

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОЦІНЮВАННІ, ДІАГНОСТИЦІ ТА ПРОГНОЗУВАННІ СТАНІВ ЛЮДИНИ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

О. П. Мінцер, В. О. Романов¹, І. Б. Галелюка¹,
Л. Ю. Бабінцева, С. І. Мохначов, О. О. Суханова

Національний університет охорони здоров'я імені П. Л. Шупика

¹Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України

Проаналізовано тенденції розвитку носимих інноваційних засобів для діагностики та догляду за пацієнтами у випадках надзвичайних ситуацій, а також у клінічних умовах у відділах невідкладної медичної допомоги, моніторингу станів тощо. Особливу увагу приділено використанню логіки сталих станів пацієнтів при обґрунтуванні корекційних дій. Окремо розглянуто технології дистанційного моніторингу. Наведено конкретні принципи застосування дронів. Дослідження спрямовано на узагальнення досвіду оцінювання та моніторингу стану пацієнтів. Визначення, оцінювання та управління персональним здоров'ям слід розцінювати сьогодні як найважливіші соціальні проблеми, що потребують невідкладного рішення. Авторами запропоновано нову концепцію визначення й оцінювання індивідуального та популяційного здоров'я, в основу якого покладено стаціонарність, а також дисперсійні характеристики критеріїв стану організму при неекстремальних впливах навколишнього середовища. Оціночний алгоритм дозволяє: використовувати різномірну інформацію про діапазони можливого варіювання значень вагових коефіцієнтів; використовувати нечислову інформацію про порівняльну вагомість окремих показників. Виявлено, що існуючі системи моніторингу, на жаль, не здійснюють визначення трендів показників, що не дає можливості забезпечити ефективне управління загальним станом організму. Тому важливо створити аналітичну методику динамічної ідентифікації станів організму людини, засновану на концепції тимчасової сталості, що дозволить ідентифікувати та кількісно оцінити мережеві взаємодії між різними фізіологічними системами в завданнях моніторингу.

Орієнтовна мінімальна кількість ознак/показників організму людини для оцінювання його стану в завданнях мобільної медицини визначається ступенем відхилення функціонального стану організму в конкретний час дослідження від базового стану. При сталому стані організму та незначному відхиленні достатньо декількох показників (зазвичай не більше 2-3). Для своєчасного виявлення відхилень від «норми» необхідно забезпечити постійний моніторинг показників функціонального стану організму людини.

Ключові слова: комп'ютерна інженерія, інформаційні технології, стан пацієнта, моніторинг стану пацієнта, наносенсорні технології, масова експрес-діагностика.

**COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE
ASSESSMENT, DIAGNOSIS AND PREDICTION OF HUMAN CONDITIONS.
ANALYTICAL REVIEW**

**O. P. Mintser, V. O. Romanov¹, I. B. Galelyuka¹,
L. Yu. Babintseva, S. I. Mokhnachov, O. O. Sukhanova**

Shupyk National Healthcare University of Ukraine

¹*V. M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine*

Background. The trends in the development of wearable innovative devices for diagnostics and patient care in emergency situations, as well as in clinical conditions in emergency departments, monitoring conditions, etc. are analyzed. Special attention is paid to the use of the logic of stable patient conditions when justifying corrective actions. Remote monitoring technologies are considered separately. Specific principles of drone application are given. The purpose of the study was to generalize the experience of assessing and monitoring patient conditions.

Materials and Methods. A theoretical analysis and generalization of information on the assessment and monitoring of patients' condition was carried out. The results of the study were systematized according to the databases of scientific periodicals: Web of Science, PubMed, Scopus, ScienceDirect, etc. Classical methods of searching and systematizing information were used at different stages of the study.

Results. The definition, assessment and management of personal health should be regarded today as the most important social problems that require an urgent solution; a new concept of the definition and assessment of individual and population health is proposed, which is based on the stationarity, as well as the dispersion characteristics of the criteria of the state of the organism under non-extreme environmental influences; the evaluation algorithm allows: to use heterogeneous information regarding the ranges of possible variation of the values of weight coefficients; to use non-numerical information regarding the comparative importance of individual indicators; unfortunately, existing monitoring systems do not determine the trends of indicators, which does not make it possible to ensure effective management of the general state of the organism; it is extremely important to create an analytical method for the dynamic identification of the states of the human body, based on the concept of temporal constancy, which will allow to identify and quantify network interactions between various physiological systems in monitoring tasks.

Conclusions. The approximate minimum number of signs/indicators of the human body for assessing its condition in mobile medicine tasks is determined by the degree of deviation of the functional state of the body at a specific time of the study from the baseline state. With a stable state of the body and a slight deviation, several indicators are sufficient (usually no more than 2-3). For timely detection of deviations from the "norm", it is necessary to ensure constant monitoring of indicators of the functional state of the human body.

Keywords: computer engineering, information technology, patient condition, patient condition monitoring, nanosensor technologies, mass rapid diagnostics.

Вступ. Констатація змін в організмі людини під час обстеження пацієнтів вимагає, по можливості, негайного прийняття рішення стосовно стратегії діагностики та лікування. Спектр змін починається з легких ступенів, часто легко компенсується і стабілізується під час обґрунтованого та спрямованого лікування. Обмеження, що мають при цьому враховуватися, обумовлені конкуруючими ризиками виникнення певних ускладнень, фінансовими витратами тощо. Саме вони створюють основу вибору порогів для прийняття рішень. Зниження порогів можуть наражати значну частину пацієнтів на непотрібний ризик марних процедур. Навпаки підвищення порогів може призвести до того, що терапія, яка потенційно може сприяти оздоровленню та продовженню життя, стане малодоступною з різних причин, у першу чергу фінансових. Отже, основне завдання динамічних спостережень складається з порівняння окремих показників (або групи показників) із деяким порогом таким чином, що коли спостерігається перевищення порогових значень, або такі значення показника, які виходять за межі компенсаторного потенціалу, слід повністю чи частково змінювати стратегію ведення пацієнта. Більш того, основна мета медичної допомоги, орієнтованої на пацієнта, полягає в тому, щоб узгодити допомогу з власними пріоритетами пацієнта і тим, що вони сприймають як значні переваги. Власне кажучи, це є базисом сучасної персоналізованої медицини, покладеної в основу так званої медицини «4П». На основі діалогу кількісні методи можуть допомогти з'ясувати, які конкретні результати, пов'язані з тяжкістю симптомів, функціональним статусом і складовими якості життя (фізичними, психологічними, соціальними тощо), є найбільш важливими з точки зору пацієнтів.

Розглядаючи взаємозв'язок понять «здоров'я» та «хвороба», важливо зазначити, що зв'язуючим ланцюгом цих протилежних станів являється адаптація. Здорова людина має бути максимально адаптованою до навколишнього середовища, і, навпаки, конкретним виразом морфо-функціональних змін при захворюванні буде дезадаптація. Відповідний (хоч й дискусійний) висновок полягає в тому, що адаптаційні резерви організму визначають міру індивідуального здоров'я. Отже, вирішивши завдання коректного оцінювання

адаптаційної функції організму, можна збудувати надійну процедуру донозологічної діагностики. Однак уявлення про способи та підходи до кількісного оцінювання рівня адаптації також носять дискусійний характер і мають суттєві відмінності. Тому важливою являється потреба в створенні нових аналітичних інструментах і теоретичних засадах для розгляду особливого класу динамічних мереж, що зустрічаються у фізіологічних системах.

Останніми роками прийшло розуміння, що однократні виміри значень характеристик не віддзеркалюють істинний стан організму. Відповідно, обов'язковим має стати оцінювання тенденцій змінення показників під час моніторингу. Зауважимо, що існує багато різних технологій, доступних для визначення динамічної функції з кількома різними методологіями, що використовуються. Ідеальна технологія має бути простою у виконанні; економічно ефективною; забезпечувати валідність результатів прогнозування; бути загальноновизнаною, дозволяючи широке застосування та порівняльний аудит. Серед найбільш важливих питань моніторингу залишається логіка ідентифікації станів організму. Загалом питання ідентифікації станів організму людини (як проблема визначення стану складних саморегульованих систем) надзвичайно складні. Вони містять безліч конструктів: поняття із достатнім ступенем експериментально та логічне підтверджених даних або теоретична побудова, що використовується для їх подання. Проте завжди залишаються основними питання сталості стану організму, прогнозування його характеристик і можливі впливи.

Досі визначення поняття «сталого стану» найчастіше зустрічається у фізіології та фармації. Ще в 1878 р. К. Бернар висунув постулат про те, що всі життєві процеси мають лише одну мету – підтримання сталості умов життя у внутрішньому середовищі. У 1929 р. У. Кенон започаткував термін «гомеостаз» (із грецької мови *homois* – подібний, *stasis* – стан, нерухомість). Застосовується й ширше поняття сталого стану як стабілізації під час роботи, викликаних нею функціональних і біохімічних зрушень, що відбувається на тлі вищої, ніж у стані спокою, інтенсивності обміну речовин [1]. Показано, якщо система має більше одного сталого стану, то вона може зазнати різних змін функціонування. Ймовірність, частота,

тривалість і динаміка цих коливань залежатимуть від відносної сталості сталих станів.

Дивно, що теорія сталості мало використовується у фізіологічних дослідженнях. Значно більше застосовуються принципи стохастичних коливань, що викликають зрушення між співіснуючими альтернативними сталими станами. Підкреслимо, що переходи в екосистемах давно досліджуються за допомогою теорії альтернативних стабільних станів (АСС). Хоча порогові реакції є показником того, що система може мати більше ніж один стабільний

стан, інші критерії також можуть відповідати принципу існування АСС. Альтернативні стабільні стани для системи існують лише, якщо ця система може переходити в альтернативні стани за тих самих зовнішніх умов [2]. Корисним способом візуалізації сталих станів у стохастичних системах є діаграма «ball-in-cup» (рис. 1), на якій стан системи представлений як положення кулі, що пересувається на поверхні, а деяке коливання може пересунути кулю від одного сталого стану до іншого [3, 4].

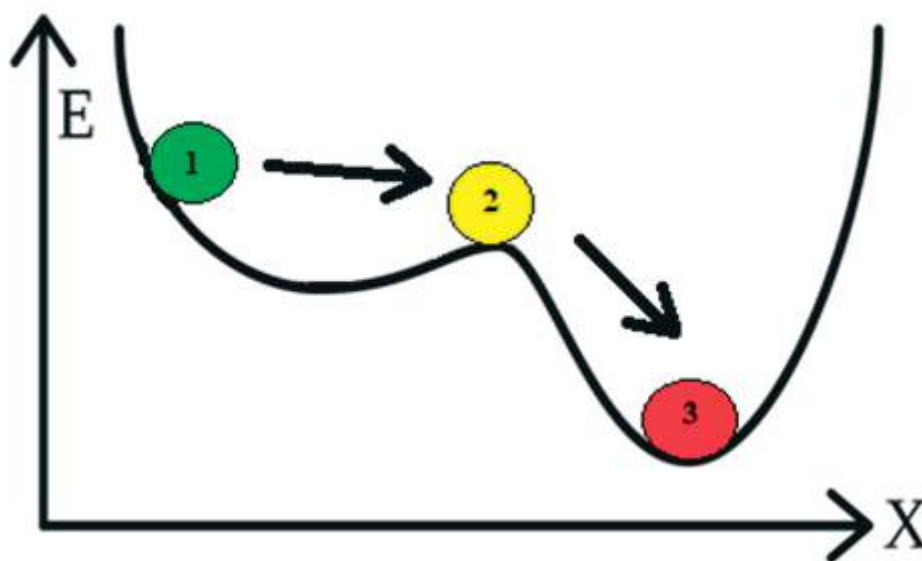


Рис. 1. Ілюстрація до теорії сталих станів. Модель «ball-in-cup»

Куля, що представляє досліджувану фізіологічну систему існує на поверхні, де будь-яка точка вздовж поверхні являє можливий стан. У простій моделі загальний план складається з двох западин (що нами для біологічних систем інтерпретовано як «сталі стани»), розділених пагорбом. Коли куля знаходиться в западині, вона існує в сталому стані, треба докласти зусиль, щоб вийти з нього.

За відсутності коливань куля завжди буде котитися вниз схилом і тому прагнути залишатися у западині (або сталому стані). Зміни стану можна розглядати з двох різних сторін: дослідника та фізіологічної системи. Але, незалежно від сторони, куля може переміщатися між стабільними станами тільки двома способами: завдяки власному переміщенню кулі чи внаслідок дії певної сили.

Дуже важливим у процедурах моніторингу являється поняття стійкості системи. Наявність «западин» у траєкторії руху демонструє стійкість. За аналогією, фізіологічні системи стійкі до змін стану – зазнають змін лише при значних коливаннях, але деякі стани більш стійкі, ніж інші. У зазначеній моделі западина з крутими схилами має більшу (ніж неглибока) пружність, оскільки потрібно більше зусиль, щоб проштовхнути м'яч угору схилом і виштовхнути його із западини.

Ці теоретичні міркування знаходять відображення в практичній охороні здоров'я. У підвищенні ефективності пацієнт-орієнтованого підходу до визначення стану організму людини (персоналізація допомоги) основною проблемою являється розроблення стратегії

цільового використання окремих показників у системних питаннях діагностики стану організму людини. Вирішальним моментом у цій стратегії є встановлення сталих станів функціонування організму та можливих траєкторій переходів між ними. Якщо показник (ознака, критерій) свідчить про можливість переходу до сталого стану, стає потрібним користування показниками ймовірності прогнозованих станів як універсальним методом для визначення інформативності ознак при мобільному спостереженні за станом організму людини. В дослідженні [5] розроблено нову модель біологічних організмів, що розглядає організм як самоузгоджену систему, що піддається потоку патогенів. Принципова новизна моделі полягає в тому, що вона описує не окремі частини, а біологічний організм у цілому. Організм моделюється п'ятивимірною динамічною системою. Гомеостаз організму описується рівняннями еволюції для п'яти взаємодіючих компонентів: здорових клітин, хворих клітин, клітин вродженого імунітету, клітин специфічного імунітету та патогенів. Аналіз стабільності демонструє, що в широкій області простору параметрів система демонструє надійну структурну стійкість. Завжди існують чотири стійких стаціонарних рішення, що характеризують чотири якісно відмінні стани організму: живий стан, граничний стан, критичний стан і мертвий стан.

Тобто, якщо система має більше одного сталого стану, то вона може зазнати різких змін функціонування. Ймовірність, частота, тривалість і динаміка цих коливань залежатимуть від відносної сталості сталих станів. Теорія сталості мало використовується у фізіологічних дослідженнях. Значно більше застосовуються принципи стохастичних коливань, що викликають зрушення між співіснуючими альтернативними сталими станами.

Мета дослідження: узагальнення досвіду оцінювання та моніторингу стану пацієнтів.

Матеріал і методи дослідження. Проведено теоретичний аналіз і узагальнення інформації про оцінювання та моніторинг стану пацієнтів. Результати дослідження систематизовано за базами даних наукової періодики: Web of Science, PubMed, Scopus, ScienceDirect тощо. На різних етапах дослідження застосовувалися класичні методи пошуку та систематизації інформації.

Результати та їх обговорення. Кількість показників, що мають вимірюватися для оцінювання станів організму, буде безперервно збільшуватися. Безумовно будуть удосконалюватись методи валідації цих показників. Проте, поки що отримання даних під час тривалого моніторингу потребує детальної та ретельної попередньої роботи, як подано на рис. 2.

