

# КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*В статті описано процес розробки та тестування мережі бездротових розумних біосенсорних пристроїв для харчової промисловості, а саме для контролю якості вина, виноматеріалів та продуктів харчування у процесі виробництва. Сформульовано вимоги як до елементів бездротової мережі, так і до самої мережі у цілому. Розроблено вимірвальні вузли на основі амперметричних сенсорів, а також апаратні та програмні засоби бездротових мультисенсорних вузлів мережі. На розроблену мережу та її елементи створено конструкторську документацію для швидкого впровадження таких засобів у прикладні застосування.*

**Ключові слова:** біосенсори, бездротові сенсорні мережі, контроль якості вина та продуктів харчування.

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

УДК 681.7.08:535.3; 004.387:621.3.087.92 DOI:10.34229/2707-451X.23.1.6

В.О. РОМАНОВ, І.Б. ГАЛЕЛЮКА, О.В. ВОРОНЕНКО, О.В. КОВИРЬОВА, Г.В. АНТОНОВА, А.В. КЕДИЧ

## **БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ «РОЗУМНИХ» МУЛЬТИСЕНСОРІВ ТА БІОСЕНСОРНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ВИНОГРАДНИХ І ПЛОДОЯГІДНИХ КУЛЬТУР ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКТІВ ВИНОРОбСТВА**

**Вступ.** «Розумні» мультисенсори та біосенсорні прилади і системи на основі сучасних інформаційних технологій дають можливість суттєво покращати параметри систем тестування біологічно-активних, хімічних і токсичних речовин та біологічних або біофізичних об'єктів, удосконалити контроль параметрів, обробку та аналіз даних у цифровому землеробстві, харчовій промисловості, екологічному моніторингу та медицині. Такі інноваційні прилади та системи нового покоління об'єднують біологічні чутливі елементи (біосенсори) з перетворювачами біофізичних сигналів в електричні цифрові сигнали. Біосенсори мають високу чутливість та селективність, вони прості у використанні та практично у реальному часі визначають концентрацію різних сполук у розчинах навіть у мінімальних дозах. Це дозволяє застосовувати біосенсори практично у всіх галузях діяльності людини, включаючи харчове, біотехнологічне, фармацевтичне виробництво, сільське господарство, охорону здоров'я, захист довкілля тощо. Сенсорні технології відносять до ключових світових технологій, розвиток яких відбувається експоненціально, тобто параметри цих технологій покращуються на десятки відсотків за рік при тому ж рівні вартості самих біосенсорів. Згідно даних журналу IoT Analytics ринок смарт сенсорів (або «розумних» сенсорів) зріс у 2022 році на 23 %. Цей ринок включає смарт сенсори, які можуть працювати як автономно, так і у складі бездротових сенсорних мереж. У найближчі два роки прогнозують ріст ринку Інтернету речей, базою яких є бездротові сенсорні мережі, більше ніж на 100 мільярдів доларів.

**Мета** цієї публікації спрямована на опис розробки «розумних» біосенсорних засобів і мереж на їх основі для рослинництва та харчової промисловості, а саме для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю якості вина, виноматеріалів та продуктів харчування у процесі виробництва.

Також передбачено створення мережі бездротових «розумних» сенсорів для контролю якості напоїв у процесі виноробства на основі амперметричних біосенсорів. Розробку «розумних» біосенсорів і мереж на їх основі спрямовано на створення інноваційної конкурентоспроможної вітчизняної продукції, зокрема в області інформаційних технологій для аграрної та харчової промисловості. Розроблені авторським колективом бездротові сенсорні мережі для експрес-діагностики стану рослин розглянуто в [1–3], а цю публікацію присвячено сенсорним мережам для контролю якості продукції виноробства.

**Опис технологічного процесу та параметрів, які підлягають контролю, у процесі виробництва вина.** Перелік основних технологічних процесів виробництва виноградних і плодоягідних вин містить підготовку сировини, пресування м'язги, бродіння сусла, освітлення, переливання вина, усущку і доливання вина, витримку вин, лікування хвороби і вад вина [4]. Сировиною для виробництва натуральних вин є сік з культурних і дикорослих плодів та ягід, технічних і деяких столових сортів винограду. Сік, що утворився після обробки м'язги, зливають у посуд, м'язгу пресують. Отриманий після пресування сік піддають фільтрації. Сік, поставлений на бродіння, називають суслom. Столові та натуральні вина виготовляють без додавання в них спирту. Їх міцність складає не більше 15–15,6 %. Для отримання кріплених вин міцністю більше 15 % у виноматеріал додають розраховану кількість етилового спирту. Перед бродінням у суслі визначають вихідний вміст цукрів і титрованих кислот та розраховують кількість цукру, якої не вистачає для отримання необхідної спиртуозності готового вина. Прозорість вина – обов'язкова ознака його якості. Освітлені й фільтровані вина зберігаються довше і краще. Під хворобою вина розуміють зміни в ньому, зумовлені діяльністю хвороботворних мікроорганізмів. Вадами вина вважають зміни його властивостей, що погіршують його якість і є наслідком хімічних, біохімічних або фізико-хімічних змін. Причини захворювань і вад вина зумовлені порушенням технології приготування та витримки вина на усіх стадіях його виробництва.

