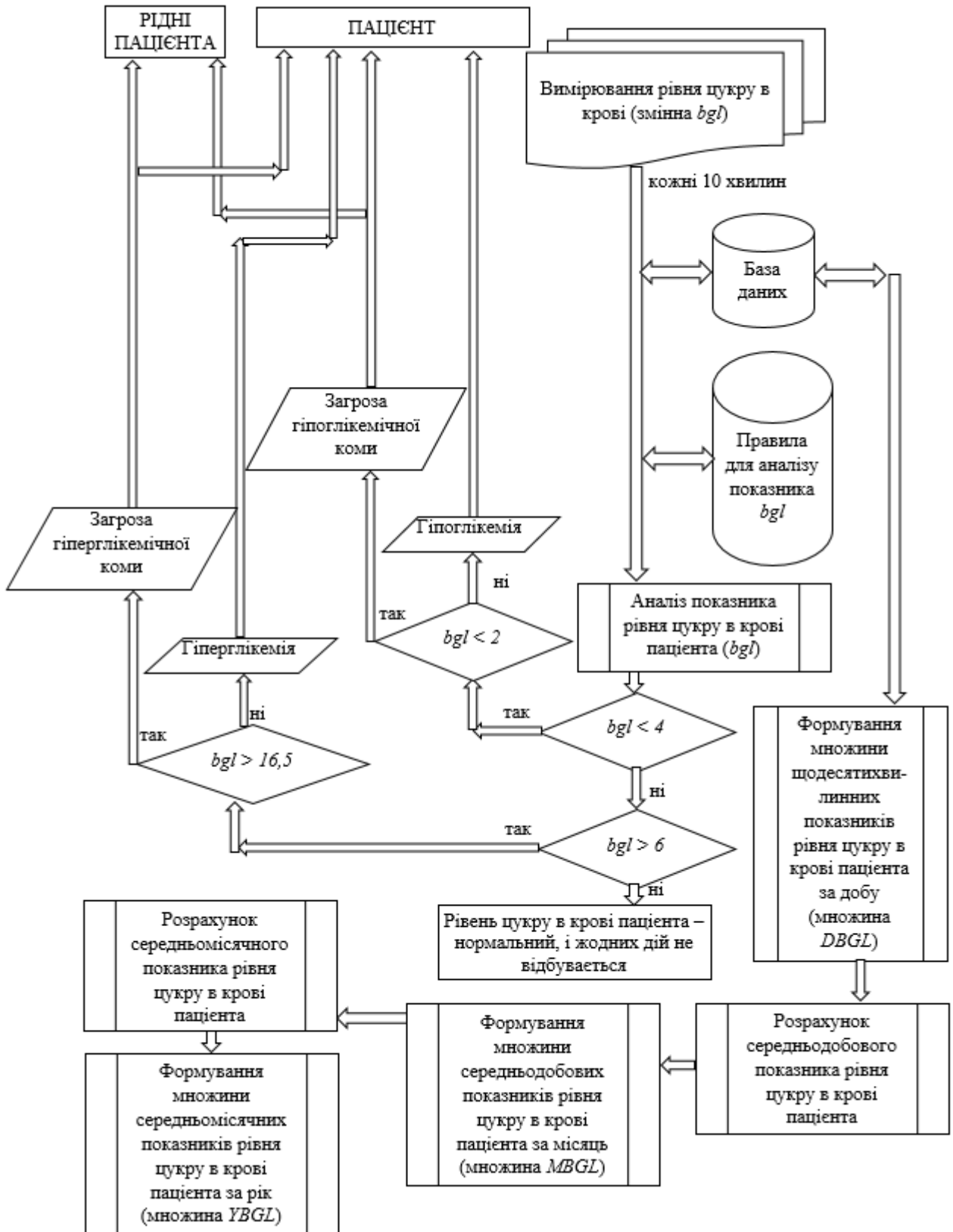


Рисунок 3.1 – Схема методу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом (на основі моніторингу рівня глюкози в крові)

Розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним. За потреби інформація про рівень глюкози у крові, який характеризує гіперглікемічний стан чи попереджає про загрозу гіперглікемічної коми, може бути передана на інсулінову помпу, яка, враховуючи стан пацієнта, розрахує необхідну дозу інсуліну та виконає ін'єкцію інсуліну. Крім цього, розроблений метод забезпечує формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю.

3.2 Алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом може включати наступні кроки:

- 1) вимірювання рівня глюкози в крові – пацієнт регулярно вимірює рівень глюкози за допомогою глюкометра або континуального глюкозного монітору;
- 2) запис даних – отримані результати вимірювань записуються в журнал, додаток для смартфона або інший медичний записник;
- 3) аналіз результатів – пацієнт аналізує дані щодо рівня глюкози в крові, враховуючи час доби, прийом їжі, фізичну активність та інші фактори;
- 4) планування дій – на основі аналізу даних пацієнт складає план дій, щоб підтримувати оптимальний рівень глюкози в крові;
- 5) спостереження за показниками – пацієнт продовжує моніторити рівень глюкози в крові та виконувати необхідні корекції, дотримуючись встановленого режиму моніторингу;

6) корекція режиму – у випадку виявлення аномалій у рівні глюкози, пацієнт вживає необхідні заходи для корекції, такі як зміна дози інсуліну або вживання вуглеводів;

7) встановлення тенденцій – пацієнт спостерігає за змінами рівня глюкози в крові протягом часу та виявляє будь-які тенденції;

8) розробка плану дій у випадку екстрених ситуацій – пацієнт розробляє план дій для управління гіпо- та гіперглікемією, включаючи необхідні заходи в разі виникнення екстрених ситуацій;

9) планування харчування та фізичної активності – на основі отриманих даних пацієнт планує свої прийоми їжі, фізичну активність та дози інсуліну для підтримки стабільного рівня глюкози в крові;

10) контакт з медичним фахівцем – пацієнт звертається до свого лікаря або медичного персоналу для консультації та підтримки; пацієнт звітує про свої результати лікарю та співпрацює з ним для вирішення будь-яких питань; пацієнт регулярно зв'язується зі своїм лікарем для обговорення результатів моніторингу, отримання порад щодо корекції режиму лікування та оновлення плану догляду за собою;

11) підтримка електронного зв'язку – пацієнт використовує спеціалізовані мобільні додатки або веб-платформи для віддаленого спілкування з медичними фахівцями та обміну даними про свій стан здоров'я;

12) корекція терапії – на основі аналізу результатів пацієнт вживає необхідні заходи для корекції рівня глюкози в крові, включаючи прийом інсуліну, вуглеводів або інших ліків;

13) оцінка результатів – пацієнт оцінює ефективність заходів, проведених для корекції рівня глюкози, та вносить необхідні зміни в свій план лікування;

14) постійне навчання і вдосконалення – пацієнт постійно вдосконалює свої навички моніторингу і контролю рівня глюкози, вивчаючи нові методи та стратегії.

Цей алгоритм допомагає пацієнтам з цукровим діабетом ефективно контролювати свій стан здоров'я та уникати ускладнень чи принаймні зменшувати

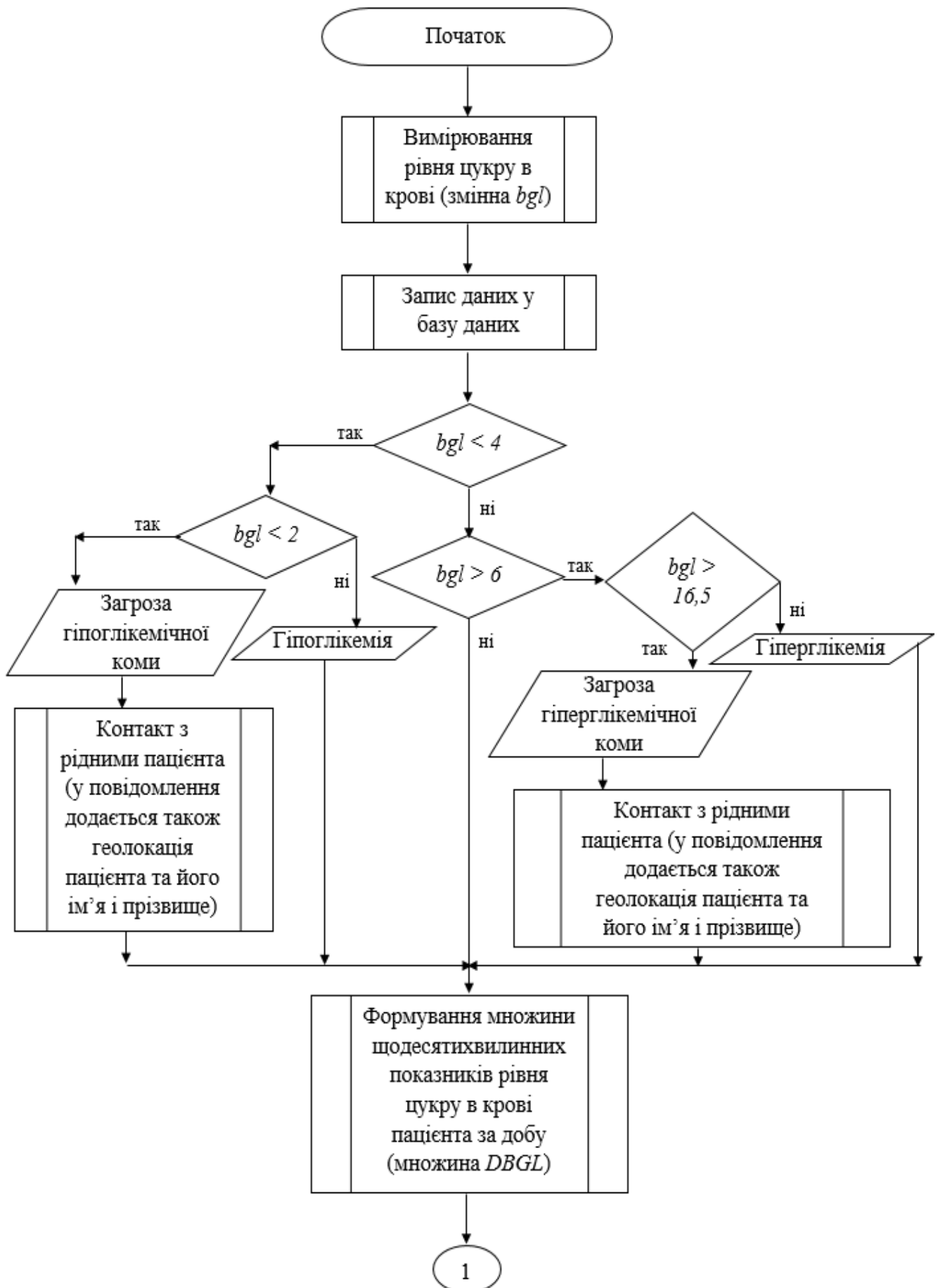
їх ризику, керувати своїм станом здоров'я, підтримувати стабільний рівень глюкози в крові та підвищувати якість життя.

Розробимо алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, за яким виконуватиметься постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом, накопичуватиметься і відображатиметься (у вигляді цифр та діаграм) динаміка змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року тощо, а також відбудуватиметься оперативне повідомлення пацієнта та його рідних про загрозу гіпер- або гіпоглікемічної коми.

Алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом складається з наступних кроків:

- 1) вимірювання рівня глюкози в крові пацієнта кожні 10 хвилин;
- 2) запис даних у базу даних;
- 3) аналіз показника рівня цукру в крові пацієнта згідно із правилами, розробленими у розділі 2;
- 4) розробка плану дій у випадку екстрених ситуацій згідно із правилами, розробленими у розділі 2;
- 5) формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу;
- 6) розрахунок середньодобового показника рівня цукру в крові пацієнта;
- 7) формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць;
- 8) розрахунок середньомісячного показника рівня цукру в крові пацієнта;
- 9) формування множини середньомісячних показників рівня цукру в крові пацієнта за рік;
- 10) спостереження за показниками, встановлення тенденцій та контакт з медичним фахівцем.

Блок-схема розробленого алгоритму моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом представлена на рис. 3.2.



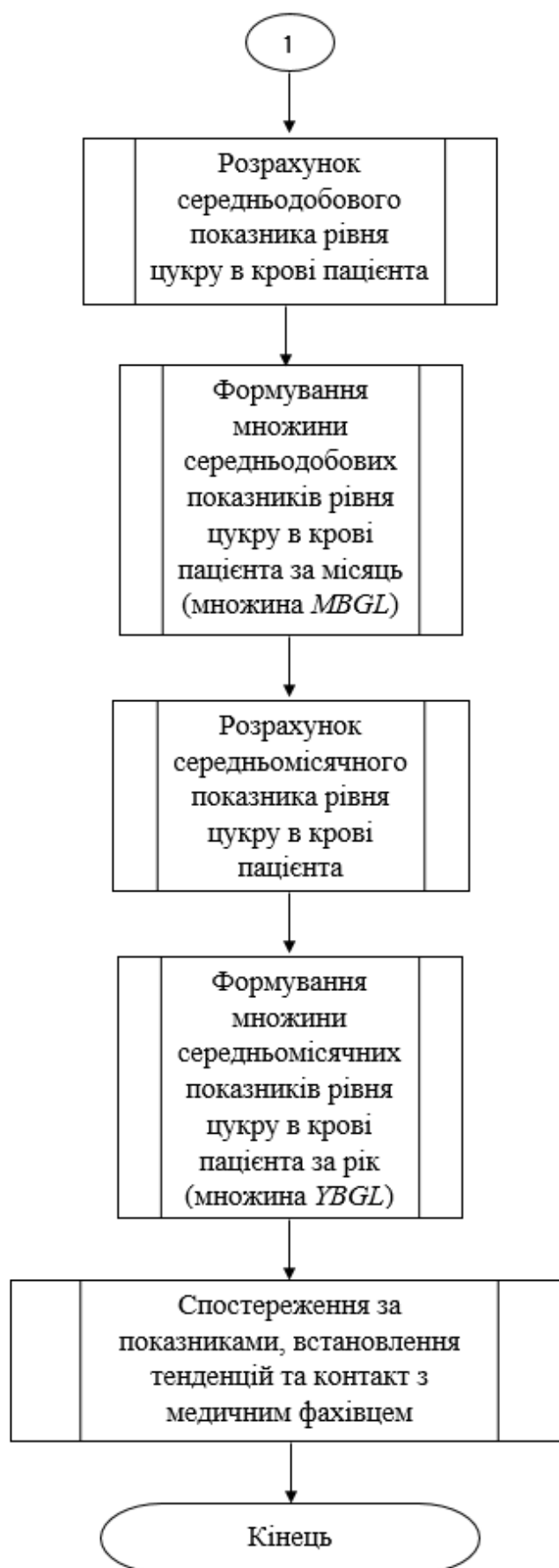


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

3.3 Висновки

В розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, який забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним. За потреби інформація про рівень глюкози у крові, який характеризує гіперглікемічний стан чи попереджає про загрозу гіперглікемічної коми, може бути передана на інсулінову помпу, яка, враховуючи стан пацієнта, розрахує необхідну дозу інсуліну та виконає ін'єкцію інсуліну. Крім цього, розроблений метод забезпечує формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю..

Розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом є основою для інвазивної мобільної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові.

Крім цього, в розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблено алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, за яким виконуватиметься постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом, накопичуватиметься і відобразатиметься (у вигляді цифр та діаграм) динаміка змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року тощо, а також відбуватиметься оперативне повідомлення пацієнта та його рідних про загрозу гіпер- або гіпоглікемічної коми. Такий алгоритм допомагає пацієнтам з цукровим діабетом ефективно контролювати свій стан здоров'я та уникати ускладнень чи принаймні зменшувати їх ризики, керувати своїм станом здоров'я, підтримувати стабільний рівень глюкози в крові та підвищувати якість життя.

4 МОБІЛЬНА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

4.1 Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Кіберфізичні системи – це інтегровані системи, що об'єднують фізичні процеси з обчислювальними та комунікаційними компонентами. Вони спроектовані для автоматизації, моніторингу та контролю реальних об'єктів чи процесів за допомогою цифрових технологій. Кіберфізичні системи використовують різноманітні сенсори, мережі зв'язку, обчислювальні алгоритми та програмне забезпечення для збору даних, їх аналізу та управління в реальному часі.

Ці системи знаходять застосування у багатьох сферах, включаючи промисловість, медицину, транспорт, сільське господарство, енергетику та багато інших. Вони дозволяють збільшити ефективність, безпеку та якість роботи різноманітних систем та процесів, а також сприяють збору та аналізу великих обсягів даних для прийняття виважених управлінських рішень.

У сфері медицини, наприклад, кіберфізичні системи використовуються для моніторингу стану пацієнтів у реальному часі за допомогою носимих пристроїв та сенсорів, які вимірюють параметри здоров'я та передають дані на сервери для аналізу та обробки. Такі системи допомагають вчасно виявляти проблеми зі здоров'ям, встановлювати діагнози та надавати ефективне лікування.

Кіберфізичні системи мають ряд характеристик, які визначають їхню ефективність, функціональність та застосування. Ось деякі з найважливіших характеристик кіберфізичних систем:

1) інтегрованість – кіберфізичні системи поєднують фізичні та цифрові компоненти, створюючи інтегровану систему, яка може взаємодіяти з навколишнім середовищем та користувачами;

2) сенсори і датчики – кіберфізичні системи використовують різноманітні сенсори та датчики для збору даних про фізичні процеси або об'єкти; ці дані використовуються для аналізу та прийняття управляючих рішень;

3) комунікаційні технології – кіберфізичні системи використовують мережеві технології для забезпечення взаємодії між різними компонентами системи, передачі даних та керування процесами у реальному часі;

4) обробка даних – кіберфізичні системи використовують обчислювальні ресурси для обробки великих обсягів даних, отриманих від сенсорів та датчиків; це включає аналіз даних, виявлення відхилень та прийняття рішень;

5) вбудована інтелектуальність – деякі кіберфізичні системи можуть використовувати штучний інтелект або машинне навчання для автоматизації процесів, виявлення паттернів та прийняття рішень без втручання людини;

6) безпека і приватність – оскільки кіберфізичні системи збирають та обробляють великі обсяги чутливих даних, вони повинні мати високий рівень захисту даних та приватності користувачів;

7) скорочення часу реакції – кіберфізичні системи дозволяють швидко реагувати на зміни у фізичних процесах або оточенні, що дозволяє забезпечити ефективне управління та оптимізацію роботи системи.

Ці характеристики роблять кіберфізичні системи потужними інструментами для автоматизації та управління різноманітними процесами та системами у реальному часі.

Медичні кіберфізичні системи – це інтегровані системи, які поєднують фізичні та цифрові компоненти для моніторингу, діагностики, лікування та управління медичними процесами і захворюваннями. Медичні кіберфізичні системи використовують різноманітні сенсори та датчики для збору даних про фізіологічні параметри пацієнтів, такі як температура тіла, артеріальний тиск, рівень глюкози, пульс тощо. Ці системи надають можливість безперервного моніторингу стану здоров'я пацієнтів та вчасного виявлення патологій або змін у стані здоров'я. Медичні кіберфізичні системи збирають великі обсяги даних про стан здоров'я пацієнтів, які потім можуть бути аналізовані за допомогою алгоритмів штучного інтелекту для виявлення паттернів, прогнозування ризиків або прийняття рекомендацій щодо лікування. Деякі медичні кіберфізичні системи можуть автоматизувати або підтримувати процеси лікування, наприклад,

автоматично подавати ліки або регулювати дозу ліків в залежності від показників пацієнта. З огляду на чутливість медичних даних, медичні кіберфізичні системи повинні мати високий рівень захисту даних та приватності пацієнтів. Медичні кіберфізичні системи є важливим інструментом для покращення якості медичного обслуговування, забезпечення пацієнтам доступу до передових технологій та оптимізації медичних процесів.

Спроекуємо архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка складатиметься з підшкірного датчика та мобільного додатку, буде дешевшою за відомі аналоги, зручною та простою у використанні та носінні, матиме компактний розмір; виконуватиме постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомлятиме пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичуватиме і відображатиме (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року тощо.

Інвазивна мобільна система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові включає датчик для вимірювання рівня глюкози (такі датчики зазвичай носять від декількох тижнів до декількох місяців, далі необхідна їх заміна), а також веб-сервер (приймач) та спеціально розроблений мобільний додаток, який встановлюється на телефон пацієнта та його рідних.

У мобільному додатку є дві можливі ролі: «пацієнт» або «рідний пацієнта». Під час реєстрації у мобільному додатку пацієнт вказує свої ім'я та прізвище, обов'язково надає доступ до даних геолокації та зазначає номери мобільних телефонів рідних, кому мають бути передані повідомлення про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта. Під час реєстрації у мобільному додатку рідні пацієнта обирають з бази даних за іменем, прізвищем та/або номером телефону, про чий критичний стан здоров'я вони дозволяють надсилати їм повідомлення.

За допомогою підшкірного датчика кожні 10 хвилин відбувається вимірювання глюкози у крові, датчик передає отриманий показник на приймач (веб-сервер), який в онлайн-режимі організовує передачу результатів у мобільний додаток пацієнта, де відбувається аналіз показника рівня цукру, а також дані записуються до бази даних. Рівень глюкози у крові автоматично вимірюється та аналізується кожні 10 хвилин. Якщо показник рівня цукру не потрапляє в діапазон референтних значень, то пацієнт отримує в мобільному додатку повідомлення про гіпо- чи гіперглікемічний стан. Якщо показник рівня глюкози у крові критично низький (менше 2 ммоль/л) або критично високий (більше 16,5 ммоль/л), то відбувається надсилання повідомлення в мобільному додатку про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта як самому пацієнту, так і його рідним (у повідомлення рідним додається також геолокація пацієнта і його ім'я та прізвище).

Крім цього, мобільний додаток забезпечує накопичення (у базі даних) і відображення (у вигляді цифр та діаграм) динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо, яка може бути корисною як для пацієнта при підборі фізичних активностей, харчування, тощо, так і для його лікаря при підборі ліків та їх дозування, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

Архітектура інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові представлена на рис. 4.1.

Очевидно, що головна мета розробленої інвазивної мобільної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові – забезпечення постійного автоматизованого моніторингу рівня глюкози у крові пацієнтів.

Пропонована інвазивна мобільна система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові допомагає пацієнту моніторити стан свого здоров'я, зокрема, глюкозу крові, і вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану. Крім цього, пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом та і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

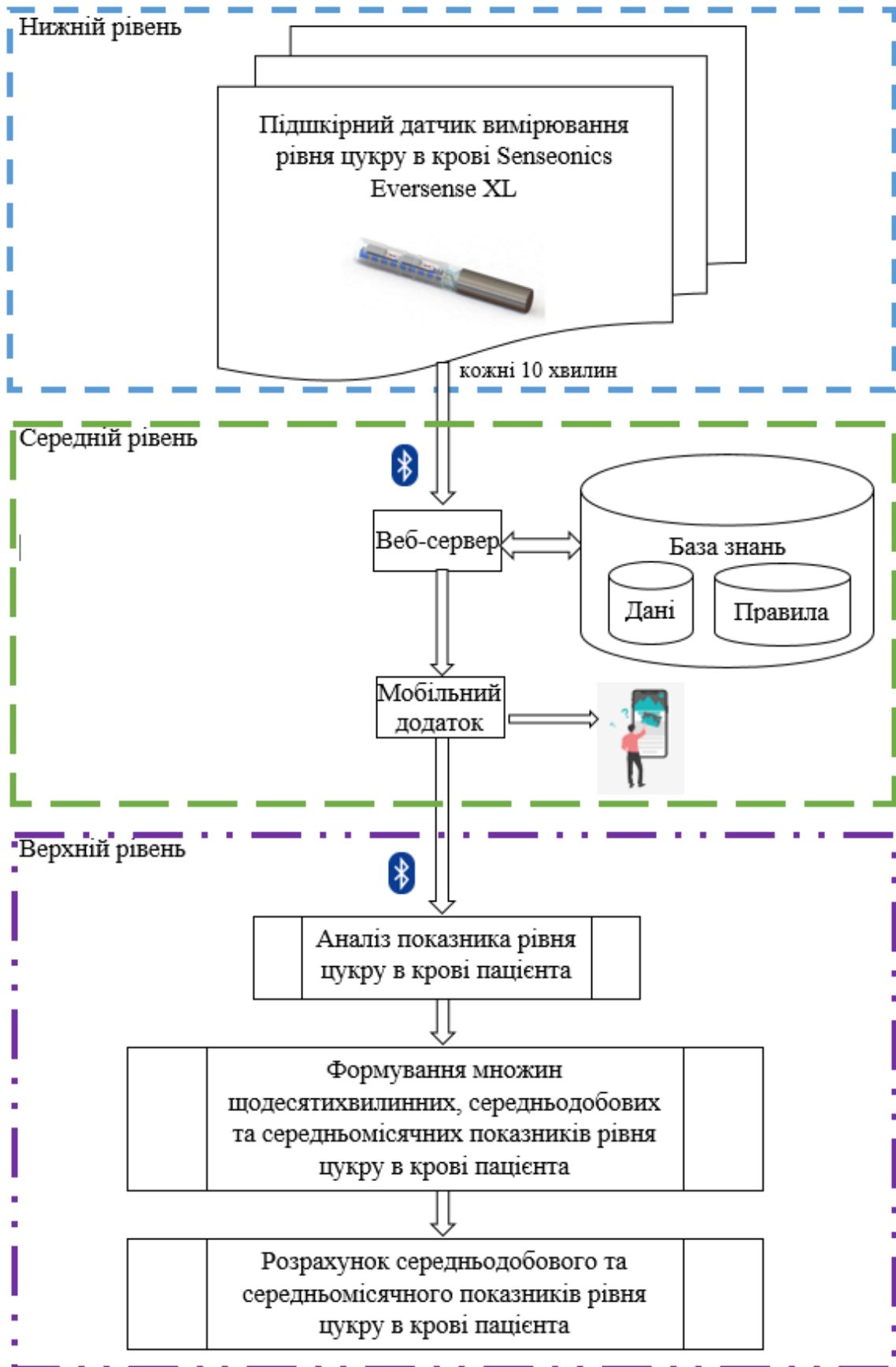


Рисунок 4.1 – Архітектура інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові

4.2 Приклади функціонування мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Розглянемо декілька експериментів використання розробленої інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові.

Під час *першого експерименту* пацієнт вирішив скористатись розробленою мобільною системою. Для цього він придбав датчик Eversense XL для вимірювання рівня глюкози у крові, його лікар встановив йому цей датчик під шкіру на передпліччі. Пацієнт встановив на свій телефон та на телефони своїх рідних розроблений мобільний додаток.

Під час реєстрації у мобільному додатку пацієнт обрав роль «пацієнт», вказав свої ім'я та прізвище, надав доступ до даних геолокації та зазначив номери мобільних телефонів рідних, кому мають бути передані повідомлення про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта.

Під час реєстрації у мобільному додатку рідні пацієнта обрали роль «рідний пацієнта», обрали з бази даних за іменем, прізвищем та/або номером телефону пацієнта, про критичний стан здоров'я якого дозволяють надсилати їм повідомлення.

Після цього інвазивна мобільна кіберфізична система постійного моніторингу рівня глюкози крові почала своє функціонування.

Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 20 вимірюваннях, починаючи з моменту часу t та далі через кожні 10 хвилин, під час яких у пацієнта розвинулась загроза гіперглікемічної коми, представлені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові на 20 вимірюваннях

Показник	Значення показника	Дії мобільної системи
bgl_i	5,8	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{i+10}	5,75	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{i+20}	5,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{i+30}	6,3	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{i+40}	6,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{i+50}	7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+60}	7,2	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+70}	8	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+80}	8,9	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+90}	9,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+100}	11,1	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+110}	14	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+120}	15,8	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+130}	17,9	Пацієнту та його рідним було надіслано повідомлення Загроза гіперглікемічної коми (у повідомлення рідним було додано також геолокацію пацієнта та його ім'я та прізвище)
bgl_{i+140}	16,5	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+150}	13,4	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+160}	10,8	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія

Кінець таблиці 4.1

bgl_{i+170}	8,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія»
bgl_{i+180}	7,75	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{i+190}	6,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Розглянутий приклад демонструє, як стрімко може змінюватись рівень цукру в крові пацієнта. Очевидно, пацієнт пропустив повідомлення про гіперглікемічний стан, не виконав ін'єкцію інсуліну вчасно, тому рівень цукру в крові почав стрімко підвищуватись і досягнув рівня, при якому є загроза настання гіперглікемічної коми. Після надсилання системою повідомлення про загрозу гіперглікемічної коми пацієнту та його рідним, пацієнт, очевидно, виконав ін'єкцію інсуліну, оскільки рівень цукру почав стрімко спадати, аж до нормальних показників.

Під час *другого експерименту* пацієнтка також прийняла рішення скористатись розробленою мобільною системою. Їй встановили підшкірний датчик Eversense XL для вимірювання рівня глюкози у крові, а також було виконано інсталяцію розробленого мобільного додатку на телефон пацієнтки та на телефони її рідних.

Під час реєстрації у мобільному додатку пацієнтка обрала роль «пацієнт» та ввела дані про себе і виконала необхідні налаштування, аналогічно рідні пацієнта під час реєстрації обрала роль «рідний пацієнта» та ввели дані про себе і виконали необхідні налаштування.

Після цього інвазивна мобільна кіберфізична система постійного моніторингу рівня глюкози крові почала своє функціонування.

Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 15 вимірюваннях, починаючи з моменту часу j та далі через кожні 10 хвилин, під час яких у пацієнтки розвинулась загроза гіпоглікемічної коми, представлені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 15 вимірюваннях

Показник	Значення показника	Дії мобільної системи
bgl_j	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+10}	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+20}	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+30}	4,3	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+40}	4,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+50}	3,0	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{j+60}	2,2	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{j+70}	1,8	Пацієнту та його рідним було надіслано повідомлення Загроза гіпоглікемічної коми (у повідомлення рідним було додано також геолокацію пацієнта та його ім'я та прізвище)
bgl_{j+80}	1,5	Пацієнту та його рідним було надіслано повідомлення Загроза гіпоглікемічної коми (у повідомлення рідним було додано також геолокацію пацієнта та його ім'я та прізвище)
bgl_{j+90}	2,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{j+100}	3,1	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{j+110}	4,2	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Кінець таблиці 4.2

bgl_{j+120}	4,8	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+130}	4,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{j+140}	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Розглянутий приклад також демонструє, як стрімко може падати рівень цукру в крові пацієнта. Очевидно, пацієнтка некоректно розрахувала дозу інсуліну, який ввела в організм, внаслідок чого розвинувся гіпоглікемічний стан, а пацієнтка або пропустила повідомлення про нього та не вжила жодних дій, або ж не змогла самостійно впоратись із стрімким зниженням рівня цукру, тому рівень цукру в крові продовжував стрімко падати і досягнув рівня, при якому настала загроза гіпоглікемічної коми. Після надсилання системою повідомлення про загрозу гіпоглікемічної коми пацієнтці та її рідним, пацієнтці, очевидно, надали необхідну допомогу, оскільки рівень цукру почав збільшуватись, аж до нормальних показників.

У двох вищерозглянутих випадках розроблена інвазивна мобільна кіберфізична система постійного моніторингу рівня глюкози крові допомогла врятувати пацієнтів та запобігти настанню гіперглікемічної коми у першому випадку та гіпоглікемічної коми в другому випадку. Розроблена система також допомагає пацієнту моніторити стан свого здоров'я, зокрема, рівень цукру в крові, і вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану.

Під час *третього експерименту* пацієнтка також вирішила скористатись розробленою мобільною системою. Для цього вона придбала датчик Eversense XL для вимірювання рівня глюкози у крові, її лікар встановив їй цей датчик під шкіру на передпліччі. Пацієнтка встановила на свій телефон та на телефони своїх рідних розроблений мобільний додаток.

Під час реєстрації у мобільному додатку пацієнтка обрала роль «пацієнт», вказала свої ім'я та прізвище, надала доступ до даних геолокації та зазначила номери мобільних телефонів рідних, кому мають бути передані повідомлення про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнтки.

Під час реєстрації у мобільному додатку рідні пацієнтки обрали роль «рідний пацієнта», обрали з бази даних за іменем, прізвищем та/або номером телефону пацієнтку, про критичний стан здоров'я якої дозволяють надсилати їм повідомлення.

Після цього інвазивна мобільна кіберфізична система постійного моніторингу рівня глюкози крові почала своє функціонування.

Результати функціонування інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 30 вимірюваннях, починаючи з моменту часу k та далі через кожні 10 хвилин, представлені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати функціонування інвазивної мобільної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові на 30 вимірюваннях

Показник	Значення показника	Дії мобільної системи
bgl_k	6,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+10}	7,5	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+20}	9,2	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+30}	10,0	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+40}	11,3	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+50}	11,8	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+60}	12,1	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+70}	12,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+80}	13,1	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+90}	12,1	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+100}	11,3	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія

Продовження таблиці 4.3

bgl_{k+110}	10,8	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+120}	10,3	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+130}	9,4	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+140}	8,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+150}	8,0	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+160}	7,2	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+170}	6,5	Пацієнту було видано повідомлення: Гіперглікемія
bgl_{k+180}	6,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+190}	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+200}	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+210}	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+220}	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+230}	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+240}	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+250}	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+260}	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+270}	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Кінець таблиці 4.3

bgl_{k+280}	5,8	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{k+290}	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Розглянутий приклад також демонструє, як стрімко може змінюватись рівень цукру в крові пацієнтки. Очевидно, рівень цукру в крові пацієнтки почав стрімко підвищуватись, проте вона, очевидно, виконала ін'єкцію інсуліну або ж прийняла цукрознижуючий препарат, відтак рівень цукру почав стрімко спадати, аж до нормальних показників.

Під час *четвертого експерименту* пацієнт також прийняв рішення скористатись розробленою мобільною кіберфізичною системою. Йому встановили підшкірний датчик Eversense XL для вимірювання рівня глюкози у крові, а також було виконано інсталяцію розробленого мобільного додатку на телефон пацієнта та на телефони його рідних.

Під час реєстрації у мобільному додатку пацієнт обрав роль «пацієнт» та ввів дані про себе і виконав необхідні налаштування, аналогічно рідні пацієнта під час реєстрації обрали роль «рідний пацієнта» та ввели дані про себе і виконали необхідні налаштування.

Після цього інвазивна мобільна кіберфізична система постійного моніторингу рівня глюкози крові почала своє функціонування.

Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 25 вимірюваннях, починаючи з моменту часу l та далі через кожні 10 хвилин, представлені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 25 вимірюваннях

Показник	Значення показника	Дії мобільної системи
<i>bgl_l</i>	4,3	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+10}</i>	4,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+20}</i>	4,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+30}</i>	4,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+40}</i>	4,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+50}</i>	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+60}</i>	4,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+70}</i>	5,2	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+80}</i>	5,3	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+90}</i>	5,3	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+100}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+110}</i>	5,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Кінець таблиці 4.4

<i>bgl_{l+120}</i>	6,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+130}</i>	6,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+140}</i>	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+150}</i>	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+160}</i>	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+170}</i>	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+180}</i>	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+190}</i>	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+200}</i>	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+210}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+220}</i>	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+230}</i>	5,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{l+240}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Розглянутий приклад демонструє зміни рівня цукру в крові пацієнта, проте весь досліджуваний час показники рівня глюкози є нормальними.

Під час *n'ятого експерименту* пацієнтка також прийняла рішення скористатись розробленою мобільною системою. Їй встановили підшкірний датчик Eversense XL для вимірювання рівня глюкози у крові, а також було виконано інсталяцію розробленого мобільного додатку на телефон пацієнтки та на телефони її рідних.

Під час реєстрації у мобільному додатку пацієнтка обрала роль «пацієнт» та ввела дані про себе і виконала необхідні налаштування, аналогічно рідні пацієнта під час реєстрації обрали роль «рідний пацієнта» та ввели дані про себе і виконали необхідні налаштування.

Після цього інвазивна мобільна кіберфізична система постійного моніторингу рівня глюкози крові почала своє функціонування.

Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 40 вимірюваннях, починаючи з моменту часу n та далі через кожні 10 хвилин, представлені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові на 40 вимірюваннях

Показник	Значення показника	Дії мобільної системи
bgl_n	3,0	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+10}	3,0	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+20}	2,9	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+30}	2,3	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+40}	2,1	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+50}	2,4	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+60}	2,7	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія
bgl_{n+70}	3,4	Пацієнту було видано повідомлення: Гіпоглікемія

Продовження таблиці 4.5

bgl_{n+80}	4,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+90}	4,2	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+100}	4,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+110}	4,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+120}	4,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+130}	4,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+140}	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+150}	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+160}	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+170}	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+180}	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+190}	4,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+200}	4,8	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+210}	4,8	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Продовження таблиці 4.5

<i>bgl_{n+220}</i>	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+230}</i>	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+240}</i>	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+250}</i>	5,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+260}</i>	5,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+270}</i>	5,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+280}</i>	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+290}</i>	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+300}</i>	5,6	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+310}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+320}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+330}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+340}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
<i>bgl_{n+350}</i>	5,4	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Кінець таблиці 4.5

bgl_{n+360}	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+370}	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+380}	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається
bgl_{n+390}	5,0	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Розглянутий приклад також демонструє, як стрімко може змінюватись рівень цукру в крові пацієнтки. Очевидно, рівень цукру в крові пацієнтки почав стрімко спадати, проте вона, очевидно, вжила цукровмісткий продукт, відтак рівень цукру почав стрімко зростати, аж до нормальних показників.

На рис. 4.2 представлено графік щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу (від моменту 0, що рахується стартом доби, до моменту 1440 хвилин, що дорівнює 24 годинам), з якої взято і 20 вимірювань для табл. 4.1.



Рисунок 4.2 – Графік щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу

На рис. 4.3 представлено графік середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за серпень 2023 року, протягом якого він використовував пропоновану інвазивну мобільну систему постійного моніторингу рівня глюкози крові.



Рисунок 4.3 – Графік середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за серпень 2023 року

На рис. 4.4 представлено графік середньомісячних показників рівня цукру в крові пацієнта за період з серпня 2023 року по січень 2024 року, протягом якого він використовував пропоновану інвазивну мобільну систему постійного моніторингу рівня глюкози крові.



Рисунок 4.4 – Графік середньомісячних показників рівня цукру в крові пацієнта за період з серпня 2023 року по січень 2024 року

Отже, запропонована інвазивна мобільна система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

Розроблена інвазивна мобільна система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові є зручною та простою у використанні та носінні, має компактний розмір (підшкірний датчик та додаток у смартфоні), є дешевшою за відомі аналоги, оскільки пацієнт має придбати наразі лише датчик (вартість датчика Eversense становить 99 доларів США з комерційним страховим покриттям при першому придбанні і 600 доларів США з комерційним страховим покриттям при наступних придбаннях, але остання модель імплантованого датчика безперервного моніторингу рівня глюкози Eversense другого покоління може працювати цілих шість місяців, тобто пацієнт потребує лише двох процедур інсталяції та видалення датчика на рік), а мобільний додаток розроблений наразі як дослідний зразок і є безкоштовним. На майбутнє планується встановити невелику плату за

використання пацієнтом мобільного додатку, щоб покрити витрати за хостінг і за хмарне сховище.

Недоліком інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові є деякі протипоказання, пов'язані із постійним носінням імплантованого підшкірного датчика, наприклад, протипоказання до вживання дексаметазону, магнітолу, сорбіту, несумісність з процедурою магнітно-резонансної томографії (МРТ), тощо.

4.3 Висновки

В розділі 4 кваліфікаційної роботи вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка є дешевшою за відомі аналоги, зручною та простою у використанні та носінні, має компактний розмір; виконує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.

Пропонована інвазивна мобільна система постійного моніторингу рівня глюкози крові допомагає пацієнтам із цукровим діабетом стежити за рівнем цукру в крові, вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану, а також отримувати невідкладну допомогу в разі загрози настання гіпо- чи гіперглікемічної коми.

Емпірично підтверджено, що пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

Розроблена інвазивна мобільна система постійного моніторингу рівня глюкози крові є зручною та простою у використанні та носінні, має компактний

розмір (підшкірний датчик та додаток у смартфоні), є дешевшою за відомі аналоги, оскільки пацієнт має придбати наразі лише датчик, мобільний додаток розроблений наразі як дослідний зразок і є безкоштовним. На майбутнє планується встановити невелику плату за використання пацієнтом мобільного додатку, щоб покрити витрати за хостінг і за хмарне сховище.

Недоліком інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові є деякі протипоказання, пов'язані із постійним носінням імплантованого підшкірного датчика, наприклад, протипоказання до вживання дексаметазону, магнітолу, сорбіту, несумісність з процедурою магнітно-резонансної томографії (МРТ), тощо.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень забезпечено моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, яка забезпечує пацієнтам можливість правильно регулювати своє захворювання та запобігати його ускладненням.

У першому розділі проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, проаналізовано інвазивні та неінвазивні методи та заоби моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також кіберфізичні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

У другому розділі виконано вибір датчика для формування нижнього рівня та вибір контролера для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також вибір протоколу передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів кіберфізичної системи. Для реалізації мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом використовуватимемо датчик Senseonics Eversense XL завдяки його середній ціні при найбільш тривалій роботі – шість місяців, тобто пацієнт потребує лише двох процедур інсталяції та видалення датчика на рік. Для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом оберемо інтернет-платформи для медичного моніторингу. Для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом оберемо бездротовий протокол передачі даних Bluetooth.

Крім цього, проведено моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. Зокрема, на основі референтних значень рівня глюкози сформовані правила для аналізу показника

рівня цукру в крові пацієнта, а також розроблені концептуальна та інформаційна моделі мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

У третьому розділі розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, який забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним. За потреби інформація про рівень глюкози у крові, який характеризує гіперглікемічний стан чи попереджає про загрозу гіперглікемічної коми, може бути передана на інсулінову помпу, яка, враховуючи стан пацієнта, розрахує необхідну дозу інсуліну та виконає ін'єкцію інсуліну. Крім цього, розроблений метод забезпечує формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю. Розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом є основою для інвазивної мобільної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові.

Крім цього, в розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблено алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, за яким виконуватиметься постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом, накопичуватиметься і відобразатиметься (у вигляді цифр та діаграм) динаміка змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року тощо, а також відбуватиметься оперативне повідомлення пацієнта та його рідних про загрозу гіпер- або гіпоглікемічної коми. Такий алгоритм допомагає пацієнтам з цукровим діабетом ефективно контролювати свій стан здоров'я та уникати ускладнень чи принаймні зменшувати їх ризики, керувати своїм станом здоров'я, підтримувати стабільний рівень глюкози в крові та підвищувати якість життя.

У четвертому розділі вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка є дешевшою за відомі аналоги, зручною та простою у використанні та носінні, має компактний розмір; виконує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.

Пропонована інвазивна мобільна система постійного моніторингу рівня глюкози крові допомагає пацієнтам із цукровим діабетом стежити за рівнем цукру в крові, вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану, а також отримувати невідкладну допомогу в разі загрози настання гіпо- чи гіперглікемічної коми.

Емпірично підтверджено, що пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

Розроблена інвазивна мобільна система постійного моніторингу рівня глюкози крові є зручною та простою у використанні та носінні, має компактний розмір (підшкірний датчик та додаток у смартфоні), є дешевшою за відомі аналоги, оскільки пацієнт має придбати наразі лише датчик, мобільний додаток розроблений наразі як дослідний зразок і є безкоштовним. На майбутнє планується встановити невелику плату за використання пацієнтом мобільного додатку, щоб покрити витрати за хостінг і за хмарне сховище.

Недоліком інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові є деякі протипоказання, пов'язані із постійним носінням імплантованого підшкірного датчика, наприклад, протипоказання до вживання дексаметазону, магнітолу, сорбіту, несумісність з процедурою магнітно-резонансної томографії (МРТ), тощо.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше розроблено метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді мобільної кіберфізичної системи та забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним; формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю;

2) вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка відрізняється від відомих нижчою ціною, зручністю та простотою у використанні та носінні, компактним розміром та забезпечує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові, яка допомагає пацієнтам із цукровим діабетом стежити за рівнем цукру в крові, вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану, а також отримувати невідкладну допомогу в разі загрози настання гіпо- чи гіперглікемічної коми. Пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому.