Широке впровадження представленого алгоритму дало можливість отримати суттєві результати в напряму використання комп'ютерної інженерії у процесах сучасної діагностики станів людини. Засоби комп'ютерної інженерії, мікроелектроніки та інформатики являються основою для втілення в охорону здоров'я нового покоління або медицини 4П. Зразки таких засобів уже існують на світовому ринку, а сучасна елементна база дозволяє сьогодні освоїти їх у серійному виробництві та промислового використанні безпосередньо у нашій країні. Розглянемо приклади засобів як для діагностики, так і догляду за пацієнтами в завданнях невідкладної медицини та клінічних умовах.

Носимий медичний монітор для виміру частоти серцевих скорочень і сатурації. Основна проблема при розробленні нових носимих медичних моніторів частоти серцевих скорочень (ЧСС) та рівня кисню у крові або сатурації (SaO_2) полягає в забезпеченні високоякісних валідних вимірювань при мінімально можливому споживанні енергії. Нова структурна схема, що дає можливість знизити енергоспоживання під час вимірювання медичних параметрів на клінічному рівні, розглянуто у публікації [7]. Параметри ЧСС та SaO_2 є результатом реєстрації змін, що виникають при наповненні дрібних судин кров'ю залежно від фази кардіоциклу. Ці параметри вимірюють на основі визначення оптичної щільності тканини (рис. 3). Сигнали ЧСС та SaO_2 формуються при опроміненні шкіри світлодіодом і вимірюванні за допомогою фотодіода інтенсивності відбитого від кровонесних судин світлового потоку (рис. 4). Фотодіод генерує струм, пропорційний інтенсивності відбитого світлового потоку.

Електричний сигнал з виходу фотодіода попередньо обробляють аналоговим інтерфейсом, а потім кодують за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), після чого остаточно

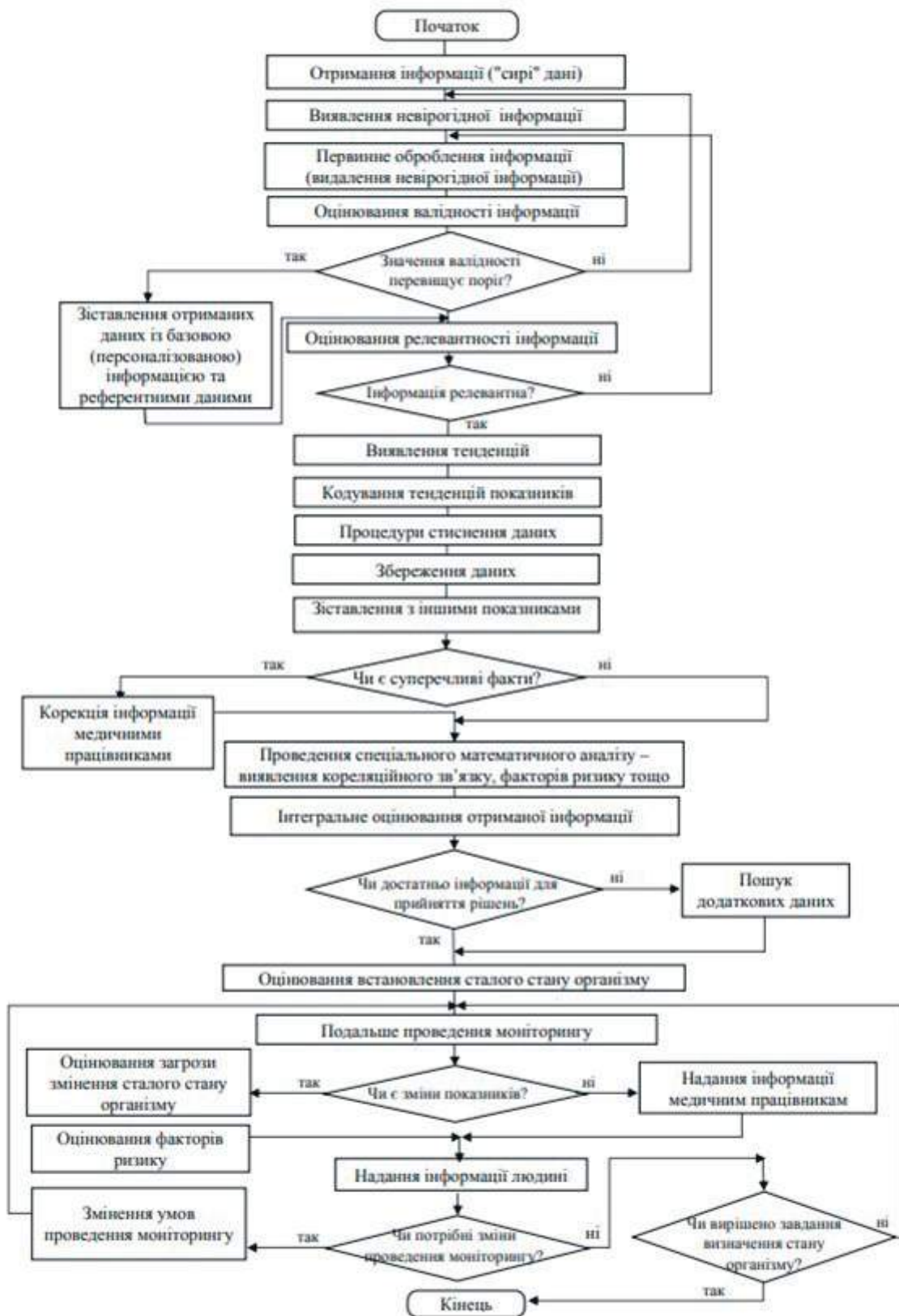


Рис. 2. Алгоритм обробки інформації під час моніторингу за [6]



Рис. 3. Носимий монітор для вимірювання частоти серцевих скорочень і сатурації



Рис. 4. Принцип вимірювання частоти серцевих скорочень і сатурації



Рис. 5. Вимірювання частоти серцевих скорочень та сатурації у клінічних умовах

обробляють у мікроконтролері. Для цих вимірювань, як правило, достатньо однієї пари світлодіод-фотодіод, причому таку структурну схему широко використовують у промисловому клінічному обладнанні (рис. 5).

Однак клінічні пристрої працюють в умовах, що відрізняються від тих, із якими доводиться стикатися при використанні носимих медичних моніторів у повсякденному житті. По-перше, пацієнт в умовах клінічної діагностики практично нерухомий, а вимір проводиться за допомогою сенсора, надійно закріпленого на пальці. Умови освітлення при постійні, що спрощує реєстрацію фотодіодом відбитого світлового потоку, а енергоспоживання у такому випадку практично не є визначальним чинником. У той же час, носимий медичний монітор розташовують зазвичай на зап'ясті користувача, а це означає, що контакт зі шкірою змінюється під час руху користувача. Інтенсивність опромінення теж змінюється в залежності від розташування, руху користувача та часу доби. Оскільки монітори живляться від автономної батареї, то важливо, щоб енергоспоживання сенсором було по можливості мінімальним. Все це ще більше ускладнюється через можливі різні кольори шкіри користувачів. Темніша шкіра має нижчий індекс перфузії порівняно з більш світлою шкірою (індекс перфузії – це характеристика, що залежить від

інтенсивності кровотоку, від заповнення судин кров'ю та від кількості працюючих капілярів). Це означає, що для проведення вимірювань потрібна різна потужність опромінення в залежності від кольору шкіри користувача, а отже, і різна потужність споживання монітора в кожному з цих випадків вимірювання параметрів ЧСС та сатурації. Розглянемо переваги різних структур інтерфейсу для такого монітору.

Аналоговий інтерфейс із одноканальним АЦП. Збільшення струму через світлодіод або використання двох світлодіодів – це один із способів досягти вищого ступеня освітлення шкіри (рис. 6), оскільки він дає можливість збільшити площу опромінюваної світлодіодом поверхні шкіри. Однак це енергоємний підхід, оскільки струм через світлодіод становить не менше 50 % від потужності, що споживає пристрій у цілому, й яка, залежно від індексу перфузії шкіри користувача, може становити в середньому до 1 мВт. Загалом такий підхід неефективний і суттєво зменшує термін служби батареї.

Аналоговий інтерфейс із двоканальним АЦП. Гарніший спосіб покращити вимірювання інтенсивності опромінення поверхні шкіри полягає у застосуванні одного світлодіода та двох фотодіодів, що забезпечують ліпше вимірювання інтенсивності відбитого світлового потоку (рис. 7).

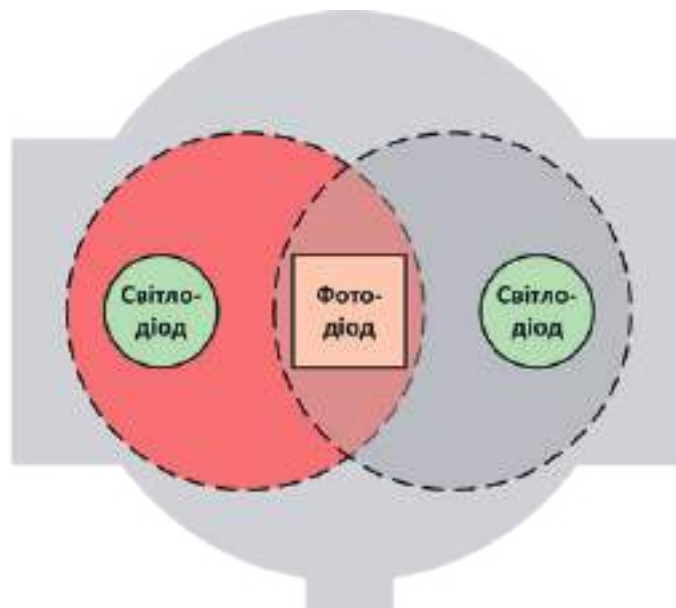


Рис. 6. Використання двох світлодіодів для зчитування сигналів ЧСС і сатурації

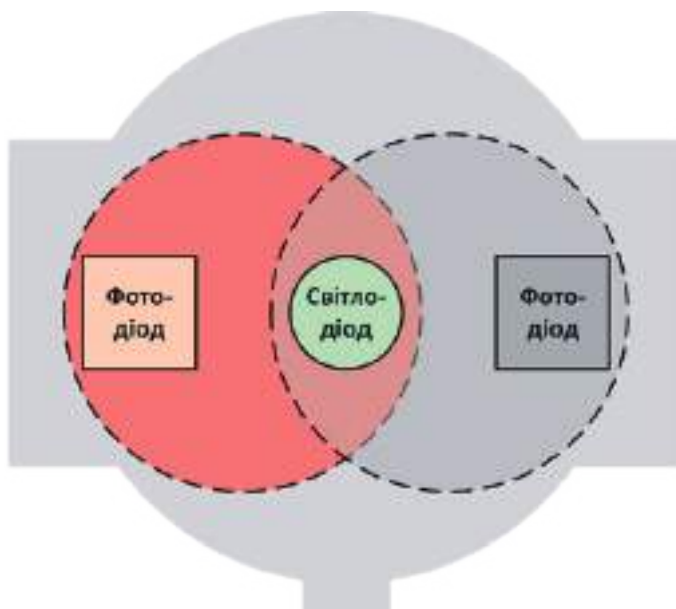


Рис. 7. Використання двох фотодіодів для зчитування сигналів ЧСС і сатурації

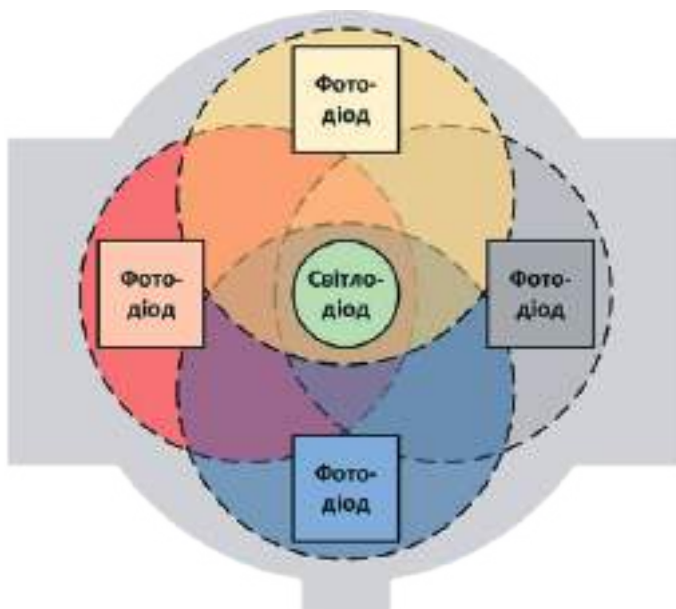


Рис. 8. Використання чотирьох фотодіодів для зчитування сигналів ЧСС і сатурації

Перевагою такого рішення є те, що струм через світлодіод, що дорівнює 20 мА, може бути зменшено до 10 мА. При цьому пропорційний інтенсивності відбитого світлового потоку сумарний струм із виходів фотодіодів не знижується. У складних умовах експлуатації носимого медичного монітору (наприклад, при зниженні перфузії шкіри внаслідок руху користувача), вбудований у мікроконтролер спеціальний алгоритм управління збільшує струм

через світлодіод, що еквівалентно збільшенню чутливості монітора.

Аналоговий інтерфейс із чотириканальним АЦП. Економічно вигіднішим рішенням являється використання чотирьох фотодіодів для реєстрації відбитого світлового потоку (рис. 8), оскільки опромінюючий світлодіод у цьому випадку споживає ще менше енергії (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльний рівень споживання одно-, дво- та чотириканальної схеми зчитування сигналів ЧСС і сатурації при нарузі живлення монітора 1.6 В

Число фотодіодів і каналів АЦП	Число світлодіодів	Струм через світлодіод, мА	Споживна потужність світлодіода, мВт	Споживна потужність аналогового інтерфейсу, мВт	Сумарна споживна потужність мВт
1	1	20	320	30	350
2	1	10	160	40	200
4	1	5	80	60	140

Чотириканальна структурна схема монітора забезпечує більш якісні та валідні покази, оскільки кровоносні судини та кісткова тканина розташовані в зап'ясті асиметрично, а чотири фотодіоди дозволяють адаптувати процес зчитування інтенсивності відбитого світлового потоку до руху користувача. Чотириканальна схема обробки фотострумів також збільшує валідність реєстрації відбитого від кровоносних судин світлового потоку.

Графіки відображають ЧСС, виміряну з використанням чотирьох фотодіодів, що налаштовано як дві незалежні пари LEDC1 і LEDC2 (рис. 9). Монітор повинен забезпечити надійний контакт зі шкірою під час зчитування фотострумів. Спочатку користувач перебуває у стані спокою, потім через 5 хвилин (на графіках це 300 секунд) він починає рухатися чи тренуватися, у результаті його ЧСС збільшується. Графіки сигналів LEDC1 та LEDC2 по-різному відхиляються від графіка опорного вимірювання, тому перевага використання двох пар фотодіодів полягає у взаємній компенсації похибок кожної пари.

Практичне рішення для ІМС носимого медичного монітора з чотириканальним АЦП. ІМС MAX86177 (рис. 10) являє собою чотириканальну оптичну систему збору даних із наднизьким енергоспоживанням, що має канали передавання та прийняття даних. ІМС призначено для використання в портативних носимих моніторах клінічного рівня. ІМС має два 8-розрядні програмовані драйвери світлодіодів, що можуть підтримувати роботу до шести світлодіодів, чотири вхідні каскади з низьким рівнем шуму, кожен із яких містить 20-розрядний 8-канальний АЦП і забезпечує зчитування струмів від восьми фотодіодів, що сконфігуровано як чотири незалежні пари. Динамічний діапазон АЦП становить 118 дБ. АЦП забезпечують ослаблення зовнішнього засвічення на рівні не менше 90 дБ. Напруга живлення АЦП складає 1,8 В, а напруга живлення драйвера світлодіодів – від 3,1 до 5,5 В. ІМС має інтерфейси типу I2C та SPI. Середньоквадратична похибка вимірювання гіпоксії цієї ІМС становить не більше 3,1 %, що нижче за допустиму межу для моніторів клінічного рівня, яка дорівнює 3,5 %.