Коротко розглянемо хімічний склад виноградного сусла та вина різних сортів. Хімічний склад виноградного сусла та вина наведено у табл. 1, вміст вуглеводів у виноградному суслі та вині – у табл. 2, а вміст органічних кислот у виноградному суслі та вині – у табл. 3 [5].

ТАБЛИЦЯ 1. Хімічний склад виноградного сусла та вина

Речовина, г/л	Сусло	Столове вино		Десертне вино
		біле	червоне	
Ароматичні речовини	0,15	1,0	1,2	0,6
Екстрактивні речовини	200	20,0	24,0	180
У тому числі:				
Вуглеводи (до 20 найменувань)	189	2,5	4,5	167
Цукри*	185	1,5	2,5	160
Полісахариди	3,0	1,0	2,0	1,5
Органічні кислоти (35 найменувань)	7,5	7,0	6,0	5,0
Фенольні речовини (до 60 найменувань)	0,9	0,3	1,5	0,6
Азотисті речовини (до 45 найменувань)	0,5	0,2	0,3	0,4
Мінеральні речовини (до 20 найменувань)	4,0	1,5	2,5	3,5
Гліцерол та інші багатоатомні спирти	Нема	8,0	9,5	3,5
Етиловий спирт (% об.)	Сліди	11,0	12,0	16,0

ТАБЛИЦЯ 2. Вміст вуглеводів у виноградному суслі та вині

Вуглеводи, г/л	Сусло	Вино столове
Глюкоза	80 – 130	0,2 – 1,0
Фруктоза	70 – 120	1,0 – 2,0
Пентоза	0,2 – 1,6	0,2 – 1,8
Пектинові речовини	0,1 – 1,0	Сліди
Полісахариди	0,3 – 8,5	0,2 – 2,8

ТАБЛИЦЯ 3. Вміст органічних кислот у виноградному суслі та вині

Органічні кислоти, г/л	Сусло	Вино столове
Винна	2,0 – 7,0	1,5 – 5,0
Яблучна	2,0 – 15,0	До 5,0
Молочна	До 0,05	0,5 – 5,0
Бурштинова	0,1 – 0,3	0,5 – 1,5
Оцтова	До 0,05	0,3 – 1,5
Лимонна	0,2 – 0,5	До 0,8

Об'ємна частка етилового спирту у столових сортових винах має бути не менше 9,5 %. Об'ємна частка етилового спирту, концентрація цукрів і титрованих кислот для конкретного виду вина встановлено державними стандартами. Допустимі відхилення параметрів від норм вказано у табл. 4. Вміст радіонуклідів у винах не має перевищувати допустимі рівні [6], які зазначено в табл. 5. Вміст важких металів у винах регламентується стандартами серії ДСТУ 4112. Наприклад, вміст свинцю не може перевищувати 0,3 мг/кг, кадмію – 0,03 мг/кг, цинку – 10 мг/кг, міді – 5 мг/кг.

ТАБЛИЦЯ 4. Відхилення від норм за фізико-хімічними показниками вин

Назва показника	Значення
Об'ємна частка етилового спирту, %	± 0,5
Масова концентрація цукрів (за винятком сухих вин), г/дм <sup>3</sup>	± 5,0
Масова концентрація титрованих кислот, г/дм <sup>3</sup>	± 2,0

ТАБЛИЦЯ 5. Допустимі рівні радіонуклідів у винах

Показник	Допустимі рівні, Бк/кг	Метод контролювання
137Cs	50	Згідно ДСТУ 3240
90Sr	30	Згідно ДСТУ 3240