За темою кваліфікаційної роботи опублікована одна стаття у закордонному науковому виданні, що індексується в наукометричній базі Scopus (додаток А), та взято участь у 6-th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine (November 17-19 2023, Bratislava, Slovakia):

1) Т. Новорущенко, М. Рутляк, О. Новорущенко, І. Паіонк, В. Осядлий, А. Боярчук. Mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring. CEUR-WS. 2023. Vol. 3609. Pp. 27-36.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ахманов М., Астамирова Х. Настольна книга діабетика. Київ: Ексмо, 2015. 496 с.
2. Статистика захворювання цукровим діабетом [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.who.int/diabetes/>.
3. Карамишева Т. В. Діабет. Сучасна енциклопедія з рекомендаціями. Київ: Ексмо, 2016. 464 с.
4. About World Diabetes Day: Facts & Figures. URL: <https://worlddiabetesday.org/about/facts-figures/>.
5. Древаль О. Цукровий діабет. Фармакологічний довідник. Київ: Вершина, 2016. 680 с.
6. Тронько Д. Н., Соколова Л. К., Ковзун К. Р. Інсулінотерапія. Вчора. Сьогодні. Завтра. Запоріжжя: Медкнига, 2014. 192 с.
7. Sugar feeding patterns of New York *Aedes albopictus* mosquitoes are affected by saturation deficit, flowers, and host seeking / K. Fikrig et al. *PLOS Neglected Tropical Diseases*. 2020. Vol. 14, no. 10. P. e0008244.
8. Differences in Glucose Control of Diabetic Patients with Family Care Support Interventions / I. Fradianto et al. *Malaysian Journal of Nursing*. 2023. Vol. 14, no. 03. P. 110–115.
9. Feng X.-H., Shen S.-J., Jin G.-J. Effect of narrative nursing model on self-management ability and quality of life of patients with advanced pancreatitis and diabetes. *World Chinese Journal of Digestology*. 2021. Vol. 29, no. 22. P. 1316–1322.
10. Protective and risk factors of impaired awareness of hypoglycemia in patients with type 1 diabetes: a cross-sectional analysis of baseline data from the PR-IAH study / N. Sakane et al. *Diabetology & Metabolic Syndrome*. 2023. Vol. 15, no. 1.
11. Factors influencing foot care behavior among patients with type 2 diabetes mellitus who have a high-risk diabetic foot in China / Y.-J. Cheng et al. *Nursing Practice Today*. 2023.

12. Reversal of the diabetic bone signature with anabolic therapies in mice / S. Marino et al. *Bone Research*. 2023. Vol. 11, no. 1.
13. Electrically assisted cycling for individuals with type 2 diabetes mellitus: a pilot randomized controlled trial / J. E. Bourne et al. *Pilot and Feasibility Studies*. 2023. Vol. 9, no. 1.
14. Optimal statin use for prevention of sepsis in type 2 diabetes mellitus / M. Sun et al. *Diabetology & Metabolic Syndrome*. 2023. Vol. 15, no. 1.
15. L-Arginine in diabetes: clinical and preclinical evidence / I. Forzano et al. *Cardiovascular Diabetology*. 2023. Vol. 22, no. 1.
16. Liver biomarkers, lipid metabolites, and risk of gestational diabetes mellitus in a prospective study among Chinese pregnant women / P. Wu et al. *BMC Medicine*. 2023. Vol. 21, no. 1.
17. Almomani M. H., AL-Tawalbeh S. Glycemic Control and Its Relationship with Diabetes Self-Care Behaviors Among Patients with Type 2 Diabetes in Northern Jordan: A Cross-Sectional Study. *Patient Preference and Adherence*. 2022. Volume 16. P. 449–465.
18. A Review of Non-Invasive Optical Systems for Continuous Blood Glucose Monitoring / B. Alsunaidi et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 20. P. 6820.
19. Effectiveness of self-financing patient-led support groups in the management of hypertension and diabetes in low- and middle-income countries: systematic review / R. E. Sanya et al. *Tropical Medicine & International Health*. 2022.
20. Гуров Н. Цукровий діабет 2-го типу. Харків: Онікс, 2016. 136 с.
21. Non-invasive monitoring of blood glucose using optical methods for skin spectroscopy—opportunities and recent advances / S. Delbeck et al. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2018. Vol. 411, no. 1. P. 63–77.
22. Non-Invasive Classification of Blood Glucose Level for Early Detection Diabetes Based on Photoplethysmography Signal / E. Susana et al. *Information*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 59.
23. Review: Non-Invasive Continuous Blood Glucose Measurement Techniques / A. Nawaz et al. *Journal of Bioinformatics and Diabetes*. 2016. Vol. 1, no. 3. P. 1–27.

24. Agalya V., Sumathi S. An Assessment of Pain-Free Blood Glucose Level by Noninvasive Methods. *International Journal of Current Research and Review*. 2021. Vol. 13, no. 05. P. 32–35.
25. Modern noninvasive methods for monitoring glucose levels in patients: a review / K. Dziergowska et al. *Bio-Algorithms and Med-Systems*. 2019. Vol. 15, no. 4.
26. Point-of-Care Biosensors for Glucose Sensing / T. Vyas et al. *Nanobiosensors for point-of-care medical diagnostics*. Singapore, 2022. P. 107–136.
27. Comprehensive Review on Wearable Sweat-Glucose Sensors for Continuous Glucose Monitoring / H. Zafar et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 2. P. 638.
28. Chen Q., Zhao Y., Liu Y. Current development in wearable glucose meters. *Chinese Chemical Letters*. 2021.
29. Continuous Glucose Monitoring Systems. URL: <https://www.diabetesadvocacy.com/diabetes-care/continuous-glucose-monitoring-systems/>.
30. Flash glucose monitoring (FGM): A clinical review on glycaemic outcomes and impact on quality of life / E. Ang et al. *Journal of Diabetes and its Complications*. 2020. Vol. 34, no. 6. P. 107559.
31. Mathew A. A., Vivekanandan S. A Review of Existing Non-invasive Techniques for Glucose Monitoring. *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control*. Singapore, 2021. P. 2409–2420.
32. A Non-Invasive IoT-Based Glucose Level Monitoring System / S. Paul et al. *Current Signal Transduction Therapy*. 2022. Vol. 17.
33. Non-invasive sensing techniques for glucose detection: a review / J. Al-Nabulsi et al. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022. Vol. 11, no. 4. P. 1926–1937.
34. Study of Non-Invasive Methods of Measuring Glucose for Patients with Diabetes Mellitus / T. Sarsembayeva et al. *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, Nur-Sultan, Kazakhstan, 28–30 April 2022. 2022.

35. Non-invasive blood glucose monitoring using near-infrared spectroscopy. URL: <https://www.edn.com/non-invasive-blood-glucose-monitoring-using-near-infrared-spectroscopy/>.

36. Noninvasive Breath Glucometers. URL: <https://www.trendhunter.com/trends/breath-glucometer>.

37. Losoya A., Camacho-Leon S., Dieck-Assad G., Martinez-Chapa S. State of the art and new perspectives in non-invasive glucose sensors. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*. 2012. Vol. 33(1). Pp. 41-52.

38. Hina A., Saadeh W. Noninvasive Blood Glucose Monitoring Systems Using Near-Infrared Technology—A Review. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 13. P. 4855.

39. Shokrehodaei M., Quinones S. Review of Non-Invasive Glucose Sensing Techniques: Optical, Electrical and Breath Acetone. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 5. P. 1251.

40. Du Y. State of the Art and New Perspectives for Non-Invasive Point-of-Care Testing. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*. 2016. Vol. 1, no. 1.

41. Ніколаєв К.Г. Підвищення стабільності аналітичного сигналу та мініатюризація вольтамперометричних сенсорів для визначення глюкози та пероксиду водню: дис. ... канд. хім. наук: 02.01.02 / Ніколаєв Костянтин Геннадійович. – К., 2017. – 138 с.

42. Kotha M. Tech Care: An Efficient Healthcare System Using IoT. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1054. Pp. 655-667.

43. Linkous L., Zohrabi N., Abdelwahed S. Health Monitoring in Smart Homes Utilizing Internet of Things. *2019 4th IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems And Engineering Technologies: Proceedings*. Arlington (USA), 2019. Pp. 29-34.

44. Alhumud M., Hossain M., Masud M. Perspective Of Health Data Interoperability On Cloud-Based Medical Cyber-Physical Systems. *2016 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops: Proceedings*. Seattle (USA), 2016. Pp. 320-326.

45. Rehman Z., Altaf S., Iqbal S. Survey of Authentication Schemes for Health Monitoring: A Subset of Cyber Physical System. *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences And Technology: Proceedings*. Islamabad (Pakistan), 2019. Pp. 653-660.
46. Amarasinghe K., Wiekramasinghe C., Marino D., Rieger C., Manic M. Framework for Data Driven Health Monitoring of Cyber-Physical Systems. *IEEE 2018 Resilience Week*. 2018. Pp. 25-30.
47. Sultanovs E., Romanovs A. Centralized Healthcare Cyber-Physical System's Data Analysis Module Development. *Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*. 2016. Vol. 1. Pp. 67-84.
48. Shangguan L., Gopalswamy S. Health Monitoring for Cyber Physical Systems. *IEEE Systems Journal*. 2020. Volume14. Issue1. Pp. 1457-1467.
49. Chen F., Tang Y., Wang C., Huang J., Huang C., Xie D., Wang T., Zhao C. Medical Cyber-Physical Systems: A Solution to Smart Health and the State of the Art. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2021. Pp. 98-120.
50. Shah T., Yavari A., Mitra K., Saguna S., Jayaraman P., Rabhi F., Ranjan R. Remote health care cyber-physical system: quality of service (QoS) challenges and opportunities. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. 2016. Vol. 1. Issue 1. Pp. 40-48.
51. Nguyen T., Min D., Choi E., Lee J. Dependability and Security Quantification of an Internet of Medical Things Infrastructure Based on Cloud-Fog-Edge Continuum for Healthcare Monitoring Using Hierarchical Models. *IEEE Internet Of Things Journal*. 2021. Vol. 8. Issue 21. Pp. 15704-15748.
52. Secure Smart Wearable Computing through Artificial Intelligence-Enabled Internet of Things and Cyber-Physical Systems for Health Monitoring / L. K. Ramasamy et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 1076.
53. Drummond D., Coulet A. Technical, Ethical, Legal, and Societal Challenges With Digital Twin Systems for the Management of Chronic Diseases in Children and Young People. *Journal of Medical Internet Research*. 2022. Vol. 24, no. 10. P. e39698.

54. Randine P., Micucci D., Hartvigsen G., Årsand E. The house of carbs: Personalized carbohydrate dispenser for people with diabetes. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2020. Vol. 270. Pp. 693 – 697.
55. A smart medical system for dynamic closed-loop blood glucose-insulin control / J. Gao et al. *Smart Health*. 2017. Vol. 1-2. P. 18–33.
56. Brugués A., Bromuri S., Schumacher M. Demonstration of MAGPIE: An Agent Platform for Monitoring Chronic Diseases on Android. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2017. P. 299–302.
57. Panda A., Pinisetty S., Roop P. A secure insulin infusion system using verification monitors. *MEMOCODE '21: 19th ACM-IEEE International Conference on Formal Methods and Models for System Design: Proceedings, Virtual Event China*. New York, NY, USA, 2021.
58. Ghorbani M., Bogdan P. A cyber-physical system approach to artificial pancreas design. *2013 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS): Proceedings, Montreal, QC, Canada, 29 September – 4 October 2013*. 2013.
59. Model-Based Safety Assessment of an Insulin Pump System with AltaRica 3.0 / J. Vidalie et al. *31st European Safety and Reliability Conference: Proceedings, 19–23 September 2021*. Singapore, 2021.
60. Linearization based Safety Verification of a Glucose Control Protocol / A. Samaddar et al. *2019 IEEE 22nd International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC): Proceedings, Valencia, Spain, 7–9 May 2019*. 2019.
61. Model Predictive Control of Blood Glucose for Type 1 Diabetic Rats in a Cyber-Physical System / H. S. Ko et al. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 39. P. 341–348.
62. A Data-Driven Behavior Modeling and Analysis Framework for Diabetic Patients on Insulin Pumps / S. Chen et al. *2015 International Conference on Healthcare Informatics (ICHI): Proceedings, Dallas, TX, USA, 21–23 October 2015*. 2015.

63. Glucose values from the same continuous glucose monitoring sensor significantly differ among readers with different generations of algorithm / N. Babaya et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.

64. A probabilistic computation framework to estimate the dawn phenomenon in type 2 diabetes using continuous glucose monitoring / S. Barua et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1.

65. Generative adversarial network-based data augmentation for improving hypoglycemia prediction: A proof-of-concept study / W. Seo et al. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2024. Vol. 92. P. 106077.

66. Hjort A., Iggman D., Rosqvist F. Glycemic variability assessed using continuous glucose monitoring in individuals without diabetes and associations with cardiometabolic risk markers: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Nutrition*. 2024. Vol. 43, no. 4. P. 915–925.

67. Early glucose abnormalities revealed by continuous glucose monitoring associate with lung function decline in cystic fibrosis: A five-year prospective study / L. Rakotoarisoa et al. *Journal of Diabetes and its Complications*. 2024. P. 108703.

68. Accuracy of intermittently scanned continuous glucose monitoring during caesarean delivery in pregnant women with insulin-treated diabetes / F. Citro et al. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2024. P. 111611.

69. Continuous glucose monitoring in adults with type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis / M. Jancev et al. *Diabetologia*. 2024.

70. ROUTE-T1D: A behavioral intervention to promote optimal continuous glucose monitor use among racially minoritized youth with type 1 diabetes: Design and development / E. Straton et al. *Contemporary Clinical Trials*. 2024. P. 107493.

71. Personalized nutrition and machine-learning: Exploring the scope of continuous glucose monitoring in healthy individuals in uncontrolled settings / A. Zignoli et al. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2024. Vol. 90. P. 105809.

72. Clinical features of type 1 diabetes in older adults and the impact of intermittently scanned continuous glucose monitoring: An Association of British Clinical

Diabetologists (ABCD) study / H. Deshmukh et al. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2024.

73. Effectiveness of Continuous Glucose Monitoring on Metrics of Glycemic Control in Type 2 Diabetes Mellitus: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials / S. Uhl et al. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2023.

74. Kong S.-Y., Cho M.-K. Effects of Continuous Glucose Monitoring on Glycemic Control in Type 2 Diabetes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Healthcare*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 571.

75. Missing Data Statistics Provide Causal Insights into Data Loss in Diabetes Health Monitoring by Wearable Sensors / C. I. R. Braem et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 5. P. 1526.

76. Is It Time to Move Beyond TIR to TITR? Real-World Data from Over 20,000 Users of Continuous Glucose Monitoring in Patients with Type 1 and Type 2 Diabetes / T. C. Dunn et al. *Diabetes Technology & Therapeutics*. 2024. Vol. 26, no. 3. P. 203–210.

77. Reddy M., Oliver N. The role of real-time continuous glucose monitoring in diabetes management and how it should link to integrated personalized diabetes management. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2024. Vol. 26, S1. P. 46–56.

78. Estimating Glycemia From HbA1c and CGM: Analysis of Accuracy and Sources of Discrepancy / V. Tozzo et al. *Diabetes Care*. 2024. Vol. 47, no. 3. P. 460–466.

79. Garg S. K., McVean J. J. Development and Future of Automated Insulin Delivery (AID) Systems. *Diabetes Technology & Therapeutics*. 2024. Vol. 26, S3. P. 1–6.