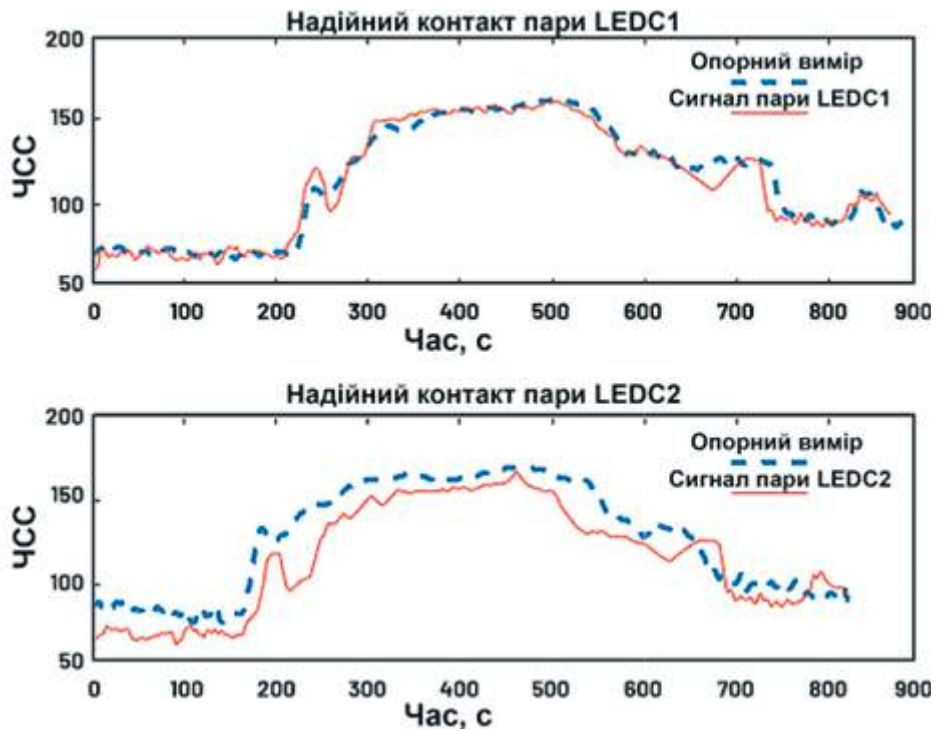


Рис. 9. Вимірювання ЧСС із використанням двох незалежних пар фотодіодів

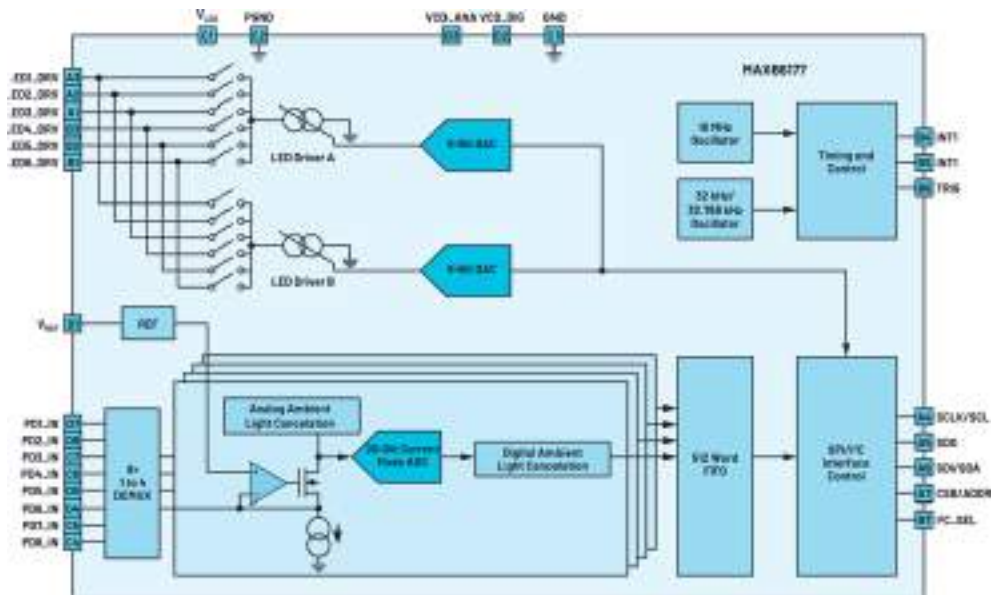


Рис. 10. Функціональна схема ІМС MAX86177 чотирьоканального оптичного інтерфейсу для побудови носимих медичних моніторів клінічного рівня

Отже, важливою проблемою при розробленні нових носимих медичних моніторів являється забезпечення оптичних вимірювань частоти серцевих скорочень і сатурації із високою валідністю та мінімально можливим енергоспоживанням. ІМС типу МАХ86177 забезпечує необхідну валідність та економію енергії до 60 % у порівнянні з сучасними моніторами, в яких використовують один світлодіод і один фотодіод. Чотириканальну структурну схему ІМС МАХ86177 призначено для використання у носимих медичних моніторах для вимірювання частоти серцевих скорочень і сатурації на клінічному рівні. Дану ІМС, крім того, може бути використано для вимірювання гідратації організму, насичення м'язів і тканин киснем, вимірювання споживання кисню.

Розумні носимі монітори фізіологічних параметрів людини. Населення Землі старіє та все більше людей потребують медичної допомоги, що значно впливає на загальні витрати з медичного обслуговування. Через цю ситуацію влада та медичні страхові компанії приділяють більше уваги профілактиці стану здоров'я пацієнтів.

Останнє зумовило стрімкий розвиток персональних носимих засобів моніторингу та діагностики життєво важливих фізіологічних параметрів людини. Так, за останні кілька років виробництво та розповсюдження розумних медичних годинників для моніторингу фізіологічних параметрів людини суттєво зросло. Однак купівля медичного годинника та вимірювання за його допомогою фізіологічних параметрів людини ще не означає покращання якості життя. Здоровий спосіб життя полягає у стеженні за певними фізіологічними параметрами протягом тривалого часу для того, щоб використовувати результати моніторингу для покращення здоров'я. Такий моніторинг може допомогти краще зрозуміти як працює власний організм людини та як зменшити витрати на підтримку здоров'я в довгостроковій перспективі.

Нову носиму платформу GEN II (рис. 11) створено на допомогу розробникам нових носимих медичних засобів пришвидшити процес їхнього впровадження у медичну практику, зробити їх розумнішими і точнішими, придатними для дійсно професійного застосування в медицині.



Рис. 11. Розумна платформа GEN II для професійного моніторингу фізіологічних параметрів людини

Широкий спектр життєво важливих параметрів людини можна виміряти за допомогою носимих пристроїв. Місце розташування носимого пристрою на тілі людини має суттєве значення для якості вимірювання певного параметру. Найбільш вживаним місцем є зап'ястя. Люди звикли носити пристрій на зап'ясті, тому на ринку присутньо багато таких пристроїв: розумні годинники та наручні пристрої. Окрім вимірювання на зап'ясті, носимі пристрої може бути розташовано на голові людини. Наприклад, навушники та вкладиші з вбудованими сенсорами для вимірювання таких параметрів, як частота серцевих скорочень, насичення крові киснем або температура тіла. Третє вживане місце для розташування носимих пристроїв є груди. Носимі монітори серцевого ритму першого покоління розташовували навколо грудного поясу, і цей принцип вимірювання біопотенціалу все ще залишається найбільш валідним методом. Сьогодні перевагу віддають спеціальній накладці на грудях, оскільки ремінь не дуже зручний у носінні.

Залежно від місця розташування пристрою обирають технологію зчитування даних. Для визначення частоти серцевих скорочень вимірювання біопотенціалу є однією з найстаріших технологій. Ці сигнали досить потужні та їх легко отримати за допомогою двох або більше електродів. Для цього підходу застосовують нагрудний ремінь або навушники. Однак виміряти біопотенціали в одній точці, наприклад на зап'ясті, майже неможливо. Для одноточкового вимірювання більш придатною є оптична технологія. Світло поступає в тканину, а вимірюють його відбиття в результаті кровотоку в артеріях. З такого оптичного сигналу можна отримати необхідну інформацію. На перший погляд це проста технологія. Однак є кілька проблем і факторів впливу, що можуть ускладнити отримання валідних даних, наприклад, у процесі руху людини або під впливом зовнішніх природних факторів.

Платформа переносних пристроїв GEN II (рис. 11) містить більшість із потрібних технологій. Пристрій працює від акумуляторної батареї і його призначено для носіння на зап'ясті. Він містить технології для вимірювання біопотенціалу, оптичного вимірювання частоти пульсу, вимірювання біоімпедансу, відстеження руху та вимірювання температури тіла. Задача такої системи полягає в тому, щоб мати можливість легко вимірювати

кілька життєво важливих фізіологічних параметрів людини. Пристрій може одночасно вимірювати такі параметри та зберігати результати або надсилати їх через бездротову мережу на мобільний телефон або планшет. Оскільки вимірювання всіх параметрів виконують одночасно, то це дає можливість знайти кореляцію між кількома виміряними параметрами для постановки діагнозу. Нова розумна платформа GEN II являється унікальним пристроєм завдяки поєднанню вбудованих сенсорів, потужного контролера та бездротового зв'язку. Оптичну систему побудовано на базі аналогового інтерфейсу ADPD107 та її використовують для виміру фотоплетизмограми, ЕКГ і частоти серцевих скорочень. Один електрод на задній частині годинника торкається поверхні руки, а до другого електроду у верхній частині пристрою можна торкнутися іншою рукою, щоб замкнути електричне коло. Електроди на задній стороні пристрою виконують подвійну функцію. Окрім вимірювання ЕКГ, їх можна використовувати для вимірювання електричної активності шкіри, що може змінюватися через емоції, зумовлені внутрішніми або зовнішніми чинниками. Платформа GEN II здатна визначити миттєву зміну електропровідності. Вона забезпечує високий рівень точності при мінімальній споживчій потужності. Крім того, у неї інтегровано сенсор для вимірювання температури тіла та 3-осьовий MEMS-акселерометр для відстеження параметрів руху. Рух завжди є важливим параметром, оскільки частота серцевих скорочень або частота дихання залежать від фізичної активності людини. Наприклад, частота серцевих скорочень у 140 ударів на хвилину – це нормально для людини, яка бігає, але якщо вона становить 140 ударів на хвилину для людини у стані спокою, то це є причиною для приймання відповідних медичних заходів. Контролер ADuCM3029 із наднизьким енергоспоживанням вбудовано у платформу для збору та оброблення отриманих від сенсорів даних (рис. 12).

Для визначення частоти серцевих скорочень необхідно вимірювати ЕКГ або фотоплетизмограму. Багаторазові вимірювання потрібні для виявлення стресу або моніторингу артеріального тиску. Емоційний стан можна виміряти шляхом спостереження за змінами електропровідності шкіри.

Якщо можливо поєднати його з моніторингом інших параметрів, таких як частота серцевих скорочень і варіабельність серцевого ритму, то важливість вимірювання даного параметру значно зростає. Температуру шкіри також можна включити як додаткову інформацію для виявлення стресу. Для визначення артеріального тиску, як правило, використовують манжету з компресором, що важко інтегрувати в носимий годинник. Однак існують певні методи, що можна використовувати для вимірювання артеріального тиску без застосування манжети. Одна з таких технологій виконує це на основі аналізу швидкості наростання пульсової хвилі. На рис. 13 показано результати вимірювання ЕКГ у поєднанні з плетизмографією.

Розумна платформа підтримує вимірювання цих параметрів.

Отже, розумна медична платформа GEN II має багато вбудованих високоефективних сенсорів для вимірювання фізіологічних параметрів людини. Це робить платформу корисною для людей похилого віку, хронічно хворих пацієнтів, спортсменів, військових тощо. Слід відзначити, що кілька фізіологічних параметрів людини можна вимірювати одночасно і за допомогою прикладного програмного забезпечення, підтримувати різні варіанти застосування розумної платформи. Відмітимо, що деякі функції платформи вже сьогодні відповідають вимогам медичних стандартів, а інші ще потребують удосконалення.

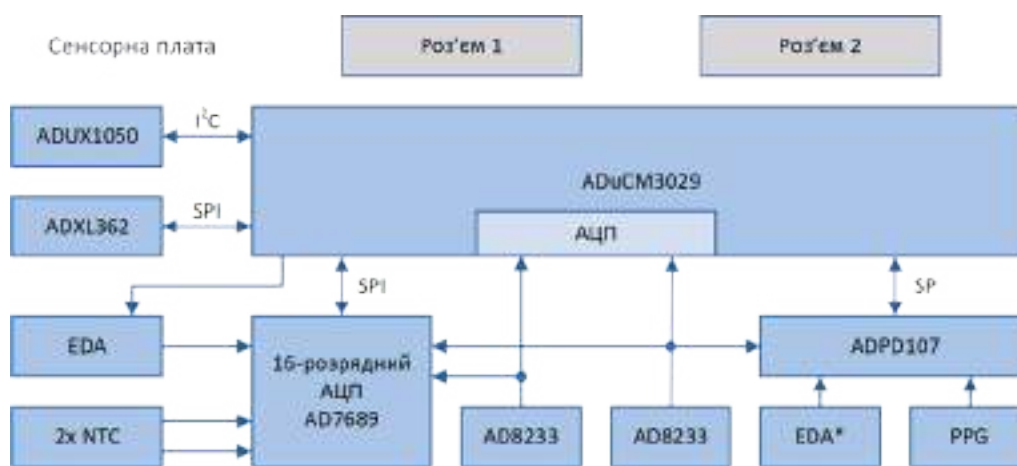


Рис. 12. Структурна схема процесора ADuCM3029 для збору даних від медичних сенсорів

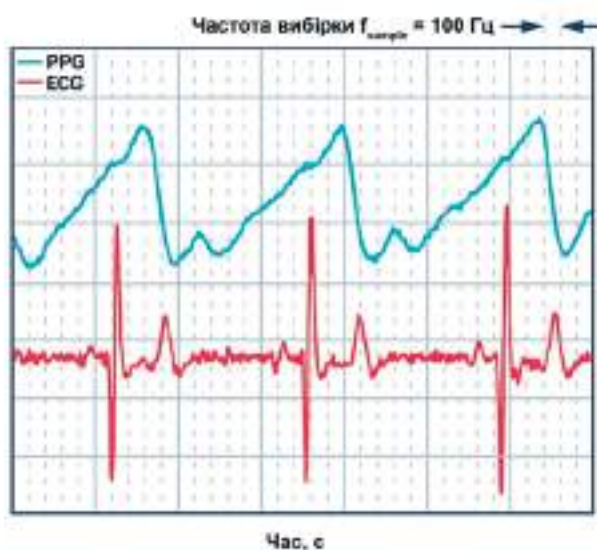


Рис. 13. Кардіограма та плетизмографа, що виміряні розумною платформою

Наносенсорна технологія для масової швидкої діагностики інфекційних захворювань [8]. Нещодавні події, пов'язані з пандемією COVID-19, зумовили нагальну потребу в ефективних методах масового скринінгу для стримування поширення мікробних патогенів. Сучасна медична практика діагностики ознак інфекційних захворювань не може в реальному часі виявити безсимптомні чи перед симптомні інфекції, а також не завжди може відрізнити смертельний коронавірус від менш небезпечних для життя респіраторних захворювань. Крім того, багато діагностичних методів тестування можуть бути неточними або надто повільними для отримання швидкого діагнозу.