Виходячи з кількості хімічних показників, наведених у табл. 1–5, для їх контролю виробникам вина необхідно мати досить коштовні біохімічні лабораторії зі складним обладнанням і кваліфікованим персоналом. Це можуть дозволити собі тільки потужні компанії з великими обсягами товарної продукції. Таких виробників в Україні небагато. Якщо звернутися до досвіду лідера у виноробстві Франції, то у цій країні поряд з великими компаніями, яких теж порівняно небагато, працюють десятки тисяч невеликих фермерських господарств з невеликими обсягами виробництва вина. Не маючи змоги утримувати коштовні біохімічні лабораторії, такі господарства використовують портативні прилади та засоби, як правило, оптичні, для контролю якості вина та виноматеріалів. До них відносять рефрактометри, хроматографи й інші спеціалізовані прилади на один чи декілька основних компонентів. Але такі прилади також мають високу вартість. Виходячи з того, що Україна перебуває у тих же самих широтах, що і Франція, і має багаторічний досвід у виробництві вина, обсяг якого за

радянських часів сягав 15 % бюджету, то поява в Україні невеликих за обсягами виробництва, але у великій кількості фермерських господарств з виробництва вина може суттєво підняти надходження у державний бюджет. Для успішної роботи численних фермерських господарств, зайнятих у виноробстві, їх доцільно оснастити сучасними «розумними» приладами та сенсорами для контролю якості вина та виноматеріалів. Тільки у цьому випадку вони зможуть сертифікувати свої виробництва та поставляти свою продукцію не тільки на ринок України, але й на ринки інших країн.

Слід зазначити, що в установах НАН України в рамках Цільової програми наукових досліджень ««Розумні» сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій» розроблено «розумні» мультисенсори, які за своїми параметрами не поступаються закордонним рефрактометрам та іншим коштовним закордонним приладам, створено прототипи «розумних» мультисенсорних мереж промислового рівня, які разом з «розумними» сенсорами здатні створити альтернативу біохімічним лабораторіям у невеликих фермерських виноробних господарствах і у такий спосіб відкрити їм шлях на ринок високоякісної сертифікованої продукції.

Основні класи біосенсорів та особливості їх застосування у виноробстві розглянуто в [7].

**Вимоги до бездротових сенсорних вузлів «розумних» мультисенсорів.** Підвищити контроль якості вина під час виробництва можна за допомогою розроблених біосенсорів та мереж на їх основі [8–11]. До основних вимог до «розумних» сенсорних вузлів слід віднести наступне: можливість функціонування не тільки автономно, а й у складі бездротової мережі, низьке енергоспоживання, можливість фільтрації сигналів на вході та виході, можливість перетворення сигналів «розумних» сенсорів, таких як сенсори біологічних параметрів, у форму, яка є зручною для подальшої обробки та передачі даних [12].

Попередню обробку та інтерпретацію даних безпосередньо включено у функції сенсорного «розумного» вузла. Тільки найбільш важлива інформація має передаватися «розумним» вузлом на наступний рівень обробки: у хмарне середовище або до віддаленого комп'ютера чи сервера для контролю та прогнозування розвитку виробничого процесу та напрацювання управлінських рішень. У сенсорному «розумному» вузлі використовують велику кількість аналогових компонентів, при роботі яких необхідно враховувати їх динамічний та частотний діапазони. Наявність аналогових елементів потребує використання фільтрів, але аналогові фільтри у вимірювальних каналах можуть привести до втрат корисної інформації. Тому альтернативою аналоговим фільтрам є цифрові фільтри на виході АЦП у складі сенсорного «розумного» вузла. У «розумних» сенсорах, як правило, використовують порозрядні або сігма-дельта АЦП. Особливістю останніх є те, що їх шум квантування зсунуто у високочастотну область, а область корисного сигналу перебуває у смузі більш низьких частот. Тобто сігма-дельта АЦП мають більшу точність у порівнянні з порозрядним АЦП. Обчислювальна потужність сенсорного «розумного» вузла залежить від типу вбудованого процесора.

Ядро такого процесора може включати один або кілька обчислювачів, RAM-пам'ять та інше [13]. Вибір типу процесора зумовлено необхідною обчислювальною потужністю, точністю та швидкістю виконання операцій. Як приклад, на сьогодні хорошим варіантом є процесори типу ARM з ядром Cortex-M3 або Cortex-M4 та Cortex-M0, які містять вбудований протокол обробки даних. Процесор з ядром Cortex-M3 (Cortex-M4) призначено для виконання складної обробки сигналів, а процесор з ядром Cortex-M0 використовують для обчислювальних задач невисокої складності. Такий розподіл функцій має декілька переваг, а саме, коли потужний процесор зайнятий виконанням обчислень високої складності, менш потужний процесор слідує за обробкою переривань. Крім того, використання в одному смарт вузлу двох ядер дає можливість подолати обмеження у роботі з флеш-пам'яттю шляхом розпаралелювання декількох обчислювальних процесів. Також це рішення дає можливість збалансувати енергоспоживання з обчислювальною потужністю, що важливо для сенсорних вузлів з автономним живленням. У бездротовій сенсорній мережі передбачено застосування великої кількості сенсорних «розумних» вузлів [14], які об'єднано у відповідні кластери.