80. Comparing the glycaemic outcomes between real-time continuous glucose monitoring (rt-CGM) and intermittently scanned continuous glucose monitoring (isCGM) among adults and children with type 1 diabetes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials / Y. Zhou et al. *Diabetic Medicine*. 2024.

81. Continuous glucose monitoring in older adults with diabetes: Data from the diabetes prospective follow-up (DPV) registry / J. Grammes et al. *Diabetic Medicine*. 2023.

82. A Comparison of Continuous Glucose Monitoring-Measured Time-in-Range 70–180 mg/dL Versus Time-in-Tight-Range 70–140 mg/dL / R. W. Beck et al. *Diabetes Technology & Therapeutics*. 2023.

83. Intermittently scanned continuous glucose monitoring in adults with type 1 diabetes: A subgroup analysis from the FLASH-UK study / L. Leelarathna et al. *Diabetic Medicine*. 2023.

84. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control. *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Prague, Czech Republic, 28 June – 1 July 2022. 2022.

85. Сенсор Dexcom G6. URL: https://www.goodsugar.com.ua/product-page/dexcom-g6?utm_source=google&utm_medium=wix_google_feed&utm_campaign=freelistings&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw5ImwBhBtEiwAFHDZx5MuqEymU9b6BAFw4MvKv_fdSxkhWev-wOfFjwo5T2XpOBDV9MgbFxoCsYAQA_vD_BwE.

86. Сенсор глюкози Guardian Sensor 3 Medtronic. URL: <https://saharokshop.com/ua/p1216907006-sensor-glyukozy-guardian.html>.

87. Сенсор FreeStyle Libre 3. URL: https://dommedtehniki.com.ua/ua/freestyle-libre-3?gclid=CjwKCAjw5ImwBhBtEiwAFHDZx0DT86Xl5Eo_hWCtMQUhTIPk_U6B150l3Ab1zhENAcQvX0aV_330hx0CJXkQA_vD_BwE.

88. Eversense® CGM System. URL: https://www.senseonics.com/~/_media/Files/S/Senseonics-IR/documents/events/senseonics-investor-deck-december-2022-.pdf.

89. Сенсор глюкози Enlite Sensor, Medtronic. URL: <https://saharokshop.com/ua/p1216853892-sensor-glyukozy-enlite.html>.

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

КОПІЯ СТАТТІ У ЗАКОРДОННОМУ НАУКОВОМУ ВИДАННІ

1) T. Hovorushchenko, M. Pytlyak, O. Hovorushchenko, I. Paionk, V. Osyadlyi, A. Boyarchuk. Mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring. CEUR-WS. 2023. Vol. 3609. Pp. 27-36.

Mobile Cyber-Physical System for Diabetic Patients' Health Status Monitoring

Tetiana Hovorushchenko^a, Maksym Pytlyak^a, Olha Hovorushchenko^b, Illya Paionk^a, Vitaliy Osyadlyi^a, Artem Boyarchuk^c

^a Khmelnytskyi National University, Institutska str., 11, Khmelnytskyi, 29016, Ukraine

^b National Pirogov Memorial Medical University, Pirogova str., 56, Vinnytsya, 21018, Ukraine

^c Tallinna Tehnikakõlikool, Ehitajate tee 5, Tallinn, 12616, Estonia

Abstract

Continuous monitoring of the health status of diabetic patients using a mobile cyber-physical system (continuous glucose monitor) is currently an urgent task. The aim of this study is to develop a method and design the architecture of an invasive mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring. The developed method and mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring provide: measuring the patient's blood sugar level, analyzing the sugar level, issuing a notification to the patient about the onset of a hypo- or hyperglycemic state, as well as the threat of hypo- or hyperglycemic coma, as well as sending messages about the existing threat of hypo- or hyperglycemic coma to the patient's relatives. In addition, the developed method and system provide the formation of a set of ten-minute indicators of the patient's blood sugar level per day, the formation of a set of average daily indicators of the patient's blood sugar level per month and the formation of a set of indicators of the patient's average monthly blood sugar level per year in order to demonstrate the dynamics of changes in the patient's blood sugar level to the patient and his doctor. The developed mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring is convenient and easy to use and wear, has a compact size, and is cheaper than known analogs.

Keywords

Mobile cyber-physical system, health monitoring, diabetes mellitus, blood sugar measurement, subcutaneous sensor for measuring blood sugar.

1. Introduction

Diabetes mellitus is an endocrine disease characterized by a malfunction of the pancreas and, as a result, a complete or partial cessation of the production of the hormone insulin or a decrease in the sensitivity of insulin-dependent tissues to insulin. It is a chronic metabolic disease characterized by high blood sugar (glucose) levels. It is a chronic hyperglycemia syndrome that leads to disorders of all types of metabolism, primarily carbohydrate metabolism, vascular damage (angiopathy), nervous system (neuropathy), and other organs and systems. It is a condition in which the body does not produce enough insulin or does not use it effectively [1-3].

According to the World Health Organization, the number of people with diabetes was more than 537 million in 2021, which is 10% of the world's population. This number is expected to rise to 643 million by 2030 and 783 million by 2045 [4]. Diabetes mellitus leads to other diseases, such as complete or partial vision loss, liver failure, heart attack, stroke, vascular disease, and lower limb amputation. This disease ranks seventh among the diseases that most often lead to disability and mortality in the world. The terrible fact is that the trend of the disease is growing and "getting younger". Until the early

IDDM'2023: 6th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine, November 17–19, 2023, Bratislava, Slovakia

EMAIL: tat_yana@ukr.net (T. Hovorushchenko); m.pytlyak@i.ua (M. Pytlyak), govorusenkoo@gmail.com (O. Hovorushchenko); paionk@ukr.net (I. Paionk), vitalik9865@gmail.com (V. Osyadlyi); a.boyarchuk@taltech.ee (A. Boyarchuk)

ORCID: 0000-0002-7942-1857 (T. Hovorushchenko); 0009-0001-3149-8783 (M. Pytlyak); 0000-0001-6583-5699 (O. Hovorushchenko); 0009-0008-4023-0739 (I. Paionk); 0000-0001-7861-4684 (V. Osyadlyi); 0000-0001-7349-1371 (A. Boyarchuk)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)

2000s, diabetes was most often found in people over 25 years old, but now 15% of people with the disease are children and adolescents under the age of 20 [4].

The following types of diabetes are distinguished:

1. type 1 diabetes is a complete or partial cessation of insulin secretion by the pancreas. This type of diabetes develops when the body's immune system attacks and destroys the pancreatic cells that produce insulin. It causes the body to be unable to produce enough insulin to control blood glucose levels. This type of disease manifests itself immediately after birth, in childhood or adolescence. It is usually caused by heredity. The prevalence of the first type of diabetes is 10-15% of all cases of diabetes. In this type, the main method of regulating blood glucose is insulin therapy, which is carried out in the form of injecting artificial insulin into human adipose tissue by injection, which allows you to balance the body's metabolism. People with type 1 diabetes need to inject insulin as needed to control blood sugar levels [1]
2. type 2 diabetes mellitus is a decrease in the sensitivity of the cell membrane to incoming insulin, in some cases accompanied by impaired insulin secretion by the pancreas. This type of diabetes occurs when the body does not produce enough insulin or does not use it effectively. Type 2 diabetes occurs when the body becomes less sensitive to insulin, or the pancreas does not produce enough insulin. This type of diabetes usually develops slowly. It is the most common type of diabetes and is often associated with poor lifestyle choices, including poor diet, lack of physical activity, and being overweight. It is considered acquired and is usually detected in people at an older age who have diseases associated with metabolic disorders, overweight. The disease develops slowly, which is often the reason for late detection. The blood glucose level is maintained through the use of hypoglycemic drugs, insulin injections, diet and regular exercise. Treatment of type 2 diabetes may include dietary changes, physical activity, oral medications, insulin injections, or a combination of these methods [2, 3, 5, 6]
3. gestational diabetes occurs in pregnant women who did not previously have diabetes. It usually disappears after childbirth, but women who have had gestational diabetes are at increased risk of developing type 2 diabetes in the future [7, 8].

It is vital for people with diabetes to maintain normal blood glucose levels. The blood glucose level in a healthy person should reach from 4.0 to 6.0 mmol/l (in general, the reference values are 3.5-6.7 mmol/l). Determination of this indicator is a mandatory procedure when taking a complete blood count of every patient admitted to a clinic or hospital. Glucose control is an important component of the life of every person with diabetes, so it is most important that this process is as quick, painless and accurate as possible. Collecting blood sugar readings plays an important role in the timely, proper treatment and control of diabetes. Insulin therapy and medication administration (dose calculation, frequency, and specifics of use) are prescribed by a doctor, but are performed by patients themselves on a daily basis at home. Since blood glucose levels can change after physical activity, depending on the emotional state of a person and other factors, it is advisable to measure glucose levels before each medication administration. This manipulation has become possible thanks to glucose meters that can be used at home without medical supervision and assistance [9-11].

At the moment, the most common method is to pierce a person's skin and extract a drop of blood onto a test strip, which is a component of a glucometer, which is currently most often used to measure blood sugar levels. The test strip contains chemicals that are sensitive to glucose in the blood sample. This method is the most affordable, but not always convenient.

A blood glucose monitoring system is a very important tool for people with diabetes. Such systems provide the ability to monitor blood glucose levels and take the necessary measures to maintain them in the normal range. A glucose monitor is a medical device used to measure blood glucose levels. It works by using test strips that interact with a drop of blood obtained with a lancet. After the drop of blood hits, the test strip, the glucose monitor measures the glucose level and displays the result on the screen. This can help people with diabetes manage their disease and reduce the risk of complications [12-14].

Given the current trend toward the introduction of information technology [15-17] and cyber-physical systems [18, 19] in all areas of medicine, and given the importance of continuous monitoring of the health of patients with diabetes, it is necessary to make such monitoring permanent and automate it as much as possible using a cyber-physical system that combines the complex physiological dynamics of patients in the modern medical field with built-in programmable control devices. Glucose control

using modern continuous monitoring technology is more accurate and efficient today. In this case, a mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring in the form of a subcutaneous sensor and mobile app will be useful for continuous automatic blood glucose measurements, which will continuously monitor the blood glucose level of a patient with diabetes (continuous measurement and transmission of readings to a mobile application) and will promptly notify the patient and his or her family of excessively high or excessively low glucose levels, allowing them to take timely measures to normalize sugar levels. So, continuous monitoring of the health status of diabetic patients using a mobile cyber-physical system (continuous glucose monitor) is *currently an urgent task*.

2. Case Study

There are two types of blood glucose monitoring systems – invasive and non-invasive (Figure 1).

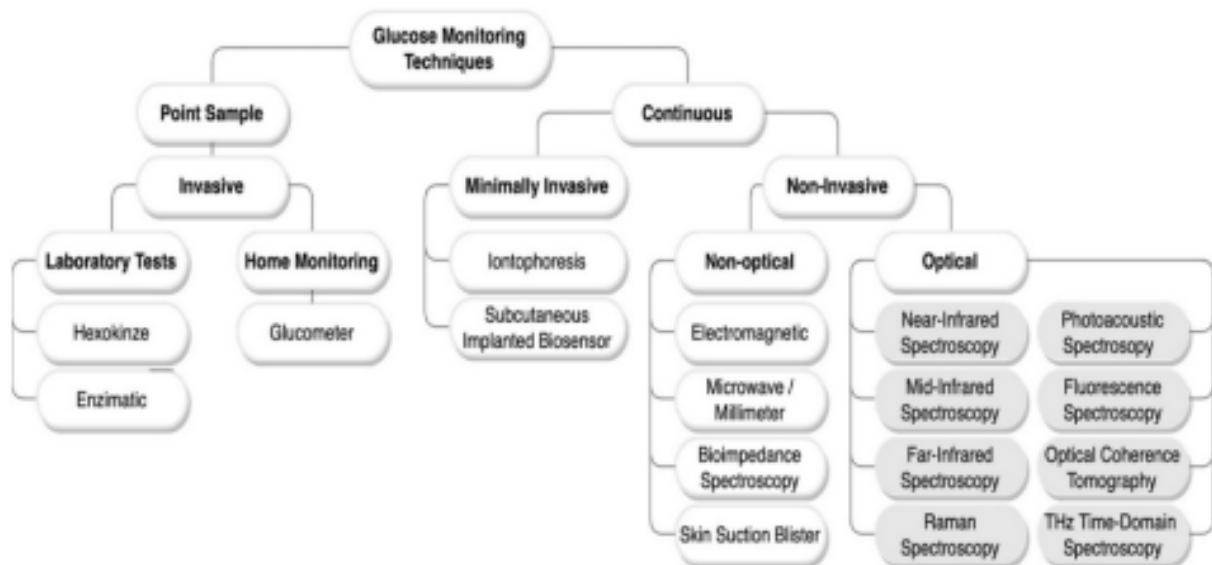


Figure 1: Blood glucose monitoring systems [10]

Invasive blood glucose monitoring is used to accurately and continuously monitor glucose levels in people with diabetes. This method requires the insertion of a sensor directly into the body to measure glucose levels. The data from the sensor can be transmitted directly to an external device or read only by a reader that is placed on the skin over the sensor. Continuous glucose monitors measure blood sugar every few minutes using a sensor inserted under the skin [20-22].

The advantages of invasive blood glucose monitoring include [20-22]:

1. constant availability of information about glucose levels, which allows you to see the dynamics of changes and respond appropriately
2. assistance in decision-making – with the help of information provided by invasive monitoring tools, it is possible to better understand the impact of nutrition, physical activity and treatment on blood glucose levels, which helps to make more effective decisions about diabetes treatment and behavior of diabetic patient.

However, invasive monitoring also has its limitations and disadvantages [20-22]:

1. high cost of commercial invasive monitoring systems
2. measurement error that needs to be taken into account (but invasive monitoring provides more accurate data than traditional glucose measurement methods)
3. the need for proper care and maintenance (regular replacement of sensors, proper calibration of the system, etc.)
4. the risk of infections and complications when the sensor is inserted under the skin (it is important to follow proper hygiene and care procedures)
5. the impact of external factors on the monitoring system (high humidity, temperature, magnetic fields, etc.).

Non-invasive blood glucose monitoring is used to continuously monitor glucose levels without the need to insert a sensor under the skin. These methods are based on measuring glucose using external devices that do not require penetration into the body. However, it is worth noting that to date, non-invasive blood glucose monitoring has not yet reached the same accuracy and reliability as invasive methods [23-26].

Here are some modern types of non-invasive blood glucose monitoring [23-26]:

1. near-infrared spectroscopy – measures the reflection or absorption of infrared light from tissues to determine glucose levels and is based on the fact that glucose levels affect the light characteristics of tissues
2. electrochemical sensors – use electrodes that react with glucose in the blood and create an electrical signal that can be measured, but for accurate measurement, the problem of the influence of other substances on the results must be solved
3. optical sensors – use optical methods, such as photoplethysmography (measuring pulse with light), to determine changes in blood glucose; based on the observation of the dependence of the optical properties of blood on glucose levels
4. non-contact technologies – include the use of technologies, such as radio wave or microwave devices to measure glucose levels in the body, which do not require physical contact with the body
5. breathing equipment – assesses the relationship between blood glucose and exhaled glucose; this method may require special breathing equipment and exhaled air analysis.