Інноваційна біотехнологічна компанія Pinpoint Science запропонувала нове рішення цієї проблеми, що використовує портативну наносенсорну технологію діагностики для точного визначення патогенів менш, ніж за одну хвилину. Застосування нової технології з оригінальними наносенсорами спрямоване на діагностику інфекційних захворювань людини, спостереження за патогенами в сільському господарстві, тваринництві, ветеринарії та дикій природі, а також на виявлення мікробного забруднення в харчовій промисловості. Технологія забезпечує виявлення патогенів, використовуючи недорогий і простий портативний зчитувач та одноразові картриджі з наносенсорами, без необхідності лабораторних досліджень, ампліфікації або підготовки зразків.

Мікробні збудники, включаючи віруси та бактерії, є причиною мільйонів смертей на рік. Протягом останнього століття боротьба з інфекційними захворюваннями досягла значних успіхів, включаючи викорінення натуральної віспи та майже ліквідацію кору, епідемічного паротиту та правця. Але вірусні епідемії та пандемії все ще трапляються, впливаючи на життя та економіку населення земної кулі.

Сучасні методи виявлення інфекційних захворювань тривають від 15 хвилин до 4 годин – це надто повільно, щоб контролювати поширення або стримувати пандемію, що швидко розвивається. Крім того, сучасні тести часто є не дуже точними і дорогими та вимагають лабораторних умов, навченого персоналу, складної підготовки зразків (рис. 14).

Масові перевірки симптомів сьогодні, як правило, спрямовано на спостереження температури та кашлю, та не дають можливості виявити випадки без симптомів або розрізнити види респіраторних захворювань. Для скринінгової перевірки, наприклад, населення США або України потрібні інші типи тестування. Потрібні тести, що швидко і точно виявляють антигени.

Компанія Pinpoint Science (США) запропонувала ефективне рішення для масового тестування та діагностики в пунктах догляду, що включає простий у використанні портативний зчитувач із вбудованим картриджем із наносенсором (рис. 15). Пристрій може швидко виявляти біомаркери, такі як антитіла та антигени, і швидко ідентифікувати специфічні мікробні патогени, відповідальні за захворювання. Він здатний отримувати точні результати в польових умовах, не потребуючи для цього лабораторії, медичного персоналу та підготовки зразків.

Технологія, що лежить в основі нової наносенсорної діагностики, розроблена головним науковим співробітником компанії Надером Пурмандом, професором біомолекулярної інженерії Каліфорнійського університету в Санта-Крузі.

«Ми почали працювати над наносенсорною технологією за кілька років до появи COVID-19, і націлювалися на грип у людей і вірус катаральної хвороби у тварин за допомогою тесту на основі наносенсорів та діагностики з використанням антитіл або синтетичних молекул для виявлення та вимірювання специфічних білків для ідентифікації інфекції. Ми віримо, що наша платформа збереже свою цінність для людства навіть після пандемії COVID-19», — відмітила Ліза Даймонд, генеральний директор компанії Pinpoint Science.

Наразі компанія Pinpoint Science співпрацює з компанією Analog Devices над створенням серійних зчитувачів на базі контролера ADuCM355. Нова наносенсорна технологія працює у покроковому режимі: на першому кроці картридж із наносенсором вставляється у зчитувач (рис. 16), на другому кроці у картридж із наносенсором вставляється тестовий тампон із біоматеріалом (зразком крові, слини чи носових виділень) (рис. 17), на третьому кроці протягом хвилини з'являється індикація результатів тестування (рис. 18). Якщо лівий індикатор стане синім, то тест позитивний. Якщо правий індикатор стане білим,

то тест негативний. Результати тестування також можуть бути відображені на планшеті.

Наносенсори картриджа призначено для визначення специфічних маркерів інфекційних захворювань, якими є вірусні й бактеріальні білки та антитіла пацієнта. Результати тестування відображають на зчитувачі чи планшеті менш ніж за одну хвилину.

Отже, нова біосенсорна технологія робить можливим швидке тестування населення з високою точністю та спрямована для таких застосувань, як діагностика на вірусну чи бактеріальну інфекцію у польових умовах, удома чи у лікарні, масовий скринінг на пандемію, оцінювання стану здоров'я тварин і визначення безпеки харчових продуктів.

Електронна автентифікація індивідуальних діагностичних тест-систем [9]. Діагностичні

дослідження біологічних зразків досі, як правило, проводять у клінічних біохімічних лабораторіях. Широке застосування тестування пацієнтів за межами лабораторій або Point-of-Care чи PoC-тестування, що отримало розповсюдження в медичній практиці останнім часом, суттєво змінило ситуацію, перемістивши оброблення зразків до кабінету лікаря або навіть додому. Швидке PoC-тестування дає видиму перевагу в скороченні часу постановки діагнозу за рахунок виключення транспортування біологічного зразка пацієнта до діагностичної біохімічної лабораторії. Такий метод діагностики, крім того, є зручним і для пацієнтів. Необхідність валідного індивідуального PoC-тестування стала очевидною під час пандемії COVID-19, коли затримки з тестуванням сприяли прискоренню поширення вірусної інфекції,



Рис. 14. Приклад сучасного тестування, що є неефективним для масового скринінгу



Рис. 15. Картридж із вбудованим наносенсором



Рис. 16. Крок 1: картридж з наносенсором вставляється у зчитувач



Рис. 17. Крок 2: у картридж з наносенсором вставляється тестовий тампон із біоматеріалом пацієнта



Рис. 18. Крок 3: індикація результатів тестування через хвилину після вставлення у картридж тампону з біоматеріалом пацієнта

особливо в перші місяці пандемії. На сьогодні тенденція діагностики поза межами біохімічних лабораторій отримала подальший розвиток, зокрема за допомогою індивідуальних тест-систем уже тестуються різні види інфекцій, що передаються статевим шляхом, та багато інших. Це призводить до швидкого зростання кількості біологічних зразків, що обробляють поза лабораторіями, причому такі зразки може бути оброблено не тільки професійними лаборантами в суворо контрольованих лабораторіях, а й лікарями в медичних кабінетах і самими пацієнтами вдома, що, на жаль, збільшує ризик неправильного їх використання.

Щоб повною мірою використати переваги PoC-тестування, індивідуальні тест-системи повинні давати валідний результат, якому могли б довіряти як пацієнти, так і лікарі. Точність вимірювання є критично важливим параметром тестування, оскільки при невисокій точності тесту може бути поставлено хибний діагноз. Відповідно, наявність засобів, що забезпечують надійне оброблення біологічних зразків, необхідна для отримання валідних результатів та зниження ризику помилки в діагнозі. Одним із основних факторів ризику при тестуванні пацієнтів є повторне використання тесту. Це може трапитися, коли мазок або картридж помилково кілька разів пропускають через пристрій тестування. При масовому скринінгу така ситуація може трапитися й у клініці, якщо лаборанти погано підготовлені чи неухважні. Ще одним фактором ризику при проведенні тестування поза лабораторією є неправильне використання зразків пацієнтів. Крім того, навіть найточніша тест-система може видати хибний діагноз, якщо зразок пацієнта обробляють з порушенням правил. Для деяких тестів, таких як виявлення наявності наркотиків або алкоголю у крові пацієнта, є мотивація фальсифікації результату.

Заміна картриджа з пробою перед обробкою є одним із способів досягнення цієї мети. Додамо, що великий попит на індивідуальні тест-системи сприяє появі на ринку великої кількості підроблених картриджів. У клінічних лабораторіях закупівля матеріалів здійснюється через захищені канали. Для домашнього тестування пацієнти часто купують тест-системи в інтернет-магазинах. Це відкриває шлях для доставки контрафактних тестів із невисокою якістю, що може призвести до

помилкових результатів тестування. Слід зазначити, що використані набори зразків мають бути утилізовані як медичні відходи. Проте існує ризик того, що набори, які підлягають утилізації, може бути відновлено і знову спрямовано споживачам. Останнє сприятиме хибним результатам тесту, що може призвести до неправильного лікування пацієнта. Пацієнти можуть зіткнутися з помилковим діагнозом, наприклад, з помилково позитивним тестом, що може призвести до непотрібного лікування. Хибно негативний результат, навпаки, може призвести до запізнілої діагностики та, зрештою, до затримки чи відсутності своєчасного лікування.

На сьогодні застосовуються два традиційні методи забезпечення валідності зразків пацієнтів. Один із методів полягає у застосуванні спеціального маркування, наприклад, у застосуванні одномірного або двовимірного штрих-кодування (рис. 19). При іншому методі використовують спеціальні механічні пристрої, що перешкоджають повторній установці картриджа. Використання одновимірних і двовимірних штрих-кодів є кращим методом відстеження зразків у лабораторних умовах. Інформація про партію, серійні номери та унікальну ідентифікацію пристрою може бути використано для підтвердження справжності картриджа. Крім того, перед обробкою зразків можна переглянути в пам'яті штрих-коди, щоб унеможливити їх повторне використання. Незважаючи на те, що штрих-коди є надійним засобом підтвердження автентичності пацієнта, вони не виключають помилки тестування. По-перше, для етикеток зі штрих-кодом потрібен сканер штрих-коду, що ускладнює конструкцію діагностичного пристрою. Штрих-коди також потребують значної пам'яті для зберігання достатньої кількості серійних номерів, щоб запобігти повторному використанню картриджу зі зразком. При великій кількості зразків, що тестуються, додаткове зчитування штрих-кодів призводить до втрати продуктивності тестування.

Другий традиційний метод полягає у використанні простого механічного елемента, такого як спеціальна виїмка на картриджі тест-системи, що змінює форму або положення при встановленні у пристрій для обробки зразків (рис. 20). Такі конструктивні особливості запобігають повторному використанню біологічного зразка.



Рис. 19. Пристрій для обробки зразків після тестування з вбудованим сканером штрих-кодів

Однак зразки з виїмкою ідентичні від картриджа до картриджа і не дають можливості відрізнити зразок одного пацієнта від зразка іншого пацієнта. Крім того, у міру того, як тест-системи зменшуються в розмірах, то додавання конструктивних особливостей до картриджа створює додаткові труднощі під час їх виготовлення.

Щоб знайти ідеальне рішення для персональних тест-систем, необхідно вийти за рамки традиційних методів ідентифікації, замінивши їх електронною автентифікацією. Це можна зробити на основі вбудованого у картридж спеціального інтегрального ідентифікатора (рис. 21). Такий автентифікатор на основі ІМС є надійним засобом захисту від неправильного або повторного використання картриджа тест-системи. Для вирішення проблеми повторного використання електронний автентифікатор містить лічильник, що реєструє використаний одноразовий картридж і таким чином гарантує одноразову обробку зразка. Вбудований автентифікатор, крім того, розрізняє біологічні зразки різних пацієнтів. Захист від неправомірного використання картриджа забезпечують за рахунок вбудованого криптографічного алгоритму, що надійно розпізнає

підроблені картриджі. Електронний автентифікатор також має додаткову функцію запису мітки часу. Це може бути корисним, якщо тестування пацієнтів виконують періодично.

На відміну від штрих-кодів і механічних захисних елементів, рішення для електронної автентифікації вбудоване в картридж робить захисний вузол невидимим як для користувачів, так і для потенційних злоумисників. Застосування електронного автентифікатора значно знижує ризик повторного та неправильного використання картриджів із зразками та надійно гарантує валідність результатів тестування. Можливості ІМС електронного автентифікатора представляють собою рішення, що можна легко інтегрувати в картридж індивідуальних тест-систем (рис. 22). Вбудована в ІМС пам'ять забезпечує надійний захист конфіденційних даних від несанкціонованого доступу. Автентифікація використовує стандартний симетричний ключ SHA-2/SHA-3 або алгоритми шифрування ECDSA з асиметричним ключем для гарантії автентичності картриджу та захисту від використання підробок. Інтегрований лічильник безпеки запобігає повторному використанню одноразового картриджу.



Рис. 20. Пристрій для обробки зразків після тестування з вбудованою механічною виїмкою на тестовій системі

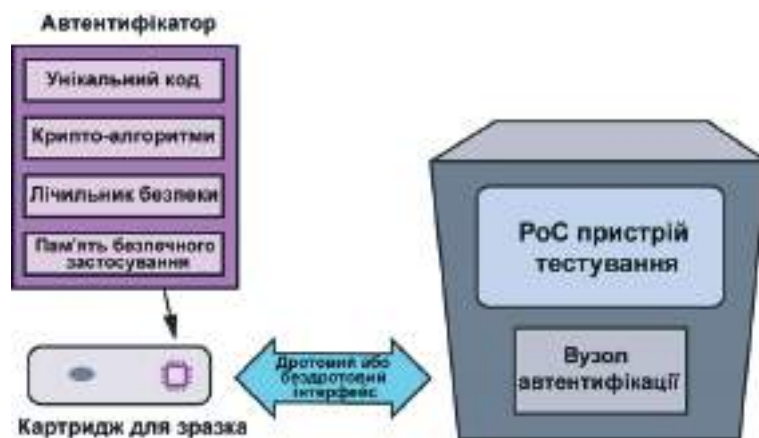


Рис. 21. Пристрій для обробки зразків після тестування з вбудованим електронним автентифікатором

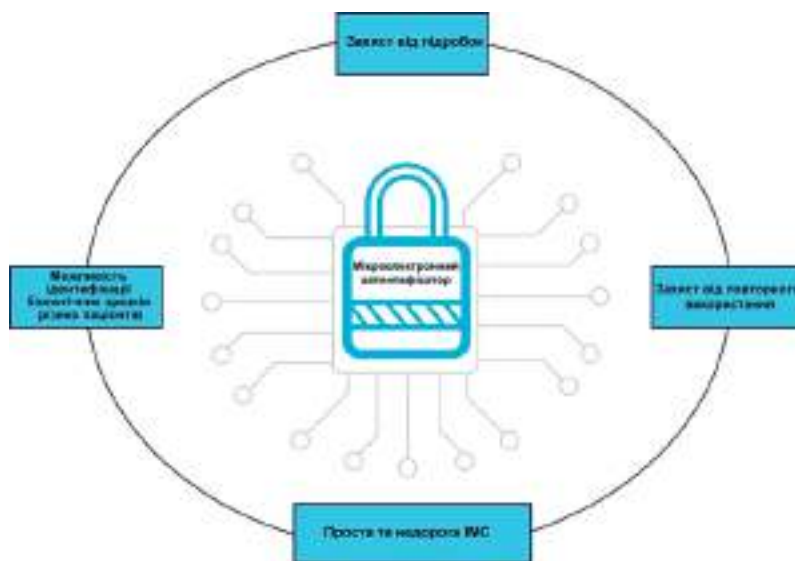


Рис. 22. Функції мікроелектронного аутентифікатора на основі ІМС DS28E16

Високопродуктивні мікроелектронні перетворювачі даних для діагностичної медичної апаратури з візуалізацією інформації [10]. У сучасній медицині широко застосовують різні фізичні ефекти та явища на основі іонізуючого випромінювання, енергії електромагнітного поля, ультразвукові хвилі тощо. Вони дозволяють візуалізувати патологічні зміни в організмі людини і є надійною основою діагностичних досліджень. Центральним ядром такої апаратури являються високопродуктивні системи збирання та оброблення даних, більшість із яких можуть бути успішно реалізовані на надвеликих інтегральних мікросхемах провідних світових компаній із мікроелектроніки.

