

В.О. РОМАНОВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *vromanov@i.ua*.

І.Б. ГАЛЕЛЮКА

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *galelyuka@gmail.com*.

В.М. ГРУША

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *vhrusha@gmail.com*.

О.В. ВОРОНЕНКО

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *alexander.voronenko@dc.kiev.ua*.

О.В. КОВИРЬОВА

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *kovyrova.oleksandra@gmail.com*.

Г.В. АНТОНОВА

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *antanna78@gmail.com*.

А.В. КЕДИЧ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *annet.kedich@ukr.net*.

БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА, ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Анотація. Наведено результати розроблення та створення бездротових сенсорних мереж для сільськогосподарства та медицини, отримані колективом авторів протягом останніх п'яти років. Розглянуто сенсорні мережі для оцінювання стану рослин методом індукції флуоресценції хлорофілу на великих площах сільськогосподарських угідь. Мережі мають у своєму складі оригінальні розумні сенсори, побудовані за гнучкою архітектурою, які містять елементи штучного інтелекту на базі нейронних мереж. Це підвищує їхню ефективність під час визначення дії стресових чинників різного походження. На основі бездротової сенсорної мережі побудовано розумну систему дистанційного медичного моніторингу, яка використовує кілька протоколів бездротового обміну даними. Для оцінювання якості життя і спектра симптомів, пов'язаних із захворюванням і/або лікуванням, створено діагностичну систему, яка визначає стан хворого за допомогою міжнародних та національних опитувальників. В основу роботи запропонованих розумних вимірювальних пристроїв та систем покладено базовані на знаннях принципи оброблення та аналізу даних вимірювання для вироблення управлінських рішень та рекомендацій. Більшість отриманих результатів доведено до серійного виробництва.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, система збору даних, інформаційно-комунікаційна технологія, цифрове сільське господарство, оцінювання якості життя.

ВСТУП

Швидкий розвиток інформаційних технологій та мікроелектроніки зумовив появу інноваційної технології інтернету речей та впровадження у всі галузі людської діяльності сучасних пристроїв бездротового передавання даних та сенсорних засобів для вимірювання параметрів об'єктів різної природи. Завдяки розробці теорії та прикладних аспектів технології промислового інтернету речей з'явилися концепції розумного міста, розумної фабрики, розумного будинку, розумних апартаментів та розумних систем предикторної медичної діагностики. Наприклад, нові розумні системи екологічного моніторингу не тільки слідкують за станом біологічних об'єктів у живій природі, але і вчасно попереджають про потенційні загрози та дають рекомендації щодо усунення негативних впливів.

© В.О. Романов, І.Б. Галелюка, В.М. Груша, О.В. Вороненко, О.В. Ковирьова,
Г.В. Антонова, А.В. Кедич, 2023

Розумні монітори медичної діагностики орієнтовано не лише на якісне оцінювання стану здоров'я людини та повноцінне лікування, але й на профілактику та запобігання захворюванням. Цей перелік охоплює також багато інших нових інтелектуальних об'єктів у різних галузях промисловості та людської діяльності. Поширення цих технологій на прецизійне землеробство, захист довкілля та охорону здоров'я дає змогу створювати розумні поля, сади, теплиці, лісові та паркові масиви, побутові монітори здоров'я. В основі названих технологій лежать, як правило, розумні сенсори та бездротові сенсорні мережі (БСМ).

Нині є багато дослідницьких проєктів та готових рішень, орієнтованих на застосування бездротових технологій, розумних систем та технології інтернету речей у сільському господарстві, екологічному моніторингу та захисті довкілля. В [1] наведено приклад розробки бездротових сенсорів, базованих на технології інтернету речей. Вони дають змогу фермеру вимірювати в реальному часі параметри довкілля, ґрунту та електроспоживання в теплиці, а також допомагають ухвалювати оптимальні рішення. Деякий огляд прикладних рішень для різних застосувань розумних систем та бездротових технологій у сільському господарстві наведено у [2]. Тут автори чітко розділили системи за такими сферами застосування, як моніторинг різноманітних параметрів в теплицях та на відкритих полях, моніторинг захворювань і збудників, контроль застосування пестицидів та гербіцидів, моніторинг параметрів ґрунтів, системи у тваринництві тощо. Опис практичного застосування бездротових сенсорних мереж та бездротових технологій для медичного моніторингу наведено у [3]. У роботі [4] розглянуто приклади застосування елементів штучного інтелекту в медичних системах моніторингу, базованих на технології інтернету речей та бездротових технологіях. Обширний огляд розумних натільних систем для моніторингу стану здоров'я представлено у [5, 6]. Зокрема в [5] зосереджено увагу не тільки на нюансах застосування натільних медичних систем моніторингу в медицині, діагностиці та терапії, але і на сучасних матеріалах та принципах створення вимірювальних вузлів для моніторингу стану пацієнта.