Non-invasive glucose monitoring systems have the following advantages that make them attractive to users: painlessness (no need for a skin puncture to measure glucose levels) and reduced risk of infection (due to no skin puncture and no contact with blood).

Although non-invasive blood glucose monitoring has potential in the future, some of these technologies are still under research and development. The accuracy and reliability of their measurements still need to be further improved.

The aim of our study is to develop a method and design the architecture of an invasive mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring, which will consist of a subcutaneous sensor and a mobile application, will be cheaper than known analogues, convenient and easy to use and wear, have a compact size; will perform continuous monitoring of blood glucose levels in a patient with diabetes; Analyzing the results of such monitoring, it will promptly notify the patient and his or her family of excessively high or excessively low glucose levels; as well as accumulate and display (in the form of numbers and charts) the dynamics of changes in the patient's blood sugar level during the day, month, year, etc.

3. Mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring

Method for diabetic patients' health status monitoring consists of the followings stages:

1. measurement of the patient's blood sugar level (variable *bsl*) every 10 minutes
2. analysis of the patient's blood sugar level (of variable *bsl*):
 - if $bsl \geq 3.5 \text{ mmol/l}$ and $bsl \leq 6.7 \text{ mmol/l}$, then patient's blood sugar level is normal and no action is required
 - if $bsl < 3.5 \text{ mmol/l}$ and $bsl \geq 2 \text{ mmol/l}$, then patient is notified: "Hypoglycemia"
 - if $bsl > 6.7 \text{ mmol/l}$ and $bsl \leq 16.5 \text{ mmol/l}$, then patient is given a message: "Hyperglycemia"
 - if $bsl < 2 \text{ mmol/l}$, then message "Threat of hypoglycemic coma" is issued not only to the patient, but also sent to his relatives (the patient's geolocation and name and surname are also added to the message)
 - if $bsl > 16.5 \text{ mmol/l}$, then message "Threat of hyperglycemic coma" is issued not only to the patient, but also sent to his/her relatives (the patient's geolocation and name and surname are also added to the message)
3. generating a set of ten-minute blood sugar levels per day (set *DBSL*): $DBSL = \{bsl_1, bsl_2, bsl_3, \dots, bsl_{144}\}$ – this set is available in the patient's mobile application (in the form of numbers and/or diagrams) so that the patient and his/her doctor can see the dynamics of changes in blood

sugar levels during the day (there are 24 hours in a day, 1440 minutes, i.e. 144 10-minute intervals)

4. calculation of the average daily (144 10-minute intervals) blood sugar level of the patient by the formula (1):

$$adbsl = (\sum_{i=1}^{144} bsl_i) / 144 \quad (1)$$

5. generating a set of average daily blood glucose levels for a patient for a month (set *MBSL*): $MBSL = \{adbsl_1, adbsl_2, adbsl_m\}$ – this set is also available in the patient's mobile application (in the form of numbers and/or diagrams) so that the patient and his/her doctor can see the dynamics of changes in the average daily blood sugar level during the month; we assume there are m days in a month

6. calculation of the patient's average monthly (m days in a month) blood sugar level by the formula (2):

$$ambsl = (\sum_{j=1}^m adbsl_j) / m \quad (2)$$

7. generating a set of average monthly blood sugar levels for the patient for the year (set *YBSL*): $YBSL = \{ambsl_1, ambsl_2, ambsl_{12}\}$ – this set is also available in the patient's mobile application (in the form of numbers and/or diagrams) so that the patient and his/her doctor can see the dynamics of changes in the average monthly blood sugar level during the year.

The developed method for diabetes patients' health status monitoring provides: measuring the patient's blood sugar level, analyzing the sugar level, issuing a notification to the patient about the onset of a hypo- or hyperglycemic state, as well as the threat of hypo- or hyperglycemic coma, as well as sending messages about the existing threat of hypo- or hyperglycemic coma to the patient's relatives. It is possible case, that information about the level of sugar that characterizes a hyperglycemic state or warns of the threat of hyperglycemic coma is transmitted to the insulin pump to ensure the calculation of the insulin dose and the performance of an insulin injection, if necessary. In addition, the developed method provides the formation of a set of ten-minute indicators of the patient's blood sugar level per day, the formation of a set of average daily indicators of the patient's blood sugar level per month and the formation of a set of indicators of the patient's average monthly blood sugar level per year in order to demonstrate the dynamics of changes in the patient's blood sugar level to the patient and his doctor.

Mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring is based on the developed method for diabetic patients' health status monitoring.

The mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring includes a subcutaneous sensor for measuring blood sugar levels (such sensors are usually worn for several weeks to several months, and then need to be replaced; such sensor is the physical component of the system), as well as a web server (receiver) and a specially developed mobile application that is installed on the patient's and his relatives' phone.

The mobile application has two possible roles: "patient" or "patient's relative". When registering in the mobile application, the patient indicates his or her name and surname, mandatory provides access to geolocation data, and specifies the mobile phone numbers of relatives to whom notifications about the existing threat of hypo- or hyperglycemic coma should be sent. When registering in the mobile application, the patient's relatives select from the database by name, surname and/or phone number of patient, whose critical health condition they authorize to send them notifications.

The subcutaneous sensor measures the patient's blood sugar level every 10 minutes, the sensor transmits the received value to the receiver (web server), which organizes online data recording to the database and online transmitting the measurement results to the patient's mobile application, where the sugar level is analyzed. The blood sugar level is measured and analyzed automatically, and the information is recorded in the database every 10 minutes. If the blood glucose level does not fall within the range of reference values, the patient receives a notification in the mobile application about the hypo- or hyperglycemic state. If the blood sugar level is critically low or critically high, the mobile application sends a notification about the existing threat of hypoglycemic or hyperglycemic coma to both the patient and his or her relatives (the patient's geolocation and name and surname are also included in the notification to the relatives).

In addition, the mobile application provides accumulation (in the database) and display (in the form of numbers and charts) of the dynamics of changes in the patient's blood sugar level during the day, month, year, etc., which can be useful both for the patient in the selection of physical activities,

nutrition, etc., and for his or her doctor in the selection of medications and their dosage to avoid hypoglycemia or hyperglycemia in the future.

Architecture of mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring is represented on Figure 2.

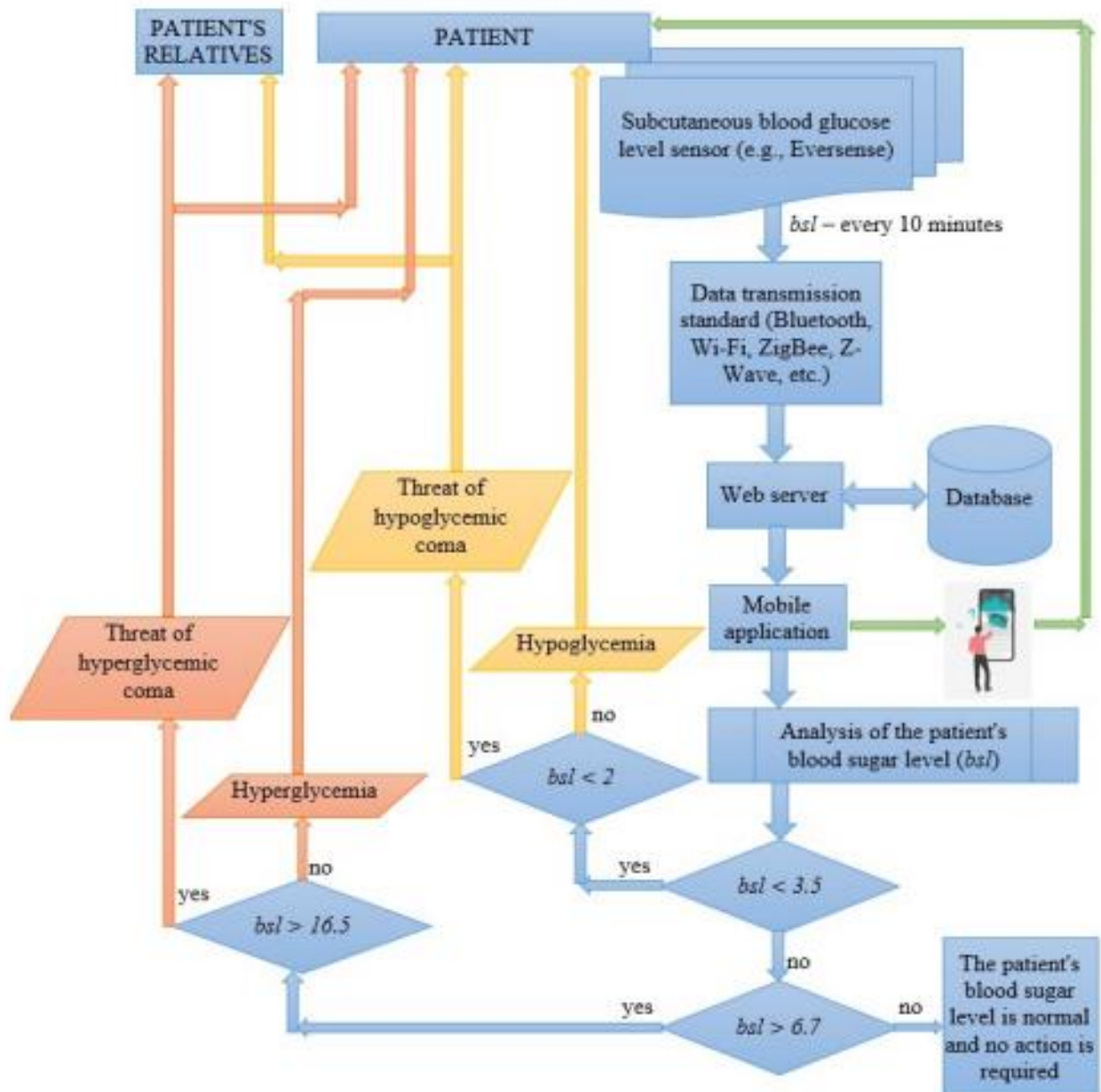


Figure 2: Architecture of mobile cyber-physical system for diabetes patients' health status monitoring

4. Results & Discussion

Let's consider the case of using the developed method and cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring.

The patient decided to use the developed cyber-physical system. To do so, he purchased an Eversense sensor to measure his blood sugar level, and his doctor implanted the sensor under the skin on his forearm. The patient installed the developed mobile application on his phone and on the phone of his relatives. When registering in the mobile application, the patient chose the role of "patient", indicated his first and last name, provided access to geolocation data, and indicated the mobile phone numbers of relatives to whom notifications about the existing threat of hypoglycemic or hyperglycemic coma should be sent. When registering in the mobile application, the patient's relatives chose the role

of "patient's relative" and selected from the database by name, surname and/or phone number the patient whose critical health condition was allowed to be notified. After that, the mobile cyber-physical system began to function.

The results of the mobile cyber-physical system functioning on 20 measurements, starting from time i and then every 10 minutes, during which the patient developed a threat of hyperglycemic coma, are presented in Table 1.

Table 1
Results of the mobile cyber-physical system functioning on 20 measurements

Variable	Blood sugar level	Actions of the cyber-physical system
bsl_i	5.8	The patient's blood sugar level is normal and no action is required
bsl_{i+10}	5.75	The patient's blood sugar level is normal and no action is required
bsl_{i+20}	5.9	The patient's blood sugar level is normal and no action is required
bsl_{i+30}	6.3	The patient's blood sugar level is normal and no action is required
bsl_{i+40}	6.7	The patient's blood sugar level is normal and no action is required
bsl_{i+50}	7	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+60}	7.2	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+70}	8	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+80}	8.9	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+90}	9.7	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+100}	11.1	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+110}	14	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+120}	15.8	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+130}	17.9	Message "Threat of hyperglycemic coma" was sent to the patient and his relatives (the patient's geolocation and name and surname were also added to the message to the relatives)
bsl_{i+140}	16.5	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+150}	13.4	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+160}	10.8	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+170}	8.7	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+180}	7.75	The patient was given a message: "Hyperglycemia"
bsl_{i+190}	6.5	The patient's blood sugar level is normal and no action is required

This example demonstrates how rapidly a patient's blood sugar can change. Obviously, most probably the patient missed the notifications of the hyperglycemic state and did not take an insulin injection on time, so the blood sugar level began to rise rapidly and reached a level that threatens to cause a hyperglycemic coma. After the system sent a message about the threat of hyperglycemic coma to the patient and his relatives, the patient apparently took an insulin injection, because his blood sugar level began to drop rapidly, until it returned to normal.

Figure 3 shows a chart of the patient's ten-minute blood sugar levels for the day (from time 0, which is the start of the day, to time 1440 minutes, which is 24 hours), from which the 20 measurements for Table 1 were taken. Figure 4 shows a chart of the patient's average daily blood sugar levels for August 2023, during which he used the proposed mobile cyber-physical system.

In the above case, the developed mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring helped save the patient and prevent the onset of hyperglycemic coma. The developed system also helps the patient to monitor his health status, in particular, blood sugar levels, and to take the necessary medications in time in case of hypo- or hyperglycemic conditions. In addition, the proposed system provides accumulation and display of the dynamics of changes in the patient's blood sugar level during the day, month, and year, which can be useful for self-diagnosis by the patient and for research by the doctor to avoid hypoglycemia or hyperglycemia in the future.