Поява перших систем візуалізації у медицині пов'язана з відкриттям видатного фізика Рентгена, що отримало назву рентгенівських променів. У даний час у сучасній медицині використовують досить велику кількість різнотипних систем візуалізації патологічних змін в організмі людини, побудованих на різних фізичних ефектах, однак загальними електронними компонентами таких систем є пристрої збору й оброблення даних і зображень. Вони містять чутливі електронні компоненти, а саме підсилювачі з низьким рівнем шумів (low-noise amplifiers – LNA), підсилювачі з регульованим коефіцієнтом підсилення (variable-gain amplifiers – VGA), фільтри різного типу як аналогові, так і цифрові, аналого-цифрові та

цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП). Саме параметрами цих компонентів визначається динамічний діапазон, роздільна здатність, лінійність, точність, валідність та рівень шумів діагностичних медичних систем із візуалізацією даних. Розглянемо особливості різних систем візуалізації, що наразі поширені у медичній практиці.

Цифрова рентгенографія (Digital radiography – DR), що широко застосовується в сучасній медицині. Вона дає можливість оцифрувати зображення, що потім можна збільшити в масштабі, покращити його контрастність, змінити кольори (такий метод нерідко допомагає виявити «сліди», які погано помітно на стандартному знімку), розмістити кілька знімків на одному «листі», роздрукувати зображення як на плівці, так і на папері, зберегти знімок на цифровому носії та в разі потреби переслати цей знімок пацієнту чи лікарю (рис. 23). Мінімальна частота вибірки мікроелектронного АЦП у такому пристрої зумовлена розмірами матриці детектора у пікселях та частотою регенерації рентгенівського зображення. Монітор на мільйони пікселів із типовою швидкістю регенерації 25–30 кадрів на секунду потребує використання багатоканального АЦП із частотою вибірки щонайменше 100 МГц без втрати точності перетворення. Іншим не менш важливим параметром такого АЦП є відношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio – SNR), що характеризує

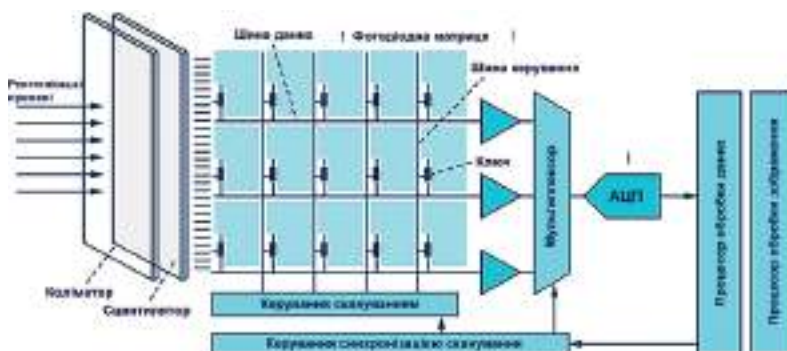


Рис. 23. Типова структурна схема цифрового рентгенівського детектора

точність і валідність анатомічного відображення тіла людини або окремої його ділянки. Типова роздільна здатність АЦП у таких системах перебуває в межах від 14 до 18 біт, а відношення сигнал/шум – від 70 до 100 дБ.

Комп'ютерна томографія (Computed tomography або СТ) – це метод неруйнівного пошарового дослідження внутрішньої будови речовини, що було запропоновано у 1972 році Годфрі Хаунсфілдом та Алланом Кормаком, які були удостоєні за цей метод Нобелівської премії. Метод засновано на вимірюванні та складній комп'ютерній обробці різниці ослаблення

рентгенівського випромінювання різними за щільністю тканинами. У сучасній медицині рентгенівська комп'ютерна томографія є основним томографічним методом дослідження внутрішніх органів людини у тривимірному (3D) просторі з використанням рентгенівського випромінювання. За допомогою комп'ютерної томографії досліджують кровоносну систему людини, м'які тканини тощо. Центральним компонентом комп'ютерного томографа є детектор (рис. 24), що містить велику кількість електронних модулів і перетворює пучки рентгенівських променів в електричні сигнали. Ці сигнали подають на вхід

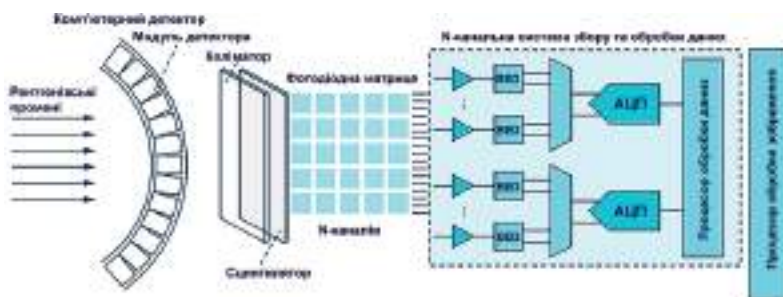


Рис. 24. Структура детекторного вузла комп'ютерного томографа для збирання, обробки та зображення даних, де ВВЗ – вузол відбору і збереження даних

багатоканального АЦП. Кожен модуль містить кристалічний скінтілятор, фотодіодну матрицю та АЦП із малим рівнем шумів для кодування наднизьких струмів на виході фотодіодної матриці. Для виключення артефактів і забезпечення високої контрастності зображення АЦП повинен мати високу лінійність та низьке споживання, тому що

виділення надлишкового тепла негативно впливає на чутливість фотодетектора. Розрядність АЦП у таких системах сягає 24 біт, а час перетворення складає не більше 100 мкс для забезпечення високої чіткості зображення.

Позитрон-емісійна томографія (ПЕТ) або Positron emission tomography (PET), вона ж двофотонна

емісійна томографія – це радіонуклідний томографічний метод дослідження внутрішніх органів людини чи тварини. Метод засновано на реєстрації пари гамма-квантів, що виникають під час анігіляції позитронів з електронами. Позитрони виникають при позитронному розпаді бета радіонукліда, що входить до складу радіофармпрепарату, який вводиться в організм перед дослідженням. Анігіляція позитрону в речовині (зокрема, у тканині організму) з одним із електронів середовища породжує два гамма-кванти з однаковою енергією, що розлітаються в протилежні сторони по одній прямій. Великий набір детекторів, розташованих навколо об'єкта, який досліджується, і комп'ютерна обробка отриманих від них сигналів дають можливість виконати тривимірну реконструкцію розподілу радіонукліда в сканованому об'єкті. У більшості випадків ПЕТ-томограф комбінують з КТ- або

МРТ-сканером. Позитрон-емісійна томографія – це діагностичний і дослідний метод ядерної медицини, що активно розвивається. ПЕТ-сканування широко використовують у сучасній клінічній онкології. До структурної схеми аналогового інтерфейсу ПЕТ-детектора входить матриця скінтіляторів і фотоелектронних помножувачів (ФЕП), що перетворюють гамма-промені в електричний струм, який потім перетворюють на напругу (рис. 25). Напругу посилюють за допомогою VGA-підсилювачів. У результаті процесорної обробки отримують тривимірне зображення, наприклад, пухлини з мічених атомів всередині ділянки тіла, що досліджують. Вимоги до АЦП у такій системі: частота вибірки не менша 40 МГц, роздільна здатність 10–12 біт, низький рівень шумів і мала потужність для зменшення впливу температури на параметри ПЕТ-сканера.

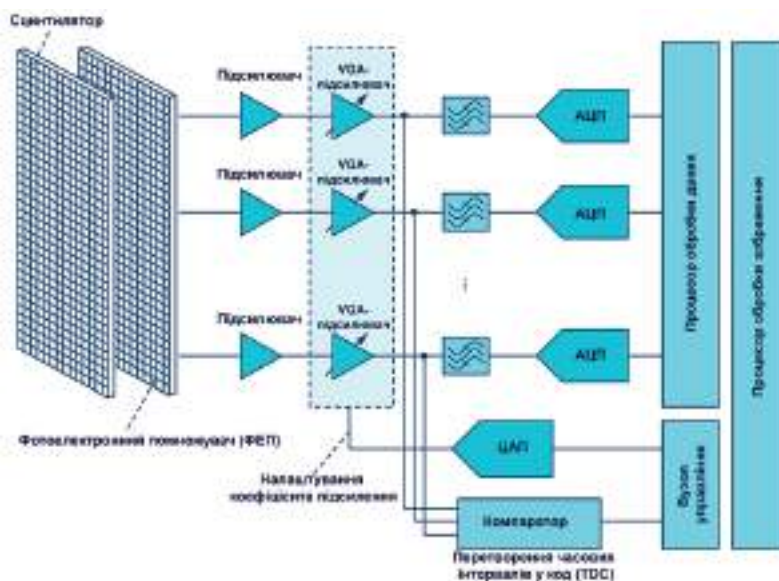


Рис. 25. Структура аналогового інтерфейсу ПЕТ-детектора

Ядерний магнітний резонанс або ЯМР (Magnetic resonance imaging – MRI) – резонансне поглинання або випромінювання електромагнітної енергії речовиною, що містить ядра з ненульовим спином у зовнішньому магнітному полі на частоті ν (частоті ЯМР), яке зумовлене переорієнтацією магнітних моментів. Явище ядерного магнітного резонансу в молекулярних пучках було відкрито Ісідором Рабі в 1938 році, за що він був удостоєний Нобелівської

премії 1944 року. Додамо, що у 1946 році Фелікс Блох і Едвард Міллз Парселл отримали ядерний магнітний резонанс у рідинах та твердих тілах (Нобелівська премія 1952 року). На основі цього методу розроблено технологію магніторезонансної томографії (МРТ), що дає можливість візуалізувати з високою якістю головний і спинний мозок та інші внутрішні органи. Сучасні технології МРТ уможливають неінвазивно досліджувати

роботу органів живого організму – вимірювати швидкість кровотоку, визначати рівень дифузії у тканинах, бачити активацію кори головного мозку при функціонуванні органів, за які відповідає ця ділянка кори. На відміну від попередньо розглянутих методів, що використовують іонізуюче випромінювання, метод МРТ не містить джерел іонізуючого випромінювання. Несучі частоти сигналів МРТ перебувають у межах від 12,8 до

298,2 МГц. Смуга корисного сигналу перебуває в діапазоні від кількох десятків до кількох сотень кілогерців. Приймач у МРТ сканері може мати архітектуру супергетеродина (рис. 26). У цьому випадку в складі приймача є порозрядний АЦП невисокої швидкої дії з роздільною здатністю 16 біт та частотою вибірки не менше 100 МГц. Динамічний діапазон АЦП має бути не менше 100 дБ.

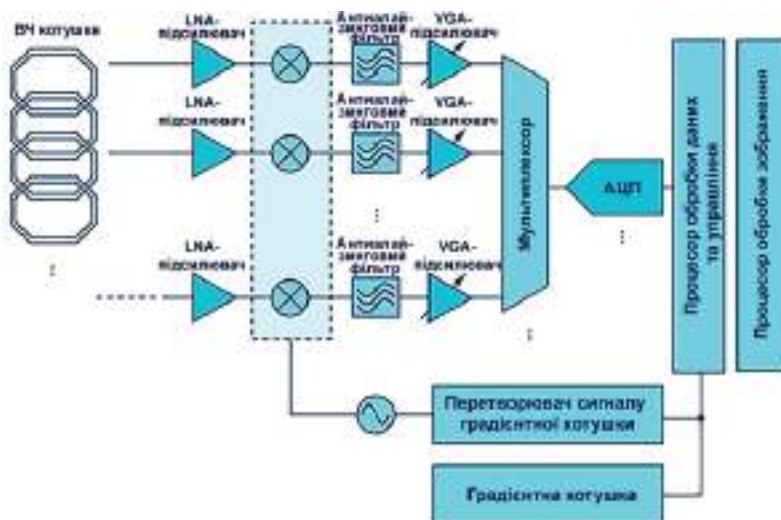


Рис. 26. Структурна схема вимірювального вузла МРТ томографа із супергетеродинною архітектурою

Ультразвукова діагностика (Ultra sonography) – це метод дослідження, що засновано на посилянні в різні ділянки тіла, які обстежується,

ультразвукових імпульсів, що послідовно після відбиття від різних органів або тканин формують зображення їх щільності на екрані монітора (рис. 27).

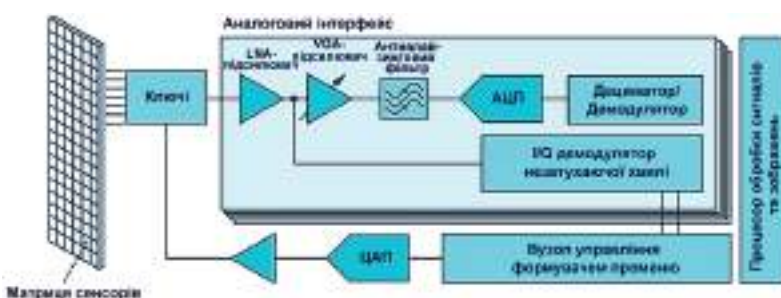


Рис. 27. Структурна схема аналогового інтерфейсу апарату УЗД

Цей метод діагностики застосовують, наприклад, у кардіології, акушерстві, офтальмології, гастроентерології, урології тощо. Завдяки простоті виконання, нешкідливості, високій інформативності метод набув широкого поширення у клінічній практиці. В ряді випадків

ультразвукового дослідження достатньо для встановлення діагнозу, в інших – ультразвукові дослідження використовуються разом з іншими (рентгенологічними або радіонуклідними) методами діагностики.

Як впливає з нашого короткого огляду, медичні прилади, що призначено для візуалізації патологічних змін в організмі людини і які засновано на різних фізичних ефектах і явищах, містять високопродуктивні мікроелектронні системи збору та обробки даних практично з однаковими вузлами та подібними характеристиками. Ці системи зазвичай виконано у вигляді надвеликих інтегральних мікросхем (НВІС). Наведемо приклади параметрів деяких НВІС, що наявні на ринку електронних компонентів:

– ADAS1256 – це НВІС аналого-цифрового інтерфейсу, що містить мультиплексор на 256 каналів із чутливими інтеграторами, ФНЧ-фільтри та 16-розрядний АЦП. Мікросхема практично є закінченим рішенням для побудови системи збору та обробки даних для цифрової рентгенографічної медичної апаратури;

– у цифровій рентгенографії можна успішно використовувати НВІС AD7960, що містить 18-розрядний АЦП сімейства PulSAR® з динамічним діапазоном 99 дБ і частотою вибірки 5 МГц;

– НВІС AD9269 і AD9249 – це pipeline АЦП з роздільною здатністю 14 і 16 біт і частотою вибірки 80 і 65 МГц відповідно, що призначено для використання в цифровій рентгеноскопії;

– ADAS1135 і ADAS1134 – багатоканальні НВІС із числом каналів 256 і 128 відповідно, які відрізняються малим рівнем шумів і низьким споживанням, що забезпечують одночасну вибірку сигналів за всіма каналами. Вони містять два швидкодіючих АЦП із розрядністю до 24 біт. Основне застосування цих мікросхем – апаратура цифрової томографії;

– НВІС AD9228, AD9637, AD9219 та AD9212 – 12- та 10-розрядні АЦП із частотою вибірки від 40 до 80 МГц. Основним їх призначенням є побудова аналогових інтерфейсів ПЕТ-томографів;

– НВІС AD9656 – 16-розрядний pipeline АЦП, що призначено для застосування в МРТ томографах. Має частоту вибірки даних до 125 МГц;

– НВІС AD9671 – 8-канальний інтерфейс, що призначено для використання в ультразвуковій апаратурі. Він містить 14-розрядний АЦП із частотою вибірки до 125 МГц. Споживана потужність мікросхеми складає приблизно 62,5 мВт.