Протягом останніх п'яти років колективом авторів в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України розроблено та доведено до впровадження відповідні системи збору даних та інтелектуальні засоби, а саме бездротові розумні сенсори та бездротові сенсорні мережі, призначені для різних прикладних застосувань.

ОПИС СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ

Як вимірювальні вузли у запропонованих системах збору даних використано розроблені оригінальні розумні сенсори з вбудованим мікроконтролером, модулем бездротового передавання даних та можливістю підключення різних наборів сенсорів. Запропоновані вузли із відповідними наборами сенсорів можуть слугувати органами чуття систем збору даних різного призначення, зокрема для цифрового і точного землеробства, екологічного моніторингу і захисту довкілля, медицини, контролю якості напоїв, продуктів харчування і біологічних речовин, а також багатьох інших прикладних застосувань. Розроблене методичне і програмне забезпечення цих розумних сенсорів вже зараз дає можливість оцінити у реальному часі стан різних біологічних об'єктів, наприклад, рослин під впливом різних стресових чинників або якість вина у процесі виробництва. Монітори здоров'я, побудовані на основі запропонованих систем та розумних сенсорів, вже сьогодні дають змогу створити надійну систему підтримки хронічних хворих, підвищити швидкість і безпечність реабілітаційного періоду, здійснювати моніторинг параметрів

людини в лікарні або за її межами, а також допомагають лікарю поставити діагноз. Проте для інтелектуалізації процесу моніторингу та вироблення управлінських рішень у зазначених прикладних галузях доцільно використовувати багаторівневі розумні системи моніторингу, які б не лише слідкували та оцінювали в експресному режимі вплив різних чинників на стан об'єкта моніторингу, але й завдяки вбудованим алгоритмам та елементам штучного інтелекту напрацьовували відповідні управлінські рішення, спрямовані на компенсацію негативної дії цих чинників.

Ідея розроблення теоретичних засад бездротових розумних систем різного призначення має у своїй основі створену авторами нову інформаційну технологію для оцінювання в експресному режимі стану рослин на великих територіях сільськогосподарських угідь, лісопаркових масивів, промислових садів, національних заповідників тощо. Однак, подальший розвиток розумних систем та їхнього впровадження у різні галузі людської діяльності потребує вдосконалення теорії таких систем, які б містили не тільки мережеві засоби збору даних, але й охоплювали такі системні компоненти, як банки знань з розв'язувачами задач, багаторівневі сенсорні мережі, системи підтримки прийняття рішень, відповідний математичний апарат, інфраструктуру функціонування цих систем, а також методичне та програмне забезпечення.

СТРУКТУРА БАНКУ ЗНАНЬ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Оцінювання стану рослин у режимі реального часу, особливо у галузі сільськогосподарства або екологічного моніторингу, має досить велике значення для вироблення своєчасного та оптимального агротехнічного управлінського рішення. Нині у світі для діагностики стану рослин у лабораторних та польових умовах застосовують різні методи та засоби. Одним із перспективних рішень сьогодні є використання методу індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) для експрес-діагностики стану рослин [7]. Для отримання інформації про стан рослин в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України на основі методу ІФХ розроблено багаторівневу систему на базі бездротової сенсорної мережі для збору та оброблення даних про стан рослин з великих площ сільськогосподарських угідь або лісопаркових зон [8]. Для оцінювання стану рослин за сукупністю отриманих із сенсорів даних та надання відповідних рекомендацій аграріям необхідно мати систему підтримки прийняття рішень, що ґрунтується на базах знань. Цей підхід передбачає розроблення нових методів, алгоритмів та елементів штучного інтелекту, придатних для реалізації у вигляді прикладного програмного забезпечення, для оброблення та аналізу отриманих даних вимірювання. Архітектуру запропонованого банку знань для експрес-діагностики стану сільськогосподарських культур наведено на рис. 1.

Банк знань має у своєму складі інформаційні та програмні компоненти. Інформаційні компоненти містять онтологію спостережень, онтологію проведення вимірювань та онтологію прецедентів. Крім цього, інформаційні компоненти для кожного сорту рослин містять базу даних, яка складається з бази вимірювань та бази прецедентів. Як засіб реалізації банку знань вибрано хмарні інструменти, які підтримують технології створення, супроводу, накопичення, спільного розвитку інформаційних та програмних компонентів цієї системи, ґрунтованих на знаннях, а також їхнє використання у віддаленому режимі.