Як правило, втрачені у «розумних» вузлах дані не може бути відновлено у віддаленому комп'ютері або на сервері. Тому висока надійність сенсорного «розумного» вузла є важливою вимогою до бездротових сенсорних мереж. Збій чи відмова вузла можуть зумовити відмову усієї мережі. Бездротові мережі для контролю технологічних процесів відносять до систем реального часу, а це означає, що у віддалений комп'ютер через шлюз (мережний інтерфейс) поступає найбільш важлива інформація про протікання технологічного процесу для подальшої обробки та напрацювання управлінських рішень. Технологія Інтернету речей, в основі якої лежить використання «розумних» сенсорних мереж, висунула нові вимоги до інтелектуалізації сенсорних вузлів. Сенсорні вузли у системах Інтернету речей не тільки перетворюють фізичні, оптичні, біо- і електрохімічні величини у цифровий код, але також здійснюють його передачу у віддалений комп'ютер і виконують попередню обробку даних, спрямовану на вилучення корисної інформації з потоку даних. Це розвантажує мережу від надлишкових даних і дає можливість у реальному часі напрацьовувати відповідні управлінські рішення щодо керування відповідним технологічним процесом.

**Структура і функціональна схема «розумного» мультисенсора.** Функціональна схема розробленого нами «розумного» мультисенсора для контролю процесу виробництва вина містить декілька амперметричних біосенсорів. З виходу кожного сенсора знімають інформативні сигнали у формі струму, рис. 1 [8–10].

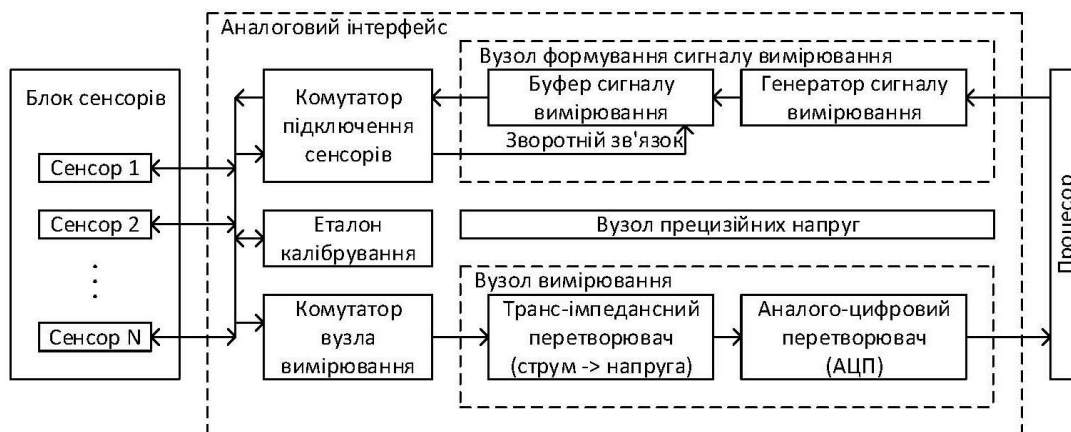


РИС. 1. Функціональна схема вхідного вузла «розумного» мультисенсора

Для інтелектуалізації мультисенсора у його склад включено вузол обробки даних, а для передачі даних у сенсорну мережу після попередньої обробки додано приймач-передавач. Основні структурні елементи «розумного» мультисенсора, за виключенням амперметричних біосенсорів, реалізовано на основі вимірювальної системи на кристалі ADuCM350 виробництва компанії Analog Devices [15]. Вона містить точний 16-розрядний АЦП з частотою вибірки 160 кГц, джерело опорної напруги з похибкою  $\pm 0.2\%$ , 12-розрядний ЦАП, цифровий фільтр, процесор ARM Cortex-M3 з тактовою частотою 16 МГц, Flash-пам'ять обсягом 384 кбайт, EEPROM-пам'ять обсягом 16 кбайт та SRAM-пам'ять обсягом 32 кбайт. Крім вказаного, ця система на кристалі має програмований мультиплексор на вході, здійснює вимірювання комплексного імпедансу та підтримує велику кількість інтерфейсів. Для налагодження та програмування «розумного» сенсорного вузла створено комп'ютеризоване робоче місце, яке містить, крім стандартних вимірювальних приладів і ПК, координатор мережі з програматором та аналого-цифровий аналізатор сигналів. Це робоче місце дає можливість програмувати усі режими і компоненти мережі, включно «розумний» сенсорний вузол або декілька таких вузлів та

координатор мережі. У залежності від технологічних процесів виробництва вина передбачено можливість швидкої реконфігурації мережі під потреби виробництва [16].