Засоби догляду. Вже згадувалося про особливе значення моніторингу для отримання реальної картини функціонального стану організму

та наявності **сталих станів організму** [11]. Вибір і обґрунтування **критеріїв оцінювання сталості тимчасових станів пацієнтів** ґрунтується на даних про найважливіші фактори ризику та конфаундери, характерні для досліджуваної патології чи кластеру реабілітації. Підкреслимо, що аналіз статистичних матеріалів дозволяє зробити висновок про те, що серед фізичних факторів найбільше значення має невинуватене фізичне навантаження, а серед фармацевтичних – необґрунтоване поєднання різних лікарських засобів або їх дозування.

Особливе значення має догляд за пацієнтами похилого віку [12]. Завдяки розвитку медичної галузі все більше людей можуть жити повноцінним життям у свої золоті роки. У той же час, за даними ВООЗ та ООН старіння населення в світі відбувається швидше, ніж підростає нове покоління для підтримки літніх людей. Як задовольнити потреби старіючого населення під час такої демографічної зміни, коли умовних опікунів стає значно менше, ніж їхніх підопічних? Відповідь на це дають нові інформаційні технології, що в недалекому майбутньому відіграватимуть важливу роль у житті людей похилого віку.

На сьогодні для багатьох сімей немає можливості взяти батьків похилого віку в свій власний дім або сім'ю, щоб пильніше стежити за ними, оскільки більшості людей не вистачає фінансових ресурсів, медичних знань або часу для забезпечення своїм близьким повного чи навіть часткового догляду. Проте багато хто вважає, що не добре поміщати близьку людину в заклад для догляду за пацієнтами похилого віку чи будинок престарілих, коли вона ще майже здатна жити самостійно. Носимі цифрові засоби охорони здоров'я, такі, наприклад, як монітори стану здоров'я, можуть стати рішенням для догляду за близькими літніми людьми. Такі засоби у найближчому майбутньому отримають широке розповсюдження в багатьох країнах світу, виходячи, наприклад, з того, що у США вже зараз кількість людей, яким щодня виповнюється 65 років, становить 10 тисяч осіб. Відповідно до сучасних прогнозів населення Землі старше 60 років у 2030 р. досягне приблизно 17% і перевищить один мільярд осіб.

Одна з провідних компаній із США успішно розробляє носимі системи моніторингу стану здоров'я, що призначено для покращення якості життя людей похилого віку. Носимі монітори

цієї компанії збирають дані про стан здоров'я літньої людини в режимі реального часу, що дає змогу членам сім'ї чи опікунам отримувати оперативну інформацію про стан здоров'я своїх підопічних. Наприклад, носимий монітор стану здоров'я Tempo має можливість спостерігати за пацієнтом незалежно від його місцезнаходження. Це може бути спальня, кухня, ванна кімната тощо. Завдяки обробленню даних штучним інтелектом,

монітор (рис. 28) допомагає сім'ям або опікунам літніх пацієнтів виявляти незначні зміни в їхній поведінці, такі як зменшене споживання їжі, поганий сон або малорухливий спосіб життя. Дана платформа доступна на стільникових комп'ютерах і мобільних пристроях, відображає поведінкові тенденції, що допомагають своєчасно виявляти проблеми зі здоров'ям, перш ніж, вони стануть серйознішими.



Рис. 28. Платформа Tempo, що відображає поведінкові тенденції літньої людини

Цифрова платформа охорони здоров'я компанії Care Predict використовує носимі сенсори, що відстежують поведінку та відхилення фізіологічних показників літнього пацієнта. Цю систему призначено для використання як у закладах для проживання людей похилого віку, так і приватних будинках або апартаментах. Вона спирається на сенсори, алгоритми глибокого навчання та прогнозу аналітику, щоб надати близьким або лікарям практичну інформацію про поточний стан пацієнта похилого віку. Ці дані можуть заздалегідь передбачити серйозні захворювання, такі як інфекційні хвороби, депресія або ризик падіння. Пристрій Tempo Series 3 для домашнього використання компанії Care Predict отримав нагороди CES Innovation Award у категорії цифрових носимих пристроїв, якими відмічають кращі інженерні вироби у США, протягом останніх трьох років.

Даний носимий монітор додатково може розпізнавати жести для дистанційної ідентифікації

різних дій літнього пацієнта, наприклад, коли він підносить виделку до рота (рис. 29). Більше того, вивчаючи щоденний ритм дій пацієнта похилого віку, цей монітор може виявляти та повідомляти близьких або лікаря про зміни в його поведінці для забезпечення своєчасного медичного втручання. Пацієнт, у разі потреби, має можливість натиснути тривожну кнопку на моніторі, щоб терміново зв'язатися з лікарем або членом сім'ї.

Слід додати, що програма компанії Care Predict Touch Point пропонує членам сім'ї дані в режимі реального часу та статистику стану одним натисканням кнопки (рис. 30). Це дає близьким літньої людини детальне уявлення про її поточний стан і про те, чи відбулися якісь тривожні зміни в її поточній поведінці, як, наприклад, пропуск приймання їжі або зменшена фізична активність. Створення такої складної, але простої у використанні, персоналізованої системи моніторингу стану здоров'я потребувало використання цілого ряду базових технологій



Рис. 29. Приклад розпізнавання жестів



Рис. 30. Приклад відображення статистичних даних

і засобів, а саме точних і валідних сенсорів, енергоефективних електронних компонентів, відповідного прикладного забезпечення тощо. Носимі монітори сімейства Tempo відрізняються компактністю, працюють від батареї та мають тривалий час безперервної роботи.

Дистанційний догляд за пацієнтами [13]. Масштабна трансформація методів надання медичної допомоги розпочалася задовго до появи коронавірусу COVID-19, що дав новий поштовх розвитку інноваційних технологій у медицині. Ще до пандемії 2020 року швидке старіння населення в розвинених країнах і практично загальна доступність мобільного широкосмугового Інтернету, разом з розвитком складних сенсорних

технологій, сприяли впровадженню все більш персоналізованих і віддалених методів моніторингу та діагностики стану пацієнтів. Оскільки пандемія коронавірусу збільшила навантаження на клінічні заклади, постачальники медичних послуг змушені були прискорити впровадження нових технологій для тестування та моніторингу пацієнтів за межами закладів. Інновації у сенсорах уже зараз дають можливість вимірювати з клінічною точністю показники життєдіяльності пацієнтів у домашніх умовах, а результати вимірювань оцінювати безпосередньо при наданні медичної допомоги без їхнього оброблення у віддалених лабораторіях, що забезпечує отримання швидкого результату та прискорює постановку діагнозу. Тобто, на сьогодні

відбувається поступова заміна стандартних медичних процедур, що діяли протягом багатьох десятиліть. У традиційній моделі лікування пацієнт відвідував клініку, коли симптоми ставали очевидними або для планового щорічного огляду. Він піддавався одноразовому набору тестів, що, як правило, направляли до лабораторії для аналізу та постановки діагнозу. Часто цей діагноз ставили протягом певного часу після початкової консультації і він ґрунтувався на застарілих на момент встановлення діагнозу даних. Такий підхід до лікування мав сенс, коли складне обладнання, необхідне для спостереження за життєво важливими показниками та симптомами, було доступне лише у клініках.

Розвиток сенсорної технології створив умови для нової концепції лікування. Замість складного стаціонарного медичного обладнання, що використовується в клінічній практиці, в новому підході для моніторингу стану пацієнта пропонуються мініатюрні носимі сенсори і прилади, які вбудовують в одяг. Вони споживають мінімум електроенергії та працюють від акумуляторної батареї, а найголовніше, забезпечують точність і валідність вимірювання медичних параметрів практично на клінічному рівні. Це дає можливість проводити медичний моніторинг і оцінювати результати більшості аналізів поза клінікою, як правило, сімейним лікарем удома у пацієнта. Для ще більшої зручності пристрої, наприклад, у вигляді спеціальних пластирів, можуть безперервно підтримувати цілодобовий моніторинг стану пацієнта. Мотивація до впровадження нових технологій віддаленого моніторингу, крім того, пов'язана із нестачею ресурсів. Тиск на лікарні під час піку пандемії COVID-19 у 2020 році показав, що заклади охорони здоров'я не змогли швидко впоратися зі зростанням попиту на послуги невідкладної допомоги. Отже, новий підхід являється оптимальною довгостроковою стратегією, що дозволяє перемістити пацієнтів, яким необхідний моніторинг основних показників життєдіяльності, з лікарняного ліжка у клініці додому. Через безперервний моніторинг можна виявити такі тенденції та закономірності, що неможливо виявити точковим вимірюванням цих параметрів при прийомі пацієнта. Застосування технології штучного інтелекту для діагностики означає, що моніторинг потоку медичних даних

може бути повністю автоматизовано. Замість того, щоб завантажувати лікарів вивченням медичних параметрів пацієнта, штучний інтелект зможе відстежувати життєво важливі функції у фоновому режимі, залучаючи лікаря лише тоді, коли буде потрібно його безпосереднє втручання. Отримуючи прогноз, що вказує на можливість майбутнього захворювання, пацієнт і практикуючий лікар можуть разом приймати рішення про вибір або заміну лікарських засобів, корекцію способу життя або дієти, щоб запобігти виникненню прогнозованої хвороби. При старому підході, за якого не було постійного моніторингу стану пацієнта, несвоєчасне лікування могло привести пацієнта у відділення невідкладної допомоги. Крім того, моніторинг пацієнта в домашніх умовах дає можливість отримати інформацію про стан здоров'я в реальних умовах, а не в стресових умовах лікарняної палати. Нові носимі багатопараметричні сенсори можуть поєднувати вимірювання показників життєдіяльності з вимірюванням інших важливих показників здоров'я пацієнта, наприклад, таких як якість його сну, що дає можливість зіставити медичні дані зі способом життя пацієнта. Використання нових засобів моніторингу медичних параметрів є важливим досягненням мікроелектроніки та інформатики. Наприклад, в області оптоелектроніки розроблено оптичні сенсори для фотоплетизмографії, що дають можливість неінвазивно вимірювати частоту серцевих скорочень, частоту дихання та рівень сатурації. Мініатюрні датчики руху, що виготовлено за MEMS-технологією, можуть вимірювати фізичну активність пацієнта. Реалізуючи можливості вимірювання цих параметрів за допомогою однієї-двох мікросхем, виробники електронних компонентів створюють, наприклад, медичні пластирі, що накладають на шкіру пацієнта й які можуть працювати від батареї протягом декількох днів або тижнів, передаючи результати вимірювань за бездротовою мережею на віддалений комп'ютер або смартфон лікаря. Зазначимо, що результати вимірювань можуть бути легко завантажені до хмарної діагностичної служби для встановлення остаточного діагнозу. Створення мікроелектронних компонентів для нових медичних технологій – це лише початок співпраці з розробниками цих технологій. У галузі моніторингу життєво важливих функцій людського організму створюються

нові медичні платформи. На рис. 31 показано одну з таких платформ компанії Analog Devices у вигляді спеціального годинника для моніторингу життєво важливих показників здоров'я. Годинник представляє собою відкриту багатопараметричну

платформу для розроблення носимих медичних моніторів. Маючи у своєму складі набір медичних сенсорів, цей годинник забезпечує безперервний вимір основних показників життєдіяльності людини.



Рис. 31. Годинник для моніторингу життєво важливих показників здоров'я компанії Analog Devices

Годинник дозволяє вимірювати плетизмограму, ЕКГ, частоту серцевих скорочень і варіабельність серцевого ритму. Вбудований у годинник MEMS-акселерометр забезпечує підрахунок кроків і реєструє дані про артефакти руху. Сенсори, вбудовані в годинник, вимірюють температуру тіла та імпеданс шкіри, що дає можливість виявляти стресовий стан пацієнта. Широкі властивості носимої медичної платформи дають можливість досліджувати нові напрями застосування віддаленого медичного моніторингу.

Переваги перенесення спостереження за станом пацієнта з клініки додому очевидні. Створені на основі точних малопотужних і мініатюрних електронних компонентів (сенсорів, АЦП, ЦАП, процесорів) носимі медичні монітори створюють надійну основу для проектування інноваційних пристроїв і систем медичного моніторингу майбутнього відповідно до вимог медицини 4П.

Керування діабетом за допомогою носимих пристроїв безперервного моніторингу глюкози [14]. Розвиток мікроелектроніки та інформаційних технологій дав можливість успішно подолати перехід від тест-смужок для виміру рівня глюкози в крові до малоінвазивних мікросенсорів, що забезпечують безперервний моніторинг цього параметру.

Носимі пристрої безперервного моніторингу рівня глюкози в крові (рис. 32) мають суттєвий вплив на життя мільйонів діабетиків у всьому світі. Додамо, що за останніми даними в світі налічується до 463 мільйонів дорослих діабетиків. Витрати на їх лікування складають до 760 мільярдів доларів на рік. Для діабетиків першого типу пальцеві тестові смужки є зараз найпоширенішим способом індивідуального тестування рівня глюкози в крові. Їх застосовують до 7 разів на день у залежності від особистого стану пацієнта-діабетика. Це необхідно для того, щоб отримати значення рівня цукру в крові в реальному часі. На жаль, цей показник не визначає динаміки зміни рівня цукру в крові діабетика протягом певного часу (в інтервалах між вимірами). Отже, пацієнт не усвідомлює, зростає цукор чи знижується в інтервалі між вимірами, тобто не має дієвого розуміння, необхідного для належного вирішення проблеми.

Наразі в медичній практиці починають відходити від вимірів рівня цукру за допомогою тестових смужок. Відбувається перехід на безперервний моніторинг цього показника. Компанія Meiqi (КНР) є однією з провідних компаній у цій галузі. У КНР налічується понад 125 мільйонів хворих на цукровий діабет. Щоб задовольнити цей щорічно зростаючий ринок, компанія Meiqi розробила нове покоління



Рис. 32. Безперервний моніторинг рівня глюкози у крові

носимого монітору MeiqiGen 3. Монітор містить мініатюрний сенсор, уведений під шкіру пацієнта-діабетика для безперервного вимірювання рівня цукру в крові протягом дня, що надсилає результати вимірів на смартфон або розумний годинник для подальшого передавання їх у хмару. Ця інформація в реальному часі допомагає діабетикам швидко регулювати свою фізичну активність, споживання їжі або рівень інсуліну, а також допомагає запобігти виникненню важкої гіперглікемії або низького рівня цукру в крові, що може призвести до швидких фатальних наслідків. Економічні переваги пристрою також цілком реальні. Крім економії на голках і тест-смужках, що є значною протягом життя пацієнта, безперервні дані, отримані від такого монітору, допомагають пацієнтам успішно контролювати небажані симптоми та уникнути додаткових витрат на медичні процедури або відвідування лікаря. Монітор надає пацієнтам можливість управляти власним здоров'ям і в разі необхідності змінювати спосіб харчування або час прийому ліків, одночасно забезпечуючи кращу якість життя.

Монітор містить мікросенсор (рис. 33), що зазвичай прикріплюється до руки, щоб постійно контролювати рівень глюкози в рідині. Це тонкий шар рідини, що оточує клітини тканини безпосередньо під шкірою. Монітор визначає загальні тенденції та закономірності рівня глюкози цілодобово і передає ці дані через хмару до відповідних медичних центрів.

Оскільки медицина переходить від реактивної до більш прогностичної, пошук відповідного досвіду оброблення сигналів для впровадження цієї технології є важливим. Перехід до медицини 4П, тобто прогностичної та персоналізованої, стає неможливим без застосування безперервного моніторингу. Отримуючи точні клінічні дані про

рівень глюкози, пацієнти мають змогу вводити відповідну дозу інсуліну, що допомагає запобігти подальшим діабетичним ускладненням, таким як пошкодження кровоносних судин, захворювання серця, інсульт, захворювання нирок і діабетична кома. Крім того, дані моніторингу поступають у хмару, щоб надати детальну інформацію про рівень глюкози за дні, тижні та місяці, що медичні працівники використовують для прийняття оптимальних рішень про ефективне лікування діабету. Пальцевий тест не може забезпечити такий рівень точності та обсяг даних. Повний склад монітору показано на рис. 34-36.