Програмні компоненти банку знань містять редактор для керування та налаштування інформаційних компонентів експертом предметної області, аналізатор даних вимірювання для внесення оперативних змін у дані оператором системи та власне систему підтримки прийняття рішення для допомоги у виробленні рішення та надання рекомендацій агроному.

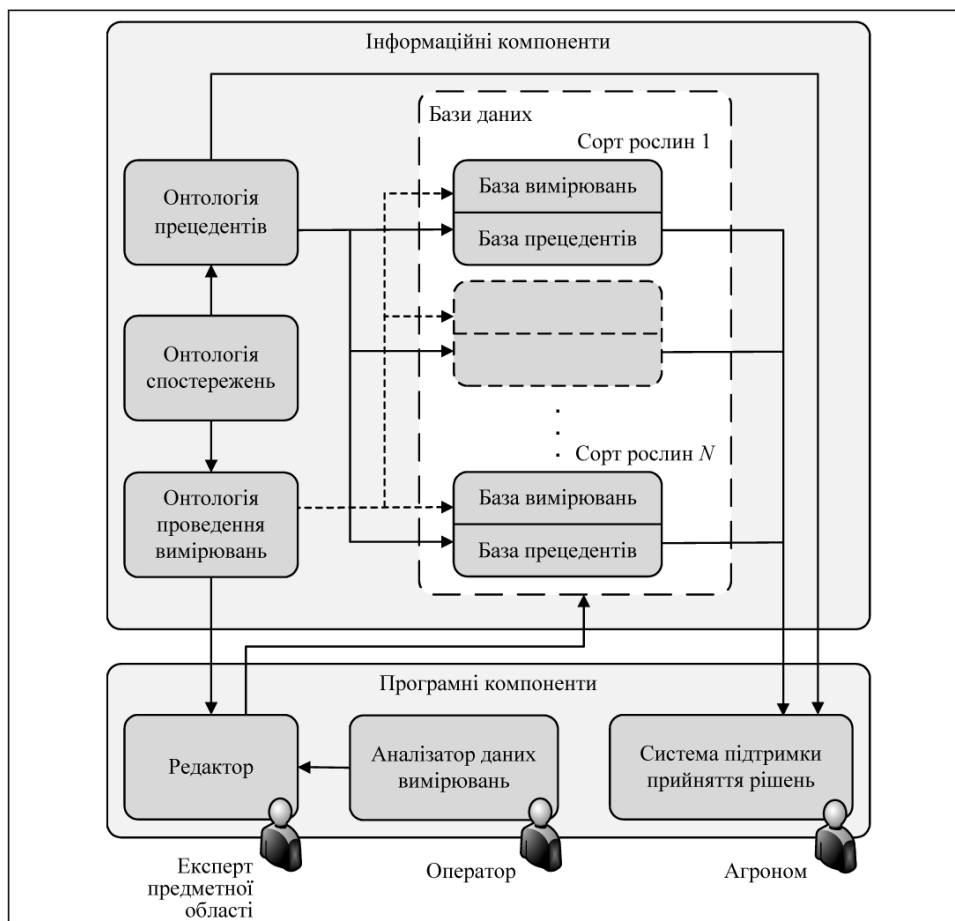


Рис. 1. Архітектура банку знань для експрес-діагностики сільськогосподарських культур

Взаємодія інформаційних та програмних компонентів системи дає можливість у реальному часі виробляти рішення, базовані на знаннях та здійснених вимірюваннях.

СТРУКТУРА БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Типова багаторівнева розумна система для оцінювання стану біологічних об'єктів різної природи для різних прикладних галузей зазвичай складається з кількох основних рівнів. Перший рівень має у своєму складі системи збору даних різного типу та масштабу, які переважно є бездротовими сенсорними мережами або розумними сенсорами з модулями бездротового передавання даних. До наступного рівня відносять серверне, зокрема розподілене, обладнання з прикладними програмними засобами, призначеними для зберігання та попереднього оброблення наборів даних для більш зручного їхнього передавання або відображення. Як правило, цей рівень також містить елементи інфраструктури для гарантування безперебійного функціонування цілої системи. У більшості випадків цей рівень реалізують через хмарні або туманні технології [9, 10]. Найвищий рівень системи об'єднує користувачів, які отримують необхідну інформацію або здійснюють налаштування розумної системи, використовуючи смартфон або планшетний комп'ютер.

У загальному випадку БСМ містить бездротові вузли кількох типів, зокрема координатор мережі, вимірювальні вузли, повторювачі сигналу або координатори кластерів мережі, вузли спряження мережі з ПК або системами вищого рівня.