**Структура «розумної» сенсорної мережі.** Для контролю процесу виробництва вина розроблено бездротову сенсорну мережу на основі зіркоподібної та деревоподібної топології. Мережа складається з кількох основних елементів, зокрема: 1) бездротових «розумних» сенсорних вузлів, кожен з яких має набір біосенсорів і, за потреби, виконавчих механізмів; 2) координатора сенсорної мережі; 3) робочого місця технолога. Спрощену структуру сенсорної мережі показано на рис. 2.

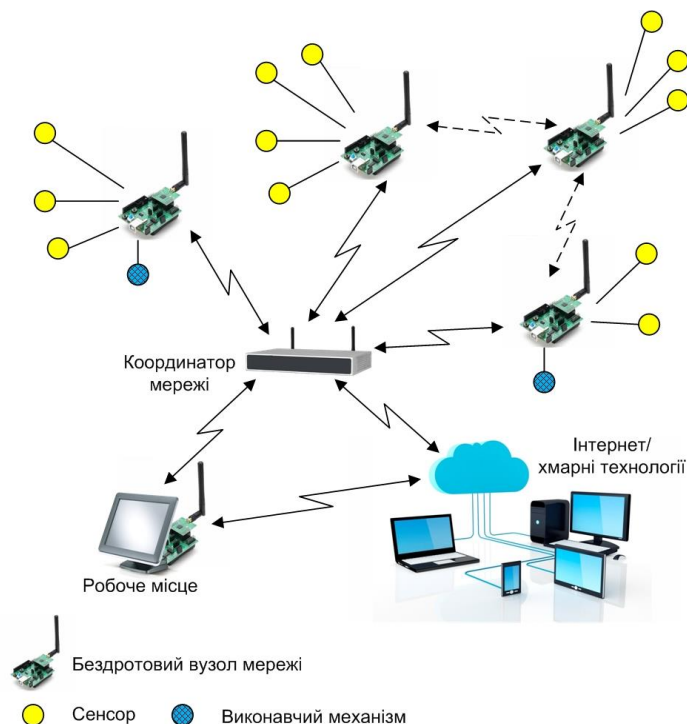


РИС. 2. Спрощена структура мережі бездротових сенсорних вузлів з амперметричними сенсорами та виконавчими механізмами для застосування у промисловому виноробстві

Головним керуючим елементом сенсорної мережі є координатор [14], основна функція якого полягає у формуванні мережі та слідкуванні за безперебійним і надійним функціонуванням її елементів. Інша важлива функція координатора мережі полягає у збиранні, агрегуванні та попередньому обробленні вимірних даних для подальшого їх передавання на робоче місце технолога. Крім того, координатор володіє можливістю інтегрування з системою вищого рівня через внутрішню корпоративну мережу, мережу Інтернет або хмарне середовище. Бездротові вузли після розгортання шукають координатора мережі та формують мережу бездротових «розумних» сенсорних вузлів відповідно до наперед заданої топології. Вони розташовуються на технологічному обладнанні та здійснюють вимірювання робочих параметрів відповідно до технологічного процесу за сертифікованими методиками. Бездротові сенсорні вузли, окрім сенсорів, можуть мати у своєму складі виконавчі механізми, що дає можливість у випадку виходу робочих параметрів за встановлені межі впливати на технологічний процес для приведення його до заданих умов або зупиняти його з метою запобігання аварійній ситуації. Робоче місце (технолога) призначено для зберігання (архівування), оброблення та візуалізації даних, що їх отримано від мережі «розумних» бездротових сенсорних вузлів, відображення стану самої мережі та параметрів її окремих елементів. Через органи управління робочого

місця (клавіатура або сенсорний екран монітора) є можливість впливати на хід технологічного процесу через виконавчі механізми, які за вимогою може бути включено у склад бездротових сенсорних вузлів. Типову структуру мережі бездротових сенсорних вузлів для застосування у промисловому виноробстві з прив'язкою до технологічного процесу виробництва вина показано на рис. 3.