Мікросенсор і передавач плюс реєстратор, що представлені на рис. 36, призначені для сканування та зберігання даних про рівень глюкози пацієнта під час його перебування у лікарні.

Розумний годинник допомагає запобігти суїциду підлітків. Суїцидальність серед підлітків стала новою пандемією у США та інших країнах. Американська психологічна асоціація визначає суїцидальність як «ризик суїциду, що зазвичай проявляється суїцидальними думками або наміром, особливо за наявності добре розробленого суїцидального плану». Його також можна визначити як суїцидальні думки, плани, жести або навіть спроби. Виходячи з цього, серед сучасних дітей-підлітків існує справжня небезпека [15–17]. Незалежно від того, чи є зростання суїцидальності в демографічній групі через ізоляцію, наприклад, від пандемії COVID-19 та її карантину, шкідливих соціальних медіа чи інші суспільні/сімейні обставини, таке явище потребує відповідних технологічних рішень для підтримки психічного здоров'я підлітка. Одне з таких рішень запропоновано дослідниками Медичної школи Орегонського університету охорони здоров'я



Рис. 33. Принцип дії мікросенсору в складі монітору рівня цукру в крові

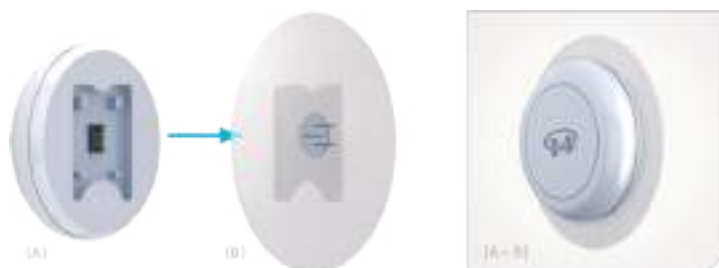


Рис. 34. Склад мікросенсору глюкози MeiqiGen 3: передавач з батареєю (А), змінний мікросенсор (В)



Рис. 35. Клінічний монітор MeiqiGen 3



Рис. 36. Індивідуальний монітор і персональний сенсор MeiqiGen 3

та науки (OHSU). У цьому університеті разом із відомими компаніями в галузі мікро електроніки розробляється нова технологія, що в майбутньому допоможе подолати зростаючу кризу психічного здоров'я підлітків за допомогою спеціального смарт-годинника на основі моніторингу життєво важливих параметрів. Науковці сподіваються, що зрештою смарт-годинник буде діяти як система раннього виявлення людей, включно підлітків, які страждають від депресії та схильності до суїциду. Проект таких інформаційно-біомедичних інноваційних технологій Медичної школи Орегонського університету спрямовано на прискорення впровадження цієї технології для покращення здоров'я людей. Він передбачає переміщення в майбутньому інноваційної технології у клінічне застосування.

«Безпрецедентна кількість підлітків із схильністю до суїциду звертається до відділень невідкладної допомоги по всій країні», каже доктор медичних наук доцент кафедри невідкладної медицини Орегонського університету Девід Шерідан. Аналізуючи результати відповідних досліджень у США, Девід Шерідан стверджує, що треба діяти швидко. Він спирається на своє дослідження стосовно виявлення фізіологічних ознак суїцидальності, при створенні нової технології для смарт-годинників, що б могла в реальному часі визначати суїцидальний стан підлітка. Через величезний попит на психіатричні ліжка в США, а також у багатьох інших країнах

існує вкрай обмежена пропозиція для підлітків [18]. Відділення невідкладної психіатричної допомоги часто не мають можливості виділити ліжка для таких випадків.

Моніторинг стану пацієнтів у режимі реального часу за допомогою смарт-годинника може стати ефективним рішенням готових дистанційних рішень для охорони психічного здоров'я. Смарт-годинники, що вимірюють такі фізіологічні параметри, як кількість кроків, частоту серцевих скорочень, температуру тіла та інші, поширені в усьому світі. З іншого боку, щоб виявити ознаки суїцидальності, необхідно окремо вимірювати серцебиття та варіативність серцевого ритму (ВСР). Зазначимо, що ВСР – це змінення в часі (або варіативність) послідовних серцевих ударів, які вимірюються за відповідний проміжок часу. Цей параметр дає можливість відстежити роботу нервової системи людини. Новий розумний годинник вимірює частоту серцевих скорочень за допомогою оптичних методів і не потребує виміру стандартної ЕКГ з використанням спеціальних електродів. Пацієнти мають можливість використовувати такі смарт-годинники, що передають дані про фізіологічний стан у клінічні заклади. Клініцисти з оцінювання психічного здоров'я Медичної школи університету OHSU наразі досліджують підлітків із гострою суїцидальністю, щоб навчитися розшифровувати відповідні фізіологічні сигнали для прийняття рішення, спрямованого, у разі потреби, на невідкладну допомогу.

У разі можливості масштабування цей розумний годинник стане одним із перших для відстеження такого захворювання як суїцидальність.

Батькам або опікунам, як правило, важко визначити, чи є небезпечна фаза підлітковою тривоною, чи чимось більш серйозним, наприклад, депресією чи суїцидальністю. Національне опитування, проведене дитячою лікарнею Мотта (лікарня невідкладної педіатричної допомоги в Енн-Арбор, штат Мічиган, США) показало, що 40% батьків не вміють відрізнити перепади настрою від підліткової депресії [19]. Значною частиною цієї проблеми є те, що підлітки часто не визнають посилення суїцидальних симптомів для вжиття профілактичних заходів. У разі трагедії батьки та опікуни, як правило, відмічали, що не знали про психічний стан своєї дитини. Нова технологія дає можливість повернути контроль над станом підлітка в реальному часі. Варіативність частоти серцевих скорочень безпосередньо пов'язана з тією частиною нервової системи, що регулює здатність людини заспокоюватися (парасимпатична нервова система) або підвищувати адреналін, коли це необхідно (симпатична нервова система). Якщо розглядати з цілісної точки зору певні фізіологічні дані, такі як ВСР та реакція нервової системи, це може допомогти інженерам і медичним спеціалістам сформуванню певну основу для наукового аналізу причинно-наслідкових зв'язків. Доктор Шерідан виявив у своєму дослідженні кореляцію між ВСР і схильністю до суїциду у підлітків [20]. Це дослідження дає розуміння потенційних фізіологічних показників, що може бути використано для допомоги підліткам на ранньому етапі розвитку хвороби. Далі наведемо деякі висновки з цього дослідження.

Варіативність серцевого ритму характеризується такими ознаками:

- проміжок часу між ударами серця незначно коливається;
- варіації дуже малі, плюс-мінус частки секунди між ударами;
- флуктуації неможливо виявити, за винятком спеціальних пристроїв;
- ВСР може бути присутня у здорових людей і вказувати на наявність проблем зі здоров'ям, включаючи захворювання серця, тривогу та депресію.

Парасимпатична нервова система:

- перешкоджає перевтомі організму та повертає його до спокійного та врівноваженого стану;
- контролює уповільнення пульсу та артеріального тиску, особливо під час відпочинку.

Симпатична нервова система:

- готує тіло до боротьби або втечі під час будь-якої потенційної небезпеки;
- керує підвищенням частоти серцевих скорочень і артеріального тиску в екстремальних ситуаціях.

Дослідження доктора Шерідана виявило зворотний зв'язок між ВСР і суїцидальністю. У міру підвищення рівня суїцидальності сигнали парасимпатичної нервової системи зменшуються, знижуючи здатність людини заспокоїтися.

Зрештою, довготерміною метою проекту Медичної школи університету OHSU являється розроблення дистанційної системи моніторингу, що попереджатиме людину та членів її сім'ї про збільшення ознак суїцидальності та необхідність у прийнятті термінових запобіжних заходів. Поточні дослідження за проектом спрямовано на вимірювання цих фізіологічних сигналів і застосування вдосконаленої аналітики машинного навчання для оброблення сигналів і перетворення їх у клінічно значущу інформацію. У боротьбі за допомогу підліткам групи ризику з проблемами психічного здоров'я це лише початок. Передбачається, що у майбутньому розумний годинник надійде в медичну практику з метою допомоги пацієнтам у групах високого ризику, які потребують підтримки психічного здоров'я. В цю групу, крім підлітків, будуть включені ветерани армії з посттравматичним стресовим розладом, молоді матері з післяпологовою депресією тощо. Використовуючи такі розумні годинники пацієнти зможуть підсилити своє особисте відчуття ознак депресії та суїциду й отримати вчасну допомогу.

Технологія розумної лікарні у відділеннях інтенсивної терапії. На сьогодні інформаційні технології і штучний інтелект починають відігравати важливу роль у розширенні можливостей лікарів і медсестер. На наших очах створюються нові ефективні технології охорони здоров'я у сфері діагностики, неінвазивних оптичних методів, розумних лікарняних ліжок, носимих медичних сенсорів тощо, що дає змогу революціонізувати процеси лікування у відділеннях інтенсивної

терапії та створити розумніше, здоровіше та ефективніше майбутнє для охорони здоров'я людини у цілому.

Пацієнти у відділеннях інтенсивної терапії перебувають у найважчих станах і потребують ретельного догляду. Тому помилки у такому відділенні можуть мати важкі наслідки. На жаль, вони залишаються поширеними через ручний робочий процес, нестачу персоналу та велике навантаження на працівників охорони здоров'я у відділеннях інтенсивної терапії. Інформаційні технології надають можливість зменшити кількість помилок і покращити догляд за пацієнтами. Слід відмітити, що сучасні інформаційні технології допомагають запровадити передові інтелектуальні лікарняні технології у відділеннях інтенсивної терапії. Незалежно від того, чи це просто оптимізація розкладів для покращення робочих процесів, чи автоматизація безпосереднього догляду за пацієнтами, на сьогодні цифрові технології уже продемонстрували свій потенціал для підвищення ефективності лікування, зменшення кількості помилок і покращення позитивних результатів для пацієнтів.

Епідемія помилок у відділеннях інтенсивної терапії. Несприятливі наслідки для пацієнтів можуть початися з дрібних помилок: неправильні діагнози, пропущені кроки в процедурах або лікуванні, помилки в лікуванні, нездатність розпочати або припинити лікування в належний час або просто неправильне спілкування лікаря з пацієнтом [21]. У роботі [21] показано, що навіть у країнах з високим рівнем доходу один із 10 пацієнтів зазнавав негативного впливу під час лікування. Дослідження показало, що 15 % витрат у лікарні пов'язані з помилками в догляді або зараженням пацієнтів під час перебування в лікарні [21], 10 % пацієнтів відчувають побічні ефекти під час лікування, навіть у країнах із високим рівнем доходу [21]. Медикаментозні помилки становлять 78 % серйозних медичних помилок у відділенні інтенсивної терапії; 7 % смертей у відділенні інтенсивної терапії потенційно можна уникнути [22]. Розумні медичні технології можуть допомогти лікарям і медсестрам уникати таких помилок. Будь-який процес, що можна повністю або частково цифровізувати, надає можливість медичному персоналу приділяти вивільнений додатковий час для безпосереднього догляду за пацієнтами.

Корінь помилок у відділеннях інтенсивної терапії. У сфері охорони здоров'я лікарські засоби мають лікувати першопричину хвороби, а не лише боротися із симптомами. Те саме можна сказати про вирішення проблем у відділенні інтенсивної терапії: лікування слід починати з розуміння того, де і чому виникають помилки у відділенні інтенсивної терапії. Лише тоді цифрова трансформація зможе мати найбільший вплив на зменшення чи усунення помилок. Наразі 70 % викликів медичної сестри у лікарні мають неклінічний характер, наприклад, від пацієнта, який не може знайти пульт для телевізора тощо.

Застарілі робочі процеси. Багато лікарень все ще використовують ручні процеси, що можуть спричинити помилки та вплинути на ефективність лікування. Медичні працівники можуть витратити від однієї до двох годин наприкінці кожної зміни, просто готуючи документи для передавання їх до наступної зміни [23]. Навіть заклади, що впровадили такі технології, як електронні медичні записи, часто можуть мати проблеми з сумісністю.

Кадрові проблеми. Величезне робоче навантаження, зростаюча нестача робочої сили та часті перерви створюють сприятливий ґрунт для помилок у медичному середовищі. Медичних сестер можуть переривати до 10 разів на годину, часто для немедичних викликів до ліжка пацієнта. Не дивно, що виснаження працівників призводить до того, що приблизно одна третина медсестер звільняється протягом перших трьох років роботи, особливо у відділенні інтенсивної терапії [23]. Всесвітня організація охорони здоров'я передбачає, що до 2030 року в усьому світі не вистачатиме 10 мільйонів медичних працівників [24].

Підвищена складність догляду. Пацієнти у відділенні інтенсивної терапії можуть одужувати після складних захворювань або травм, включаючи поліорганну недостатність. Інші можуть мати такі ускладнення, як хронічні захворювання або, просто, старіння організму. Навіть середньостатистичний пацієнт тепер генерує експоненціально більше даних, ніж будь-коли раніше [25]. Розумні медичні технології можуть допомогти медичним працівникам збирати, управляти, аналізувати та ділитися даними про пацієнтів із потрібними спеціалістами в потрібний момент часу.

Технологія розумної лікарні для інтенсивної терапії. Уявіть собі інтелектуальні медичні технології, що автоматизують безпосередньо догляд за пацієнтами і не потребують утручання лікаря, наприклад, введення або оновлення лікарських препаратів на основі збору даних у реальному часі. Автоматизована та адаптивна механічна вентиляція є однією з таких терапевтичних технологій замкнутого циклу, що використовують уже сьогодні [26]. Використовуючи передові технології моніторингу разом із штучним інтелектом, медичні технології можуть сприяти розумнішому, швидшому прийняттю рішень і точнішій діагностиці у випадках, де секунди чи хвилини часто мають значення. Далі стисло надамо інформацію про кілька інтелектуальних лікарняних технологій, що допоможуть здійснити цю трансформацію.

Моніторинг у реальному часі. Цілісне уявлення про стан пацієнта в режимі реального часу сприяє ранньому виявленню істотних змін, а неінвазивний моніторинг може зменшити дискомфорт пацієнта на цьому шляху. Приклади включають безконтактні мініатюрні датчики руху (MEMS-сенсори) для аналізу рухливості та сну; мікроелектронні сенсори для оцінювання стану шкіри, що допомагають ідентифікувати пролежні, які часто зустрічаються у відділеннях інтенсивної терапії [27].

Штучний інтелект суттєво розширює можливості носимих медичних сенсорів, покращуючи ефективність системи раннього попередження за допомогою постійного аналізу даних. Можливості штучного інтелекту до розпізнавання образів роблять його потужним інструментом для прийняття клінічних рішень і діагностичної підтримки, а також для розвитку нових тенденцій у сфері охорони здоров'я.

Системи точного руху відкривають можливості для автоматизації та оптимізації процесів безпосереднього догляду. Автоматизуючи повторювані рутинні процеси, медичні працівники можуть зосередитися на наданні розширеного високоякісного догляду за пацієнтами.

Платформа системних рішень – безпечно передавання даних життєво важливих показників у режимі реального часу між пристроями – може надати лікарям інформацію, необхідну для надання належної допомоги в потрібний момент часу. Для найкращої допомоги лікарні повинні максимізувати

системну інтеграцію та взаємодію комп'ютерних приладів і засобів у межах відділення, а в ідеалі, в межах усієї лікарні.