Рис. 2. Структура типового модуля бездротової мережі

Базовим вузлом запропонованої БСМ є бездротовий вимірювальний вузол, основним призначенням якого є проведення вимірювань, попереднє оброблення та зберігання отриманих даних. Типовий вузол БСМ повинен мати вбудований мікроконтролер, інтерфейси бездротового та дротового каналу, а також інтерфейс додаткових модулів. Виконання тих чи інших функцій вузлом мережі може потребувати інтегрування в нього додаткових вузлів, модулів чи інтерфейсів. Наприклад, оснащення вимірювального вузла додатковим обсягом пам'яті дає можливість агрегувати дані вимірювань від сусідніх вузлів та готувати їх для передавання на вищий рівень або за потреби перетворити такий вимірювальний вузол у координатор вимірювального кластера мережі. Структуру типового модуля БСМ наведено на рис. 2.

Координатор мережі передбачає підключення інтерфейсу бездротового каналу та інтерфейсу додаткових модулів, зокрема дисплею, пам'яті та додаткових елементів керування. Координатор мережі також може потребувати підключення інтерфейсу дротового каналу для під'єднання мережі до ПК або системи вищого рівня. Вузол спряження мережі передбачає підключення інтерфейсів дротового і бездротового каналів для під'єднання всієї мережі до окремого ПК, мережі типу Ethernet або Internet, а далі до хмарного або туманного середовища. У цьому разі вузол спряження відіграє роль транзитного вузла для передавання даних вимірювання за межі БСМ, зокрема через бездротові канали передавання даних дальнього радіусу дії.

Запропоновані елементи мережі дають користувачу змогу будувати декілька типових топологій мережі за принципом пікомережі. Водночас топологія цих мереж може бути як простою («точка-точка» або «зірка»), так і складною деревоподібною. Для деяких прикладних задач координатор мережі можна замінити смартфоном або планшетним комп'ютером зі спеціальним прикладним програмним забезпеченням, яке повністю реалізує функції координатора мережі.

РОЗУМНІ СИСТЕМИ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Слід зазначити, що підсистеми збору даних відіграють ключову роль у будь-якій розумній системі, в основі якої лежать дані й у якій рішення приймають на основі оброблення та аналізу зібраних даних. До таких систем можна віднести системи моніторингу як у цифровому землеробстві, так і у захисті довкілля та охороні здоров'я [8]. Елементами розробленої розумної системи для цифрового землеробства або екологічного моніторингу є БСМ. Площа покриття такої мережі може становити від кількох квадратних метрів до

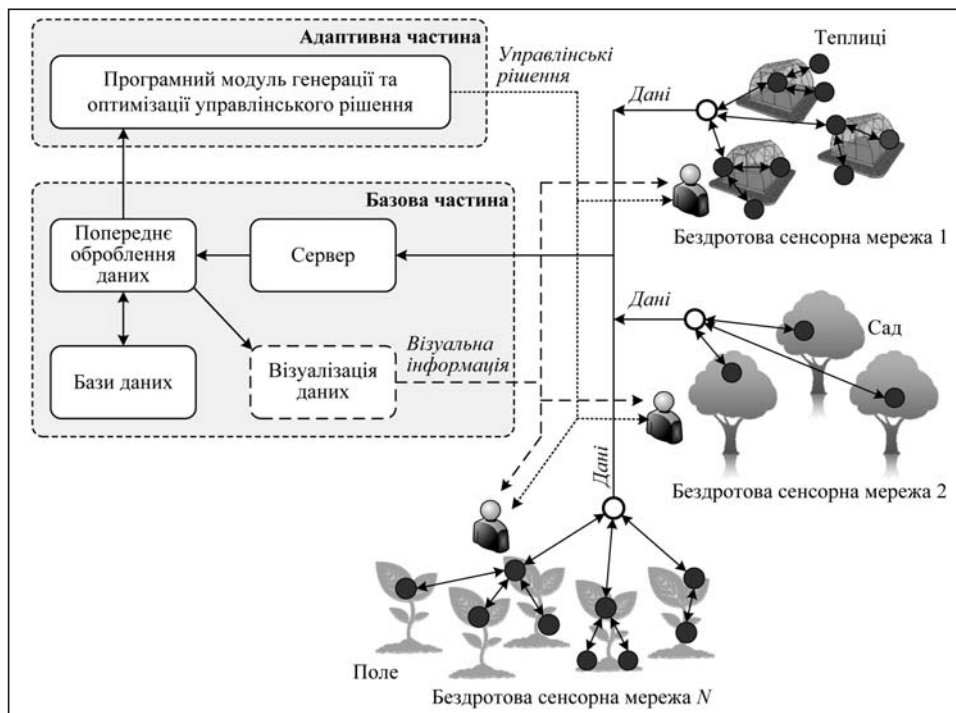


Рис. 3. Структура розумної системи збору даних для сільського господарства або екологічного моніторингу

кількох квадратних кілометрів залежно від кількості бездротових вимірювальних вузлів та за рахунок здатності ретранслювати дані від одного бездротового вузла до іншого. Основною перевагою цієї БСМ є здатність оцінювати у реальному часі стан сільськогосподарських рослин або параметрів довкілля на великих територіях. Структуру запропонованої розумної системи збору даних для сільського господарства або екологічного моніторингу наведено на рис. 3.