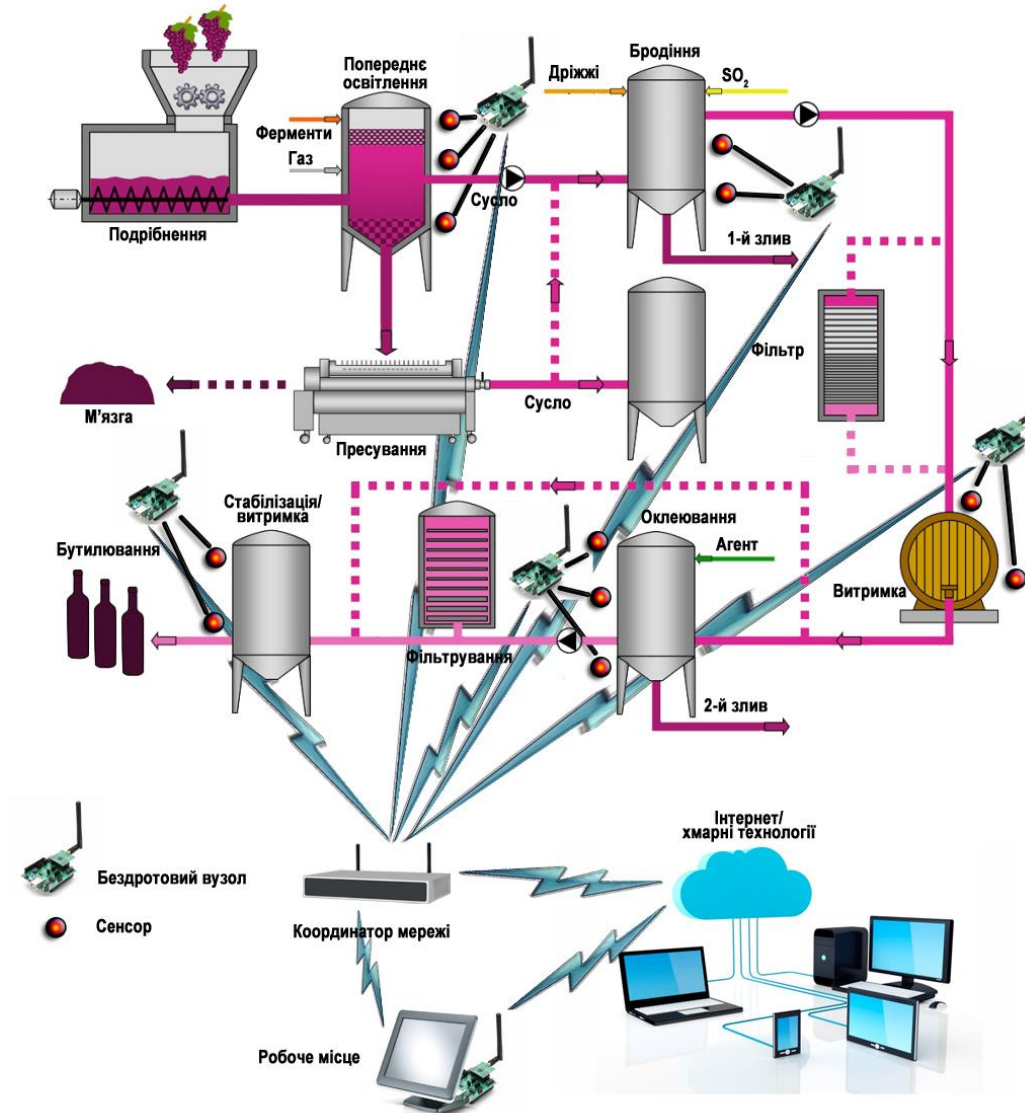


РИС. 3. Типова структура мережі бездротових мультисенсорних вузлів для застосування у промисловому виноробстві з прив'язкою до технологічного процесу виробництва вина

**Вимоги до алгоритмів та програмного забезпечення елементів мережі [17].** Визначення та детальний опис основних функцій сенсорного вузла та координатора бездротової сенсорної мережі надали можливість розробити алгоритм функціонування згаданих вузлів та відповідне прикладне програмне забезпечення елементів мережі [18–21]. Алгоритм роботи сенсорного вузла містить кілька основних етапів. При включенні сенсорного вузла виконується група функцій, які призначено для ініціалізації вузла, його первинного налаштування та пошуку потенційно доступних мереж.