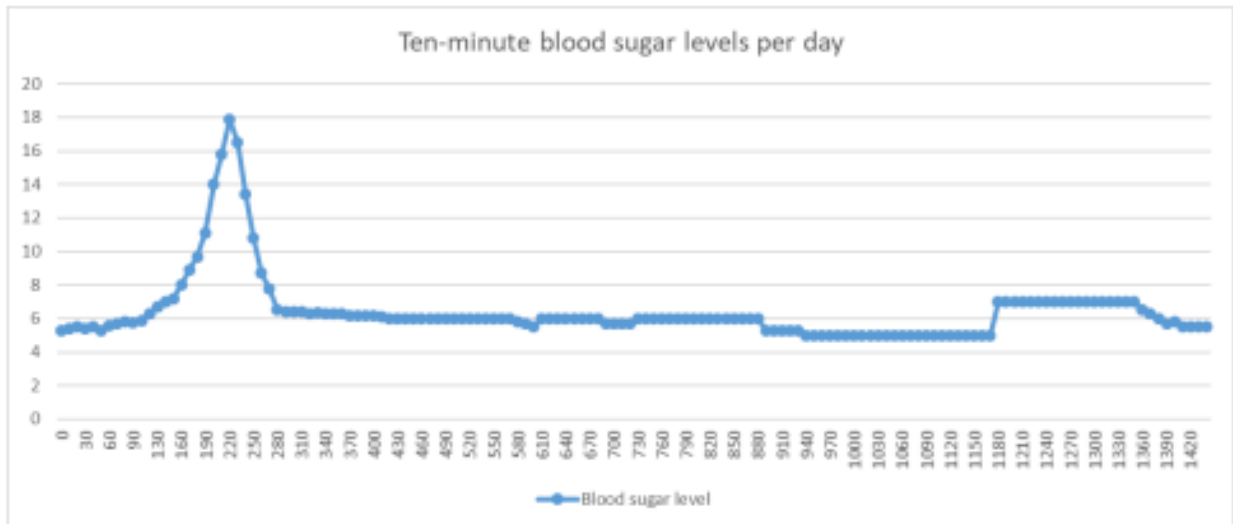


Figure 3: Chart of ten-minute blood sugar levels for a patient per day

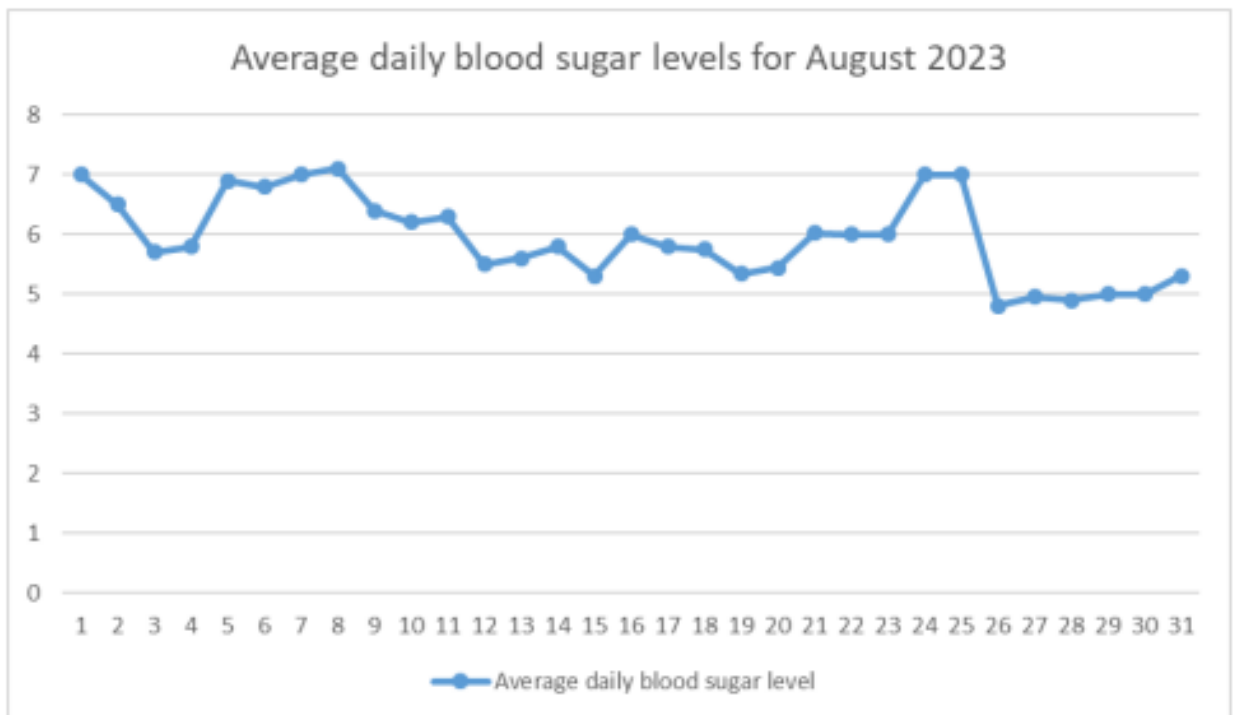


Figure 4: Chart of average daily blood sugar levels for a patient for August 2023

The developed mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring is convenient and easy to use and wear, has a compact size (subcutaneous sensor and smartphone app), and is cheaper than known analogues, as the patient currently only has to purchase the sensor, the mobile application is currently developed as a pilot sample and is free of charge. In the future, it is planned to set a small fee for the patient's use of the mobile application to cover the costs of hosting and cloud storage.

In summary, the proposed mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring helps patients with diabetes monitor their blood sugar levels and receive emergency assistance in case of a threat of hypoglycemic or hyperglycemic coma.

5. Conclusions

The aim of this study is to develop a method and design of the architecture of an invasive mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring, which will consist of a subcutaneous sensor and a mobile application, will be cheaper than known analogues, convenient and

easy to use and carry, and will have a compact size; it will continuously monitor the blood glucose level of a patient with diabetes; will promptly notify the patient and his/her relatives of excessively high or excessively low glucose levels, as well as accumulate and display (in the form of numbers and charts) the dynamics of changes in the patient's blood sugar level during the day, month, year, etc.

The developed method for diabetic patients' health status monitoring provides: measuring the patient's blood sugar level, analyzing the sugar level, issuing a notification to the patient about the onset of a hypo- or hyperglycemic state, as well as the threat of hypo- or hyperglycemic coma, as well as sending messages about the existing threat of hypo- or hyperglycemic coma to the patient's relatives. In addition, the developed method provides the formation of a set of ten-minute indicators of the patient's blood sugar level per day, the formation of a set of average daily indicators of the patient's blood sugar level per month and the formation of a set of indicators of the patient's average monthly blood sugar level per year in order to demonstrate the dynamics of changes in the patient's blood sugar level to the patient and his doctor.

The proposed mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring helps the patient to monitor their health status, in particular, blood sugar levels, and to take the necessary medications in time in case of hypo- or hyperglycemic conditions. In addition, the proposed system provides accumulation and display of the dynamics of changes in the patient's blood sugar level during the day, month, and year, which can be useful for self-diagnosis by the patient and for research by the doctor to avoid hypoglycemia or hyperglycemia in the future.

The developed mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring is convenient and easy to use and wear, has a compact size, and is cheaper than known analogues, as the patient currently only needs to purchase a sensor, the mobile application is currently developed as a pilot sample and is free of charge. In the future, it is planned to charge a small fee for the patient's use of the mobile application to cover hosting and cloud storage costs. Directions for further research: standardization of the developed mobile cyber-physical system, certification of the developed mobile application, ensuring cybersecurity of the developed mobile cyber-physical system.

6. References

- [1] N. Sakane, K. Kato, S. Hata, E. Nishimura, R. Araki, K. Kouyama, M. Hatao, Y. Matoba, Y. Matsushita, M. Domichi, A. Sukanuma, S. Sakane, T. Murata, F. L. Wu. Protective and risk factors of impaired awareness of hypoglycemia in patients with type 1 diabetes: a cross-sectional analysis of baseline data from the PR-IAH study. *Diabetology & Metabolic Syndrome* 15 1 (2023) 79. doi:10.1186/s13098-023-01024-x.
- [2] Y.-J. Cheng, K. Masingboon, N. Samartkit, S. Mounkum, Factors influencing foot care behavior among patients with type 2 diabetes mellitus who have a high-risk diabetic foot in China. *Nursing Practice Today* (2023). doi:10.18502/npt.v10i1.12256.
- [3] S. Marino, N. Akel, S. Li, M. Cregor, M. Jones, B. Perez, G. Troncoso, J. Meeks, S. Stuart, A. Y. Sato. Reversal of the diabetic bone signature with anabolic therapies in mice *Bone Research* 11 1 (2023). doi:10.1038/s41413-023-00261-0.
- [4] About World Diabetes Day: Facts & Figures, 2022. URL: <https://worlddiabetesday.org/about/facts-figures/>.
- [5] J. E. Bourne, S. Leary, A. Page, A. Searle, C. England, D. Thompson, R. C. Andrews, C. Foster, A. R. Cooper. Electrically assisted cycling for individuals with type 2 diabetes mellitus: a pilot randomized controlled trial. *Pilot and Feasibility Studies* 9 1 (2023). doi:10.1186/s40814-023-01283-5.
- [6] M. Sun, Y. Tao, W.-M. Chen, S.-Y. Wu, J. Zhang. Optimal statin use for prevention of sepsis in type 2 diabetes mellitus. *Diabetology & Metabolic Syndrome* 15 1 (2023). doi:10.1186/s13098-023-01041-w.
- [7] I. Forzano, R. Avvisato, F. Varzideh, S. S. Jankauskas, A. Cioppa, P. Mone, L. Salemme, U. Kansakar, T. Tesorio, V. Trimarco. L-Arginine in diabetes: clinical and preclinical evidence. *Cardiovascular Diabetology* 22 1 (2023). doi:10.1186/s12933-023-01827-2.
- [8] P. Wu, Y. Wang, Y. Ye, X. Yang, Y. Huang, Y. Ye, Y. Lai, J. Ouyang, L. Wu, J. Xu. Liver biomarkers, lipid metabolites, and risk of gestational diabetes mellitus in a prospective study among Chinese pregnant women. *BMC Medicine* 21 1 (2023). doi:10.1186/s12916-023-02818-6.

- [9] M. H. Almomani, S. AL-Tawalbeh. Glycemic Control and Its Relationship with Diabetes Self-Care Behaviors Among Patients with Type 2 Diabetes in Northern Jordan: A Cross-Sectional Study. *Patient Preference and Adherence* 16 (2022) 449–465. doi:10.2147/ppa.s343214.
- [10] B. Alsunaidi, M. Althobaiti, M. Tamal, W. Albaker, I. Al-Naib. A Review of Non-Invasive Optical Systems for Continuous Blood Glucose Monitoring. *Sensors* 21 20 (2021) 6820. doi:10.3390/s21206820.
- [11] R. E. Sanya, E. S. Johnston, P. Kibe, M. Werfalli, S. Mahone, N. S. Levitt, K. Klipstein-Grobusch, G. Asiki. Effectiveness of self-financing patient-led support groups in the management of hypertension and diabetes in low- and middle-income countries: systematic review. *Tropical Medicine & International Health* (2022). doi:10.1111/tmi.13842.
- [12] K. Fikrig, S. Peck, P. Deckerman, S. Dang, K. St Fleur, H. Goldsmith, S. Qu, H. Rosenthal, L. C. Harrington. Sugar feeding patterns of New York *Aedes albopictus* mosquitoes are affected by saturation deficit, flowers, and host seeking. *PLOS Neglected Tropical Diseases* 14 10 (2020) e0008244. doi:10.1371/journal.pntd.0008244.
- [13] I. Fradianto, A. Andriyanto, E. V. Yuniarti, V. E. Prameswari. Differences in Glucose Control of Diabetic Patients with Family Care Support Interventions. *Malaysian Journal of Nursing* 14 03 (2023) 110–115. doi:10.31674/mjn.2023.v14i03.013.
- [14] X.-H. Feng, S.-J. Shen, G.-J. Jin. Effect of narrative nursing model on self-management ability and quality of life of patients with advanced pancreatitis and diabetes. *World Chinese Journal of Digestology* 29 22 (2021) 1316–1322. doi:10.11569/wcjd.v29.i22.1316.
- [15] Ye. Hnatchuk, T. Hovorushchenko, O. Pavlova. Methodology for the Development and Application of Clinical Decisions Support Information Technologies with Consideration of Civil-Legal Grounds. *Radioelectronic and Computer Systems* 1 (2023) 33–44. doi: 10.32620/reks.2023.1.03.
- [16] T. Hovorushchenko, A. Herts, Ye. Hnatchuk. Concept of Intelligent Decision Support System in the Legal Regulation of the Surrogate Motherhood. *CEUR-WS* 2488 (2019) 57–68.
- [17] T. Hovorushchenko, Ye. Hnatchuk, A. Herts, O. Onyshko. Intelligent Information Technology for Supporting the Medical Decision-Making Considering the Legal Basis. *CEUR-WS* 2853 (2021) 72–82.
- [18] T. Hovorushchenko, O. Pomorova. Methodology of Evaluating the Sufficiency of Information on Quality in the Software Requirements Specifications, in: *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DeSSERT-2018*, Kyiv, 2018, pp. 385–389. doi: 10.1109/DESSERT.2018.8409161.
- [19] T. Hovorushchenko, A. Moskalenko, V. Osyadlyi. Methods of Medical Data Management Based on Blockchain Technologies. *Journal of Reliable Intelligent Environments* (2022). doi: 10.1007/s40860-022-00178-1.
- [20] T. Vyas, S. Choudhary, N. Kumar, A. Joshi. Point-of-Care Biosensors for Glucose Sensing. *Nanobiosensors for point-of-care medical diagnostics* (2022) 107–136. doi:10.1007/978-981-19-5141-1_5.
- [21] H. Zafar, A. Channa, V. Jeoti, G. M. Stojanović. Comprehensive Review on Wearable Sweat-Glucose Sensors for Continuous Glucose Monitoring. *Sensors* 22.2 (2022) 638. doi:10.3390/s22020638.
- [22] Q. Chen, Y. Zhao, Y. Liu. Current development in wearable glucose meters. *Chinese Chemical Letters* (2021). doi:10.1016/j.ccl.2021.05.043.
- [23] A. A. Mathew, S. Vivekanandan. A Review of Existing Non-invasive Techniques for Glucose Monitoring. *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control* (2021) 2409–2420. doi:10.1007/978-981-15-8221-9_225.
- [24] S. Paul, S. Jain, B. Majhi, K. Pegu, V. Majhi. A Non-Invasive IoT-Based Glucose Level Monitoring System. *Current Signal Transduction Therapy* 17 (2022). doi:10.2174/1574362417666220524085231.
- [25] J. Al-Nabulsi, H. Abu Owida, J. Ma'touq, S. Matar, E. Al-Aazeh, A. Al-Maaiouf, A. Bleibel. Non-invasive sensing techniques for glucose detection: a review. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 11 4 (2022) 1926–1937. doi:10.11591/eei.v11i4.3584.
- [26] T. Sarsembayeva, N. Zholdas, M. Mansurova, M. Sarsembayev, A. Urykkaliyev. Study of Non-Invasive Methods of Measuring Glucose for Patients with Diabetes Mellitus, in: *Proceedings of 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies SIST-2022*, Nur-Sultan, 2022. doi:10.1109/sist54437.2022.9945820.