Збирання даних про стан досліджуваних об'єктів здійснюють за допомогою бездротових вимірювальних вузлів, які об'єднано у БСМ. Водночас певну територію може охоплювати як окрема мережа, так і кластер мережі. Бездротові вимірювальні вузли у такій системі можуть бути двох типів. Вузли першого типу призначено для вимірювання стану живих рослин через вимірювання параметрів ІФХ, а другого — для вимірювання параметрів довкілля. Виміряні дані передають у координатор бездротової мережі, який обробляє дані, агрегує та передає їх до сервера. На боці сервера знаходиться програмний модуль для оброблення та аналізу даних вимірювання. Основним призначенням цього модуля є підготовка даних для вироблення управлінського рішення та візуалізації виміряних даних. Елементи розробленої бездротової мережі для цифрового землеробства представлено на рис. 4 [8].

Слід зауважити, що запропонована БСМ відповідає усім вимогам цифрового землеробства. Мережа здатна одночасно отримувати інформацію про стан рослин як на великих, так і малих за площею територіях сільськогосподарських угідь. БСМ дає можливість додатково визначити забруднення ґрунтів гербіцидами та пестицидами, важкими металами, оцінити

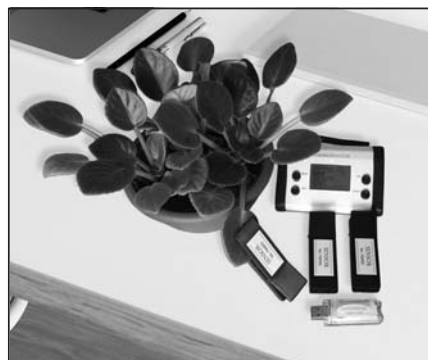


Рис. 4. Фрагмент мережі бездротових розумних сенсорів

життєдіяльність рослин після засухи, морозу, щеплення (grafting), внесення гербіцидів.

Отриману від вимірювальних вузлів інформацію структуровано та аналізовано за допомогою розробленого спеціалізованого програмного засобу «CFIAnalyzer». Він слугує для оброблення параметрів великої кількості кривих ІФХ. До того ж, для аналізу кривих ІФХ та напрацювання управлінських рішень використано елементи штучного інтелекту, як-от: нейронні мережі, метод опорних векторів та алгоритм XGBoost. Керування мережею та усіма її функціями здійснюють розроблені авторами прикладні програмні засоби, які інтегровано у мікроконтролери кожного з вузлів мережі.

Сенсори вимірювальних вузлів у складі цієї БСМ мають високу чутливість до зміни стану рослин. Інакше кажучи, за допомогою розроблених методик оцінюють не тільки поточний стан рослин, а й їхню стійкість до посухи, реакцію на внесення гербіцидів та добрив. Отже, можна успішно використовувати ці розумні системи та БСМ у промисловому землеробстві та екологічному моніторингу. Під час випробувань БСМ досліджено енергоефективність розроблених бездротових вузлів з автономним живленням, призначених для тривалої роботи в польових умовах експлуатації без заміни джерел живлення.