Якщо сенсорний вузол знаходить бездротову сенсорну мережу, до якої йому слід підключитися, то він напряму або через інші вузли мережі надсилає координатору запит на підключення до мережі. У разі позитивної відповіді від координатора мережі сенсорний вузол також отримує пакет специфічних налаштувань для роботи у мережі, до якої він підключається. Після успішного підключення до мережі сенсорний вузол переходить у робочий режим, який полягає в очікуванні команд від координатора і виконанні цих команд або у виконанні наперед записаних команд у автономному режимі відповідно до графіка у випадку відсутності зв'язку з координатором мережі.

Алгоритм роботи координатора є дещо іншим від алгоритму роботи сенсорного вузла, оскільки на координатор покладено функції організації сенсорної мережі та підтримання її роботи, а також функція організації зв'язку з вузлом мережі вищого рівня (комп'ютером технолога, хмарним середовищем тощо). Після включення координатора виконується його ініціалізація та організація мережі. Для цього координатор посилає широкосмугову команду на підключення доступних сенсорних вузлів, що підпадають під правила підключення до цієї мережі. Після попередньої організації мережі координатор здійснює пошук комп'ютера технолога або відповідного хмарного середовища і, якщо такий є в зоні досяжності, то посилає йому запит на отримання команд. У випадку отримання команд від комп'ютера технолога або хмарного середовища координатор формує стек команд і розсилає їх задіяним у технологічному процесі сенсорним вузлам мережі. Алгоритми роботи елементів мережі розробляють відповідно до технологічної карти конкретного виробництва у вигляді прикладного програмного забезпечення.

Попередньо всі бездротові вузли прототипу мережі було побудовано на базі бездротового мікроконтролера JN5168. Кожний вузол мережі, включно мультисенсори і координатор, містили 32-розрядний RISC-процесор з тактовою частотою 32 МГц та бездротовий приймач-передавач у стандарті IEEE802.15.4. У мережі застосовувався стек ZigBee Pro як бездротовий протокол для організації мережі. Основним блоком керування такою мережею є координатор мережі. Крім того, координатор підтримує наступні функції: збір, обробку, візуалізацію та передачу даних у робочу станцію, у мережу Інтернет чи у хмарне середовище. Як було з'ясовано шляхом аналізу різних варіантів застосування мережі для оцінки якості різних напоїв, використання промислового протоколу ZigBee обмежує можливості мережних мультисенсорних вузлів. Цей протокол потребує використання проміжних перетворювачів ZigBee/USB при використанні портативних комп'ютерів для керування мережею. В мобільних планшетних комп'ютерах та у сучасних мобільних телефонах USB-порти відсутні, водночас ці засоби містять стандартні бездротові адаптери типу Wi-Fi або Bluetooth. Тобто використання цих портів дає можливість у ряді застосувань замінити координатор планшетним комп'ютером або мобільним телефоном. Тому у новій версії бездротової сенсорної мережі для контролю якості напоїв передбачено використання не тільки протоколу ZigBee, але й протоколу Bluetooth 5. Останній орієнтовано на засоби з низьким енергоспоживанням, що важливо, якщо мережа має батарейне джерело живлення. До основних переваг протоколу Bluetooth 5 (та пізніших версій) відносять наступне: обмін даних підтримується на відстані до 150 м (у відкритому середовищі), що практичне співпадає з можливостями протоколу ZigBee. У промислових приміщеннях дальність протоколу Bluetooth 5 складає 30–35 м. З цією метою для підтримки протоколу Bluetooth 5 було використано мікроконтролер nRF52840 фірми Nordic Semiconductor. Цей мікроконтролер являє собою багатопрокольний пристрій, який підтримує протоколи Bluetooth 5, Thread, ZigBee, 802.15.4 та інші. Додаткове використання протоколу Bluetooth значно розширило можливості мультисенсора. Структуру двохпротокової сенсорної мережі показано на рис. 4.

Таким чином, бездротові мультисенсори можуть працювати як у складі мережі, використовуючи протокол ZigBee, так і автономно, використовуючи протокол Bluetooth. В автономному режимі бездротові мультисенсори можуть працювати під управлінням мобільного телефону або планшета.