Безпечні автентифікатори. Кібератака може поставити під загрозу як дані пацієнтів, так і пристрої безпосереднього догляду, такі як апарати штучної вентиляції легень і медикаментозні насоси, піддаючи ризику життя пацієнтів [28]. Надійна кібербезпека потрібна як на рівні системи/мережі, так і на рівні периферійних засобів. Такі рішення, як мітки радіочастотної ідентифікації і сканери, також можуть допомогти ідентифікувати контрафактні лікарські засоби для забезпечення безпеки ліків [29].

Цифровізація процесів у відділеннях інтенсивної терапії та гуманізація догляду. Основна мета – зробити охорону здоров'я більш гуманною та ефективнішою. Уявіть собі світ, де лікарі можуть реагувати на погіршення стану пацієнта ще до того, як у нього з'являться явні ознаки погіршення. Уявіть собі прогностичну допомогу, що дає можливість знизити вартість на лікування хронічних захворювань. Інформаційні технології можуть дозволити лікарям максимізувати час взаємодії з пацієнтом і мінімізувати помилки для підтримки позитивних результатів у лікуванні важко хворих пацієнтів.

Висновки. 1. Визначення, оцінювання та управління персональним здоров'ям слід розцінювати сьогодні як найважливіші соціальні проблеми, що потребують невідкладного рішення.

2. Запропоновано нову концепцію визначення та оцінювання індивідуального і популяційного здоров'я, в основу якої покладено стаціонарність, а також дисперсійні характеристики критеріїв стану організму при неекстремальних впливах навколишнього середовища.

3. Оціночний алгоритм дозволяє: використовувати різномірну інформацію про діапазони можливого варіювання значень вагових коефіцієнтів; використовувати нечислову інформацію про порівняльну вагомість окремих показників.

4. Існуючі системи моніторингу, на жаль, не здійснюють визначення трендів показників, що не дає можливості забезпечити ефективне управління загальним станом організму.

5. Орієнтовна мінімальна кількість ознак/показників організму людини для оцінювання

його стану визначається ступенем відхилення функціонального стану організму в конкретний час дослідження від базового стану. При сталому стані організму та незначному відхиленні достатньо декількох показників (зазвичай не більше 2-3). Для своєчасного виявлення відхилень від «норми» необхідно забезпечити постійний моніторинг показників функціонального стану організму людини.

Література.

1. Словник-довідник з екології / Лановенко О. Г., Остапішина О. О. – Херсон: ПП Вишемирський В. С., 2013. – С. 54.
2. Alternative stable states and regime shifts in ecosystems. *The Princeton guide to ecology* / Scheffer M. // Princeton, NJ: Princeton university press. 809, 2009. – P. 395–406.
3. Modeling stability and resilience after slashburning across a sub-boreal to subalpine forest gradient in British Columbia / Hamilton E., Haeussler S. // *Canadian J Forest Res.* – 2008. – № 38. – P. 304–316.
4. Balls, cups, and quasi-potentials: quantifying stability in stochastic systems / Nolting B. C., Abbott K. C. // *Ecology ESA.* – 2016. – Vol. 97, is. 4. – P. 850–864.
5. Stable States of Biological Organisms / Yukalov V. I., Sornette D., Yukalova E. P. et al. // *Concepts Phys.* – 2009. – № 6. – P. 179–194.
6. Стратегічні основи дистанційного оцінювання стану пацієнтів у мобільній медицині. Інформативність, точність, надійність / Шевченко Я. О. // *Медична інформатика та інженерія.* – 2019. – № 4 (48). – P. 83–85.
7. Need Clinical-Grade PPG from Your Wearable? Sometimes It Pays NOT to Shine a Light on a Problem / Burt A. – 2022. – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/need-clinical-grade-ppg-from-your-wearable.html>.
8. Pinpoint Science Announces Collaboration with Analog Devices to Advance Novel Nanosensors for Pathogen Detection. – 2020. – Режим доступу: <https://www.prnewswire.com/news-releases/pinpoint-science-announces-collaboration-with-analog-devices-to-advance-novel-nanosensors-for-pathogen-detection-301010250.html>.
9. How Secure Electronic Authentication Mitigates Risk at the Point-of-Care / Liu C., Cleary A., Panaro K. // *Analog Dialogue.* – 2023. – Vol. 57. – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/how-secure-electronic-authentication-mitigates-risk-at-the-point-of-care.html#:~:text=By%20adopting%20an%20electronic%20authenticator,authentic%20and%20can%20be%20trusted.>
10. High Performance Data Converters for Medical Imaging Systems / Patyuchenko A. // *Analog Dialogue.* – 2019. – Vol. 53. – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/high-performance-data-converters-for-medical-imaging-systems.html>.
11. Кластеризація функціональних станів організму. Пілотне дослідження / Мінцер О. П., Карленко В. П., Шевченко Ю. О., Суханова О. О. // *Медична інформатика та інженерія.* – 2021. – № 2. – С. 4–13.
12. CarePredict. Senior Living. – Режим доступу: <https://www.carepredict.com/senior-living/>.
13. How Advances in Sensor and Digital Technology Yield Better Patient Care / Olivadoti G. – 2021. – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/signals/thought-leadership/how-advances-in-sensor-and-digital-tech-yield-better-patient-care.html#:~:text=Innovations%20in%20sensors%20now%20enable,quicker%20results%20for%20faster%20diagnosis.>
14. Meiqi: Thinking Smaller to Manage Diabetes with Continuous Glucose Monitoring Devices (CGM). – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/signals/articles/improving-quality-of-life-for-diabetics-with-cgm.html>.
15. CDC: Leading causes of death by age group United States. – 2021. – Режим доступу: <https://www.cdc.gov/>.
16. State Suicide Rates Among Adolescents and Young Adults Aged 10-24: United States, 2000-2018 / Curtin S. C. // *Natl Vital Stat Rep.* – 2020. – № 69 (11). – P. 1–10.

17. Suicidal Ideation and Behaviors Among High School Students – Youth Risk Behavior Survey, United States, 2019 / Ivey-Stephenson A. Z., Demissie Z., Crosby A. E., Stone D. M. et al. // *MMWR Suppl.* – 2020. – № 69 (1). – P. 47–55.

18. Youth emergency department visits for mental health increased during pandemic. – 2023. – Режим доступу: <https://www.nimh.nih.gov/news/science-updates/2023/youth-emergency-department-visits-for-mental-health-increased-during-pandemic>.

19. Teen Angst: A Phase or Mental Health Concern? – 2022. – Режим доступу: <https://www.newportacademy.com/resources/mental-health/teenage-angst-or-mental-health-concern/>.

20. Heart Rate Variability and Its Ability to Detect Worsening Suicidality in Adolescents: A Pilot Trial of Wearable Technology / Sheridan D. C., Baker S., Dehart R., Lin A. et al. // *Psychiatry Investig.* – 2021. – № 18 (10). – P. 928–935.

21. Transforming acute care through digitization. – Philips, 2021. – Режим доступу: https://www.philips.com/c-dam/b2bhc/it/landing/alarm-fatigue/Acute_Care_digitization_White_Paper.pdf.

22. Rapid Mortality Review in the Intensive Care Unit: An In-Person, Multidisciplinary Improvement Initiative / Schwab K. E., Simon W., Yamamoto M., Dermenchyan A. et al. // *Am J Crit Care.* – 2021. – № 30 (2). – P. e32–e38.

References.

1. Lanovenko, O. G., Ostapishyna, O. O. (2013). *Slovník-dovідnyk z ekolohiyi [Ecology dictionary-reference book]*. Kherson: PP Vyshemyrskyi, V. S. [In Ukrainian].

2. Scheffer, M. (2009). Alternative stable states and regime shifts in ecosystems. *The Princeton guide to ecology*. Princeton, NJ: Princeton university press.

3. Hamilton, E., Haeussler, S. (2008). Modeling stability and resilience after slashburning across a sub-boreal to subalpine forest gradient in British Columbia. *Canadian J Forest Res*, 38, 304–316.

4. Nolting, B. C., Abbott, K. C. (2016). Balls, cups, and quasi-potentials: quantifying stability in stochastic systems. *Ecology ESA*, 97 (4), 850–864.

5. Yukalov, V. I., Sornette, D., Yukalova, E. P. et al. (2009). Stable States of Biological Organisms. *Concepts Phys*, 6, 179–194.

23. Honeywell’s Robert Robinson on healthcare digitalization / H. S. Adams // *Healthcare Digital.* – 2023. – Режим доступу: <https://healthcare-digital.com/hospitals/honeywells-robert-robinson-on-healthcare-digitalisation>.

24. Health workforce. – World Health Organization. – 2023. – Режим доступу: https://www.who.int/health-topics/health-workforce#tab=tab_1.

25. Health Data Volumes Skyrocket, Legacy Data Archives On the Rise / Harmony Healthcare IT. – 2024. – Режим доступу: <https://www.harmonyhit.com/health-data-volumes-skyrocket-legacy-data-archives-rise-hie/>.

26. The dawn of physiological closed-loop ventilation — a review / Platen P. V., Pomprapa A., Lachmann B., Leonhardt S. // *Crit Care.* – 2020. – № 24 (1). – P. 121.

27. Effectiveness of interventions to prevent pressure injury in adults admitted to intensive care settings: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials / Lovegrove J., Fulbrook P., Miles S., Steele M. // *Crit Care.* – 2022. – № 35 (2). – P. 186–203.

28. The elephant in the room: cybersecurity in healthcare / Cartwright A. J. // *J Clin Monit Comput.* – 2023. – № 37 (5). – P. 1123–1132.

29. Critical Success Factors and Traceability Technologies for Establishing a Safe Pharmaceutical Supply Chain / Haji M., Kerbache L., Sheriff K. M. M., Al-Ansari T. // *Methods Protoc.* – 2021. – № 4 (4). – P. 85.

6. Shevchenko, Ya. O. (2019). Stratehichni osnovy dystantsiynoho otsinyuvannya stanu patsiyentiv u mobil'niy medytsyni. [Strategic basis of the remote evaluation of patients in mobile medicine. information, accuracy, reliability]. *Medychna informatyka ta inzheneriia (Medical informatics and engineering)*, 4 (48), 83–85. [In Ukrainian].

7. Burt, A. (2022). *Need Clinical-Grade PPG from Your Wearable? Sometimes It Pays NOT to Shine a Light on a Problem*. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/need-clinical-grade-ppg-from-your-wearable.html>.

8. (2020). *Pinpoint Science Announces Collaboration with Analog Devices to Advance Novel Nanosensors for Pathogen Detection*. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/pinpoint-science-announces-collaboration-with-analog-devices-to-advance-novel-nanosensors-for-pathogen-detection-301010250.html>.

9. Liu, C., Cleary, A., Panaro, K. (2023). How Secure Electronic Authentication Mitigates Risk at the Point-of-Care. *Analog Dialogue*, 57. URL: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/how-secure-electronic-authentication-mitigates-risk-at-the-point-of-care.html#:~:text=By%20adopting%20an%20electronic%20authenticator,authentic%20and%20can%20be%20trusted.>
10. Patyuchenko, A. (2019). High Performance Data Converters for Medical Imaging Systems. *Analog Dialogue*, 53. URL: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/high-performance-data-converters-for-medical-imaging-systems.html>.
11. Mintser, O. P., Karlenko, V. P., Shevchenko, Ya. O., Sukhanova, O. O. (2021). Klasteryzatsiya funktsional'nykh staniv orhanizmu. Pilotne doslidzhennya [Clusterization of functional states of the organism. Pilot study]. *Medychna informatyka ta inzheneriia (Medical informatics and engineering)*, 2, 4–13. [In Ukrainian].
12. CarePredict. Senior Living. URL: <https://www.carepredict.com/senior-living/>.
13. Olivadoti, G. (2021). *How Advances in Sensor and Digital Technology Yield Better Patient Care*. URL: <https://www.analog.com/en/signals/thought-leadership/how-advances-in-sensor-and-digital-tech-yield-better-patient-care.html#:~:text=Innovations%20in%20sensors%20now%20enable,quicker%20results%20for%20faster%20diagnosis.>
14. Meiqi. *Thinking Smaller to Manage Diabetes with Continuous Glucose Monitoring Devices (CGM)*. URL: <https://www.analog.com/en/signals/articles/improving-quality-of-life-for-diabetics-with-cgm.html>.
15. (2021). CDC: Leading causes of death by age group United States. URL: <https://www.cdc.gov/>.
16. Curtin, S. C. (2020). State Suicide Rates Among Adolescents and Young Adults Aged 10-24: United States, 2000-2018. *Natl Vital Stat Rep*, 69 (11), 1–10.
17. Ivey-Stephenson, A. Z., Demissie, Z., Crosby, A. E., Stone, D. M. et al. (2020). Suicidal Ideation and Behaviors Among High School Students – Youth Risk Behavior Survey, United States, 2019. *MMWR Suppl*, 69 (1), 47–55.
18. Youth emergency department visits for mental health increased during pandemic. URL: <https://www.nimh.nih.gov/news/science-updates/2023/youth-emergency-department-visits-for-mental-health-increased-during-pandemic>.
19. (2022). Teen Angst: A Phase or Mental Health Concern? URL: <https://www.newportacademy.com/resources/mental-health/teenage-angst-or-mental-health-concern/>.
20. Sheridan, D. C., Baker, S., Dehart, R., Lin A. et al. (2021). Heart Rate Variability and Its Ability to Detect Worsening Suicidality in Adolescents: A Pilot Trial of Wearable Technology. *Psychiatry Investig*, 18 (10), 928–935.
21. Transforming acute care through digitization. Philips, 2021. URL: https://www.philips.com/c-dam/b2bhc/it/landing/alarm-fatigue/Acute_Care_digitization_White_Paper.pdf.
22. Schwab, K. E., Simon, W., Yamamoto, M., Dermenchyan, A. et al. (2021). Rapid Mortality Review in the Intensive Care Unit: An In-Person, Multidisciplinary Improvement Initiative. *Am J Crit Care*, 30 (2), e32–e38.
23. Adams, H. S. (2023). Honeywell's Robert Robinson on healthcare digitalization. Healthcare Digital. URL: <https://healthcare-digital.com/hospitals/honeywells-robert-robinson-on-healthcare-digitalisation>.
24. Health workforce. World Health Organization, 2023. URL: https://www.who.int/health-topics/health-workforce#tab=tab_1.
25. Health Data Volumes Skyrocket, Legacy Data Archives On the Rise. Harmony Healthcare IT, 2024. URL: <https://www.harmonyhit.com/health-data-volumes-skyrocket-legacy-data-archives-rise-hie/>.
26. Platen, P. V., Pomprapa, A., Lachmann, B., Leonhardt, S. (2020). The dawn of physiological closed-loop ventilation — a review. *Crit Care*, 24 (1), 121.
27. Lovegrove, J., Fulbrook, P., Miles, S., Steele, M. (2022). Effectiveness of interventions to prevent pressure injury in adults admitted to intensive care settings: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Crit Care*, 35 (2), 186–203.
28. Cartwright, A. J. (2023). The elephant in the room: cybersecurity in healthcare. *J Clin Monit Comput*, 37 (5), 1123–1132.

29. Haji, M., Kerbache, L., Sheriff, K. M. M., Al-Ansari, T. (2021). Critical Success Factors and Traceability Technologies for Establishing a Safe Pharmaceutical Supply Chain. *Methods Protoc*, 4 (4), 85.

ORCID:

Ozar P. Mintser: 0000-0002-7224-4886.

Volodymyr O. Romanov: 0000-0001-6277-8756

Igor B. Galelyuka: 0000-0003-1504-4439

Larysa Yu. Babintseva: 0000-0003-2753-5489

Stanislav I. Mokhnachov: 0000-0002-3480-9188

Olga O. Sukhanova: 0000-0003-1882-027X