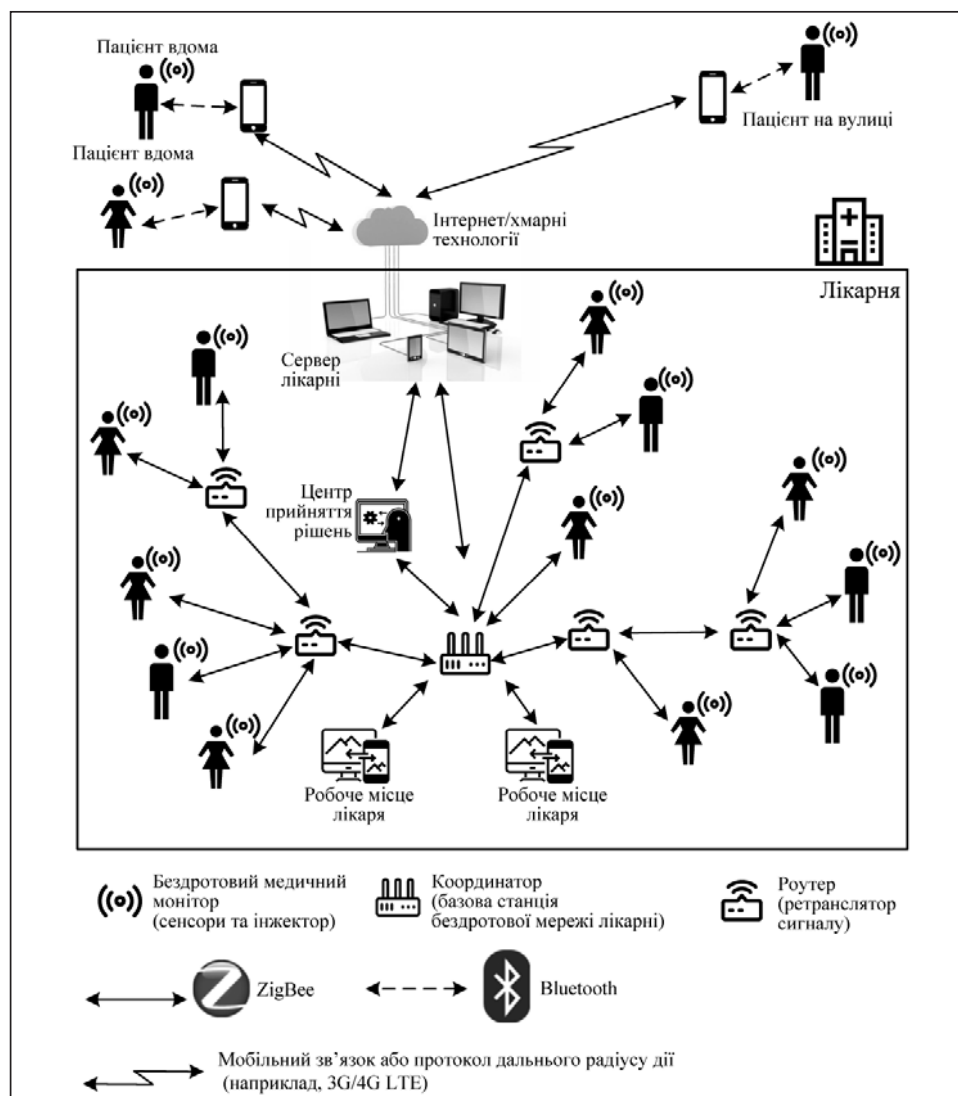


Рис. 5. Приклад системи дистанційного медичного моніторингу

РОЗУМНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Застосування БСМ та розумних систем на їхній основі у галузі охорони здоров'я дає можливість покращити якість і підвищити ефективність надання медичних послуг за рахунок дистанційної діагностики та контролю стану хворих у реальному часі, в тому числі за межами лікувальних закладів. Запропоновану розумну систему дистанційного медичного моніторингу, яка використовує декілька протоколів бездротового обміну даними, наведено на рис. 5.

У загальному випадку типовий дистанційний медичний монітор (рис. 6), який слідкує за станом здоров'я пацієнта, містить певну кількість персоніфікованих за станом здоров'я пацієнта натільних медичних сенсорів, дистанційно керований натільний інжектор та модуль бездротового обміну даними з можливістю визначення географічних координат [11]. Натільні сенсори з'єднано з модулем бездротового обміну даними через дротовий або бездротовий інтерфейс ближньої дії, наприклад, Bluetooth. Модулем бездротового обміну даними також може слугувати мобільний телефон або планшетний комп'ютер, який призначено для передачі даних у віддалений сервер. До того ж, модуль бездротового обміну даними підтримує зворотний зв'язок із сервером — забезпечує, наприклад, дистанційне керування натільними інжекторами для своєчасного здійснення необхідних ін'єкцій у разі загрози життю або здоров'ю пацієнта.

Запропоновані медичні монітори вже сьогодні є предметом інженерних розроблень і мають практичне застосування, що не можна сказати про віддалені центри діагностики та прийняття рішень. На думку авторів, останні є предметом подальших досліджень з використанням елементів штучного інтелекту для віддаленої постановки діагнозу.