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**МОБІЛЬНА КІБЕРФІЗИЧНА
СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ
ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ**

Студент Максим Питляк

Керівник д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

- ▶ **Мета кваліфікаційної роботи** – моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, яка забезпечує пацієнтам можливість правильно регулювати своє захворювання та запобігати його ускладненням
- ▶ **Об'єкт дослідження** – процес моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом
- ▶ **Предмет дослідження** – метод та кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- ▶ **вперше розроблено метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом**, який відрізняється від відомих своєю орієнтованістю на реалізацію у вигляді мобільної кіберфізичної системи та забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним; формування множини щоденних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу, формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць та формування множини показників середньомісячного рівня цукру в крові пацієнта за рік з метою демонстрації динаміки змін рівня цукру пацієнту та його лікарю
- ▶ **вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові**, яка відрізняється від відомих нижчою ціною, зручністю та простотою у використанні та носінні, компактним розміром та забезпечує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо

ПРАКТИЧНА ЗНАЧУЩІСТЬ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- ▶ полягає у реалізації інвазивної мобільної системи постійного моніторингу рівня глюкози крові, яка допомагає пацієнтам із цукровим діабетом стежити за рівнем цукру в крові, вчасно вживати необхідні медичні препарати при виникненні гіпо- чи гіперглікемічного стану, а також отримувати невідкладну допомогу в разі загрози настання гіпо- чи гіперглікемічної коми. Пропонована система забезпечує накопичення і відображення динаміки змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, яка може бути корисною як для самодіагностики пацієнтом, так і для дослідження лікарем, щоб уникати станів гіпо-, або гіперглікемії в майбутньому

- ▶ T. Hovorushchenko, M. Pytlyak, O. Hovorushchenko, I. Paionk, V. Osyadlyi, A. Boyarchuk. Mobile cyber-physical system for diabetic patients' health status monitoring. CEUR-WS. 2023. Vol. 3609. Pp. 27-36. **СТАТТЯ, ІНДЕКСОВАНА У НАУКОМЕТРИЧНІЙ БАЗІ SCOPUS**

ПУБЛІКАЦІЇ

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- ▶ Цукровий діабет – це хвороба ендокринної системи, яка характеризується недостатністю інсуліну або зниженням чутливості до нього через порушення роботи підшлункової залози. Це хронічне захворювання призводить до порушення всіх видів обміну речовин, підвищення рівня глюкози у крові і може спричинити ураження нервової системи, судин, органів та інших систем, а також виникнення інших захворювань (наприклад, інфаркт, інсульт, ниркова або печінкова недостатність, втрата зору, ангіопатія тощо). Цукровий діабет входить до числа лідерів серед причин смертності та інвалідності.
- ▶ За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, кількість людей, хворих на цукровий діабет, становила більше 537 мільйонів осіб у 2021 році, що складає 10% від світового населення. Прогнозується, що ця кількість зросте до 643 мільйонів до 2030 року і до 783 мільйонів до 2045 року. Занепокіливою тенденцією є збільшення поширення діабету серед молодших людей. Якщо 20 років тому цукровий діабет переважно діагностувався у осіб старше 25 років, то зараз 15% хворих – це підлітки та діти до 20 років.

- ▶ Нормальний рівень глюкози в крові здорової людини зазвичай коливається від 4,0 до 6,0 ммоль/л. Якщо рівень глюкози опуститься нижче 2 ммоль/л, це може призвести до гіпоглікемічної коми. У той же час, якщо рівень глюкози перевищить 16,5 ммоль/л, існує ризик гіперглікемічної коми. Рівень глюкози між 2 і 4 ммоль/л вказує на наявність гіпоглікемії, а діапазон від 6 до 16,5 ммоль/л вказує на гіперглікемію.
- ▶ Люди, які страждають на цукровий діабет, повинні постійно стежити за своїм здоров'ям, зокрема, ретельно контролювати рівень глюкози в крові, оскільки як її різке підвищення, так і різке падіння можуть бути смертельно небезпечними, викликаючи гіпер- або гіпоглікемічну кому.
- ▶ Тому мобільна система безперервного моніторингу рівня глюкози у крові (глюкозний монітор) стає ключовим інструментом для осіб із діабетом, надаючи можливість контролювати рівень глюкози і приймати необхідні заходи для його нормалізації. З урахуванням високого рівня досліджень, точності та доступності інформації про рівень глюкози, а також доступності і недорогого підшкірного датчика, розроблятимемо інвазивну мобільну систему безперервного моніторингу рівня глюкози в крові

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для розроблення кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом слід розв'язати наступні задачі:

- ▶ аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- ▶ моделювання кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- ▶ розроблення методу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- ▶ розроблення архітектури мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- ▶ проведення експериментів із використанням розробленої мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом.

МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

Узагальнена структура кіберфізичної системи:



Датчики інвазивних систем моніторингу рівня глюкози:



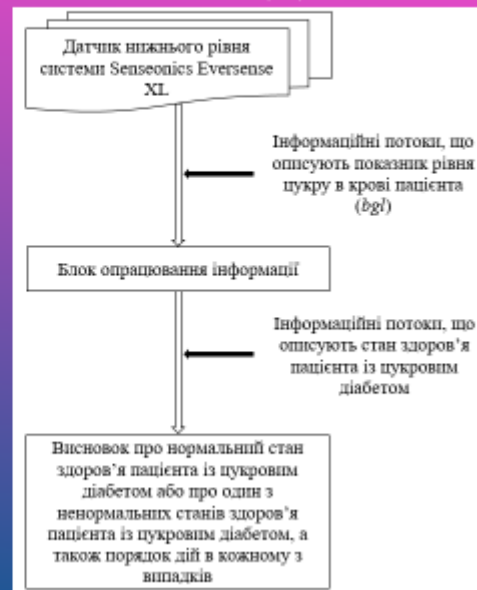
Правила для аналізу показника рівня цукру в крові пацієнта bgl , отримані з підшкірного датчика:

- ▶ якщо $bgl \geq 4$ ммоль/л та $bgl \leq 6$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається;
- ▶ якщо $bgl < 4$ ммоль/л та $bgl \geq 2$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – нижче норми, і пацієнту видається повідомлення: «Гіпоглікемія»;
- ▶ якщо $bgl > 6$ ммоль/л та $bgl \leq 16,5$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – вище норми, і пацієнту видається повідомлення: «Гіперглікемія»;
- ▶ якщо $bgl < 2$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – критично низький, і повідомлення «Загроза гіпоглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним (у повідомлення додається також геолокація пацієнта та його ім'я і прізвище);
- ▶ якщо $bgl > 16,5$ ммоль/л, то рівень цукру в крові пацієнта – критично високий, і повідомлення «Загроза гіперглікемічної коми» видається пацієнту, а також надсилається його рідним (у повідомлення додається також геолокація пацієнта та його ім'я і прізвище).

Концептуальна модель мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом



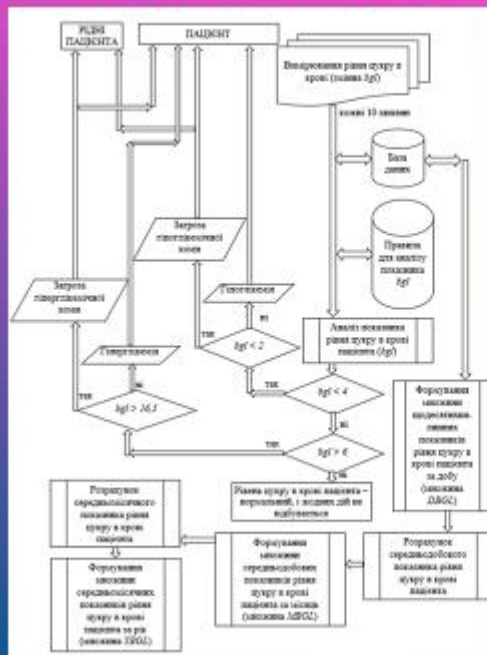
Інформаційна модель мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

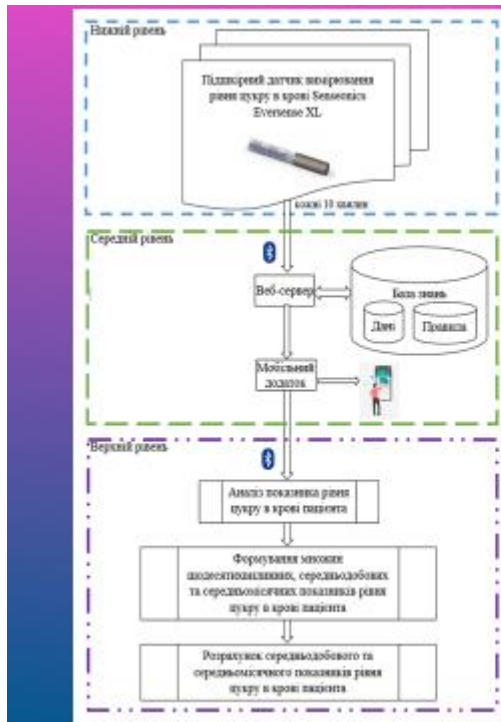


МЕТОД МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ:

- ▶ вимірювання рівня цукру в крові пацієнта (змінна bgl) кожні 10 хвилин;
- ▶ аналіз показника рівня цукру в крові пацієнта (змінної bgl) згідно із розробленими правилами для аналізу показника bgl ;
- ▶ формування множини щодесятихвилинних показників рівня цукру в крові пацієнта за добу (множина DBGL): $DBGL = \{bgl_1, bgl_2, bgl_3, \dots, bgl_{144}\}$;
- ▶ розрахунок середньодобового (144 10-хвилинних інтервали) показника рівня цукру в крові пацієнта: $adbgl = (\sum_{i=1}^{144} bgl_i)/144$;
- ▶ формування множини середньодобових показників рівня цукру в крові пацієнта за місяць (множина MBGL): $MBGL = \{adbgl_1, asbgl_2, \dots, adbgl_m\}$;
- ▶ розрахунок середньомісячного показника рівня цукру в крові пацієнта: $ambgl = (\sum_{j=1}^m adbgl_j)/m$;
- ▶ формування множини середньомісячних показників рівня цукру в крові пацієнта за рік (множина YBGL): $YBGL = \{ambgl_1, ambgl_2, \dots, ambgl_{12}\}$

Схема методу моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом





МОБІЛЬНА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

ПРИКЛАД ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ІЗ ЦУКРОВИМ ДІАБЕТОМ

► Результати функціонування інвазивної мобільної кіберфізичної системи безперервного моніторингу рівня глюкози у крові на 20 вимірюваннях:

Показник	Значення показника	Дії мобільної системи	Показник	Значення показника	Дії мобільної системи
bg^i_t	5,8	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається	bg^{i+100}	11,1	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+10}	5,75	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається	bg^{i+110}	14	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+20}	5,9	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається	bg^{i+120}	15,8	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+30}	6,3	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається	bg^{i+130}	17,9	Пацієнту та його рідним було надіслано повідомлення: Загроза гіперглікемічної коми (у повідомлення рідним було додано також геолокацію пацієнта та його ім'я та прізвище)
bg^{i+40}	6,7	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається	bg^{i+140}	16,5	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+50}	7	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія	bg^{i+150}	13,4	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+60}	7,2	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія	bg^{i+160}	10,8	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+70}	8	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія	bg^{i+170}	8,7	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+80}	8,9	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія	bg^{i+180}	7,75	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія
bg^{i+90}	9,7	Пацієнту було надано повідомлення: Гіперглікемія	bg^{i+200}	6,5	Рівень цукру в крові пацієнта – нормальний, і жодних дій не відбувається

Графік щодесятихвилинних показників за добу



Графік середньомісячних показників за період з серпня 2023 року по січень 2024 року



Графік середньодобових показників за серпень 2023 року



ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень забезпечено моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом:

- ▶ у першому розділі проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, проаналізовано інвазивні та неінвазивні методи та заоби моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також кіберфізичні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;
- ▶ у другому розділі виконано вибір датчика для формування нижнього рівня та вибір контролера для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також вибір протоколу передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів кіберфізичної системи. Крім цього, проведено моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом;

- ▶ у третьому розділі розроблені метод та алгоритм моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, які забезпечують: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним;
- ▶ у четвертому розділі вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка є дешевшою за відомі аналоги, зручною та простою у використанні та носінні, має компактний розмір; виконує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.



Ім'я користувача:
Кафедра КІ

ID перевірки:
1016199428

Дата перевірки:
18.04.2024 22:46:01 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
18.04.2024 22:48:34 EEST

ID користувача:
100005591

Назва документа: Питляк_Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим ...

Кількість сторінок: 99 Кількість слів: 19641 Кількість символів: 148677 Розмір файлу: 2.65 MB ID файлу: 10159662

3.23% Схожість

Найбільша схожість: 1.59% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1014640776)

2.03% Джерела з Інтернету 63 Сторінка 101

2.62% Джерела з Бібліотеки 50 Сторінка 102

0.51% Цитат

Цитати 4 Сторінка 103

Посилання 1 Сторінка 103

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 125378 Назва: МКР Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом Додано в БД: 2024-04-18 Автора: Пигляк М.С. Керівники: Говорушенко Т.О. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	134765	644	5165 (4%)	61 (9%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Питляк Максим Сергійович

Тема: Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг дипломної роботи:

Кількість сторінок записки 116 с.

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є моніторинг стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, надійний постійний, швидкий та автоматичний контроль за рівнем глюкози у крові, шляхом створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, яка забезпечує пацієнтам можливість правильно регулювати своє захворювання та запобігати його ускладненням.
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 першому розділі проведений аналіз відомих методів та рішень для моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, зокрема, проаналізовано інвазивні та неінвазивні методи та заоби моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також кіберфізичні системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. У другому розділі виконано вибір датчика для формування нижнього рівня та вибір контролера для формування середнього рівня мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, а також вибір протоколу передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів кіберфізичної системи. Крім цього, проведено моделювання мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. Зокрема, на основі референтних значень рівня глюкози сформовані правила для аналізу показника рівня цукру в крові пацієнта, а також розроблені концептуальна та інформаційна моделі мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом. У третьому

розділі розроблений метод моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом, який забезпечує: вимірювання рівня цукру в крові пацієнта, аналіз показника рівня цукру, видачу повідомлення пацієнту про настання гіпо- чи гіперглікемічного стану, про загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми, а також відправлення повідомлень про існуючу загрозу гіпо- чи гіперглікемічної коми в пацієнта його рідним. За потреби інформація про рівень глюкози у крові, який характеризує гіперглікемічний стан чи попереджає про загрозу гіперглікемічної коми, може бути передана на інсулінову помпу, яка, враховуючи стан пацієнта, розрахує необхідну дозу інсуліну та виконає ін'єкцію інсуліну. У четвертому розділі вперше розроблено архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом як інвазивну систему безперервного моніторингу рівня глюкози у крові, яка є дешевшою за відомі аналоги, зручною та простою у використанні та носінні, має компактний розмір; виконує постійний моніторинг рівня глюкози в крові пацієнта із цукровим діабетом; аналізуючи результати такого моніторингу, оперативно повідомляє пацієнта та його рідних про надмірно високий або надмірно низький рівень глюкози, а також накопичує і відображає (у вигляді цифр та діаграм) динаміку змін рівня цукру в крові пацієнта протягом доби, місяця, року, тощо.

4. Позитивні сторони роботи: отримання двох пунктів наукової новизни.

5. Негативні сторони роботи:

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.

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Бауман О.В.,

д. т. н., проф., зав. кафедри комп'ютерних наук

«22» 04 2024 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС
д-р.техн.наук, проф. Говорущенко Т. О.

Питляка Максима Сергійовича

ІІІ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

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

17 квітня 2024 року

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Мобільна кіберфізична система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із цукровим діабетом

Автор: Питляк Максим Сергійович

Спеціальність: 123 – Компютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Говорущенко Тетяна Олександрівна, д.т.н, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	


Підтвердження:

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

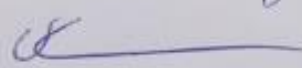
- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) найбільшу схожість встановлено з одним документом і становить вона 1.59% в частині загальноприйнятої термінології;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 3.23% і адресується до 113 першоджерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.


Керівник роботи


Т. О. Говорущенко

Гарант ОНП


О. С. Савенко

Завідувач кафедри КІС


Т. О. Говорущенко