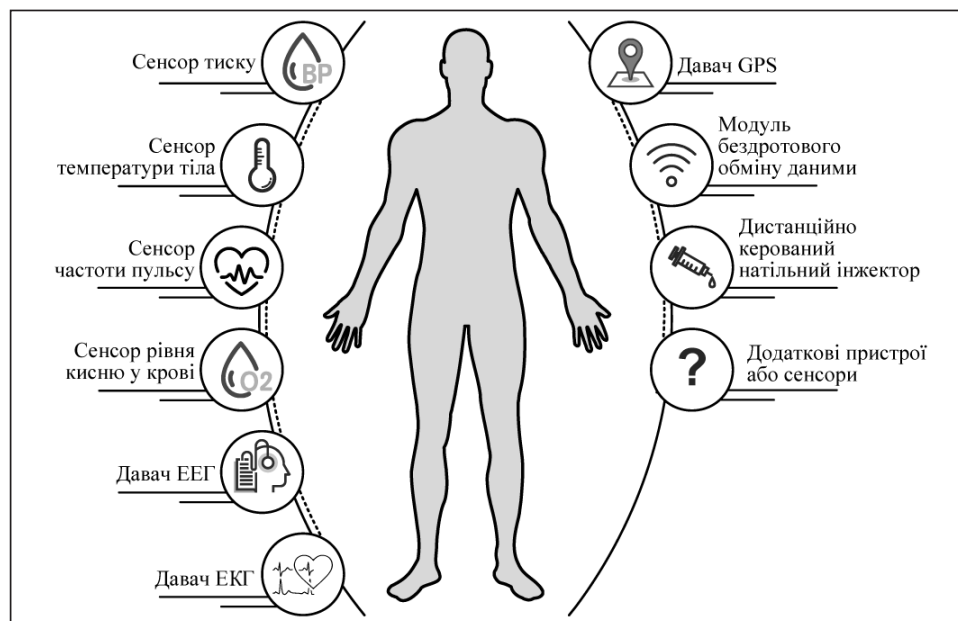


Рис. 6. Дистанційний медичний монітор здоров'я пацієнта

ДІАГНОСТИЧНІ РОЗУМНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЖИТТЯ

Поняття «якість життя» (ЯЖ) пацієнта використовують у сучасній медицині для розуміння патологічного стану та оцінювання ефективності проведеного лікування чи реабілітації. Це інтегральна характеристика фізичного, психологічного та соціального функціонування хворого на підставі суб'єктивного сприйняття. У переважній більшості випадків оцінювання ЯЖ слід здійснювати за безпосе-

редньої участі пацієнта. Для оцінювання якості життя і спектра симптомів, пов'язаних із захворюванням і/або лікуванням, ВООЗ розробила спеціальні інструменти — шкали та опитувальники, які заповнюють пацієнти. Так, наприклад, оцінювання ЯЖ здійснюють за допомогою міжнародного опитувальника SF-36, який містить 36 питань, об'єднаних у вісім шкал. Показники кожної шкали варіюють між 1 і 100, де 100 балів означають повне здоров'я [12]. Для оцінювання ЯЖ за цим опитувальником авторами розроблено відповідні методики, а також апаратні та програмні засоби для автоматизованої підтримки та супроводу цього оцінювання. За результатами опитування пацієнту надають відповідні рекомендації щодо подальшої інструментальної діагностики та лікування. Для реалізації поставленої мети використано розроблений авторами медичний комунікатор — спеціалізований комп'ютерний пристрій на базі планшетного комп'ютера, який містить оригінальні програмні засоби для автоматизованого оцінювання ЯЖ. Слід додати, що медичний комунікатор до того ж підтримує опитувальники для виявлення аномальної маткової кровотечі та для епідеміологічного спостереження за поширеністю неінфекційних захворювань та їхніх факторів ризику в субпопуляціях (трудових або навчальних колективах, територіальних громадах тощо).

ВИСНОВКИ

Під час проведених досліджень і розроблення нових вимірювальних засобів, систем та інформаційних технологій для різних прикладних галузей запропоновано концепцію побудови банку знань як елемента штучного інтелекту для розумних систем експрес-діагностики стану сільськогосподарських культур. Розроблено модель багаторівневої розумної системи та метод композиційного проєктування цих систем на різних функціональних рівнях.

Розроблено прототипи бездротових сенсорних мереж та розумних систем для цифрового землеробства, екологічного моніторингу та охорони здоров'я. Досліджено енергоефективність вузлів та елементів з автономним живленням розроблених бездротових мереж та розумних систем, призначених для тривалої роботи в польових умовах експлуатації без заміни елементів живлення.

Для аналізу даних вимірювання та супроводу вироблення управлінських рішень використано спеціально розроблені програмні засоби та методи на основі штучних нейронних мереж, методу опорних векторів та алгоритму XGBoost. Оцінювання стану рослин здійснено за сукупністю вимірних кривих ІФХ.

На основі розроблених бездротових вимірювальних вузлів та бездротових сенсорних мереж створено прототипи медичних моніторів з персоналізованим набором натільних медичних сенсорів для оцінювання в реальному часі параметрів стану пацієнта з можливістю зворотного впливу через натільні дистанційні інжектори у разі загрози життю чи здоров'ю пацієнта.

Для оцінювання якості життя пацієнтів розроблено діагностичну експертну розумну систему із застосуванням міжнародних та оригінальних опитувальників, зокрема, у дистанційному режимі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Simo A., Dzitac S., Badea G.E., Meian D. Smart agriculture: IoT-based greenhouse monitoring system. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2022. Vol. 17, N 6. Article 5039. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2022.6.5039>.
2. Kim W.-S., Lee W.-S., Kim Y.-J. A review of the applications of the Internet of Things (IoT) for Agricultural Automation. *J. Biosyst. Eng.* 2020. Vol. 45, Iss. 4. P. 385–400. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00078-3>.
3. Borz I., Palade T., Puschita E., Dolea P., Pastrav A. Wireless sensor networks for healthcare monitoring. *Proc. 7th International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology (MEDITECH 2020)* (13–15 October 2020, virtual event, Cluj-Napoca, Romania). Cluj-Napoca, 2020. IFMBE Proceedings. Cham: Springer, 2020. Vol. 88. P. 232–239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93564-1_26.

4. Thilakarathne N.N., Priyashan W.D.M., Premarathna C.P. Artificial intelligence — enabled IoT for health and wellbeing monitoring. *Proc. 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (6–8 July 2021, Kharagpur, India). Kharagpur, 2021. P. 01–07. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT51525.2021.9579792>.
5. Deng Z., Guo L., Chen X., Wu W. Smart wearable systems for health monitoring. *Sensors*. 2023. Vol. 23, Iss. 5. Article 2479. <https://doi.org/10.3390/s23052479>.
6. Liu Q., Mkongwa K.G., Zhang C. Performance issues in wireless body area networks for the healthcare application: a survey and future prospects. *SN Appl. Sci.* 2021. Vol. 3. Article 155. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04058-2>.
7. Kryvonos Y.G., Romanov V.O., Galelyuka I.B., Wojcik W., Zyska T., Amirgaliev E. Independent devices and wireless sensor networks for agriculture and ecological monitoring. In: *Recent Advances in Information Technology*. Wojcik W., Sikora J. (Eds.). Balkema: CRC Press, 2017. P. 105–134.
8. Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O. Wireless sensor networks for smart agriculture. *International Journal of Reasoning-Based Intelligent Systems*. 2021. Vol. 13, N 3. P. 147–154. <https://doi.org/10.1504/IJRIS.2021.117079>.
9. Rekha G., Yashaswini J. Industry 4.0: A revolution in healthcare sector via cloud, fog technologies. In: *Intelligent Interactive Multimedia Systems for e-Healthcare Applications*. Tyagi A.K., Abraham A., Kaklauskas A. (Eds.). Singapore: Springer, 2022. P. 321–335. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6542-4_16.
10. Angel N.A., Ravindran D., Vincent P.M.D.R., Srinivasan K., Hu Y.-C. Recent advances in evolving computing paradigms: cloud, edge, and fog technologies. *Sensors*. 2022. Vol. 22, Iss. 1. Article 196. <https://doi.org/10.3390/s22010196>.
11. Wei K., Zhang L., Guo Y., Jiang X. Health monitoring based on Internet of medical things: architecture, enabling technologies, and applications. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27468–27478. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971654>.
12. Ware J.E. Jr., Kosinski M., Keller S.D. SF-36 physical and mental health summary scales: A user's manual. Boston: Health Assessment Lab, 1994. 188 p.

**V.O. Romanov, I.B. Galelyuka, V.M. Hrusha, O.V. Voronenko,
O.V. Kovyrova, H.V. Antonova, A.V. Kedych**

**WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR DIGITAL AGRICULTURE,
ENVIRONMENTAL PROTECTION, AND HEALTHCARE**

Abstract. The article presents the results of the development and creation of wireless sensor networks for agriculture and medicine, obtained by the team of authors during the past five years. Wireless sensor networks for estimating the state of plants by the method of chlorophyll fluorescence induction on large areas of agricultural lands are considered. These networks include original smart sensors, built according to flexible architecture and which contain elements of artificial intelligence based on neural networks, which increases their effectiveness in determining the effect of stress factors of different origins. On the basis of the wireless sensor network, a smart remote medical monitoring system has been built, which uses several wireless data exchange protocols. To assess the quality of life and the spectrum of symptoms, associated with the diseases and/or treatment, a diagnostic system was created, which determines the patient's state using international and national questionnaires. The basis of the operation of proposed smart measuring devices and systems is the knowledge-based principles of processing and analyzing the measuring data for making managerial decisions and giving recommendations to users. Most of the obtained results have been brought to serial production.

Keywords: wireless sensor network, data acquisition system, information and communication technology, digital agriculture, assessment of life quality.

Надійшла до редакції 18.04.2023