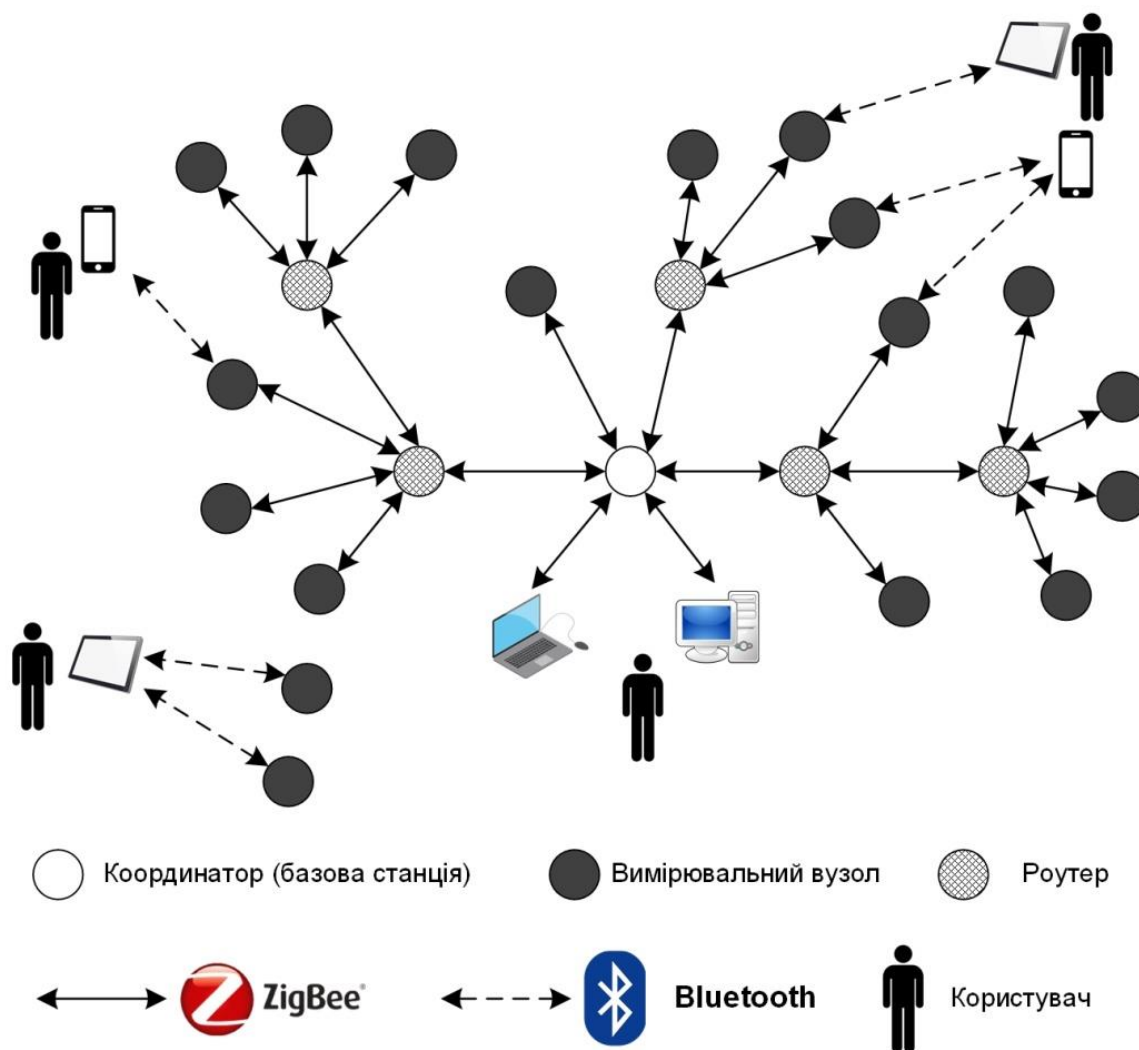


РИС. 4. Структура двохпротокольної бездротової сенсорної мережі

**Тестування прототипу мультисенсорного вузла.** Створений прототип мультисенсорного вузла було протестовано в автономному режимі. На рис. 5 показано результати тестування прототипу мультисенсорного вузла з різними концентраціями розчинів глюкози.

У результаті тестування прототипу мультисенсорного вузла (рис. 5) виявлено наступне:

1) роздільна здатність вимірювального каналу мультисенсорного вузла складає одиниці нА і її може бути підвищено регулюванням коефіцієнту підсилення вхідного підсилювача;

2) вихід мультисенсорного вузла на усталений режим при вимірюванні концентрації глюкози у режимі додавання 0,25 ммоль розчину глюкози до буферного розчину об'ємом 5 мл ( $pH = 7.2$ ) становила 45 хв. В інших режимах тестування було показано, що при зменшенні концентрації глюкози, що додавалася, до 0,175 ммоль, режим насичення досягався протягом 60 хв. Зменшення концентрації глюкози до 0,055 ммоль, призводило до досягнення режиму насичення протягом 120 хв.

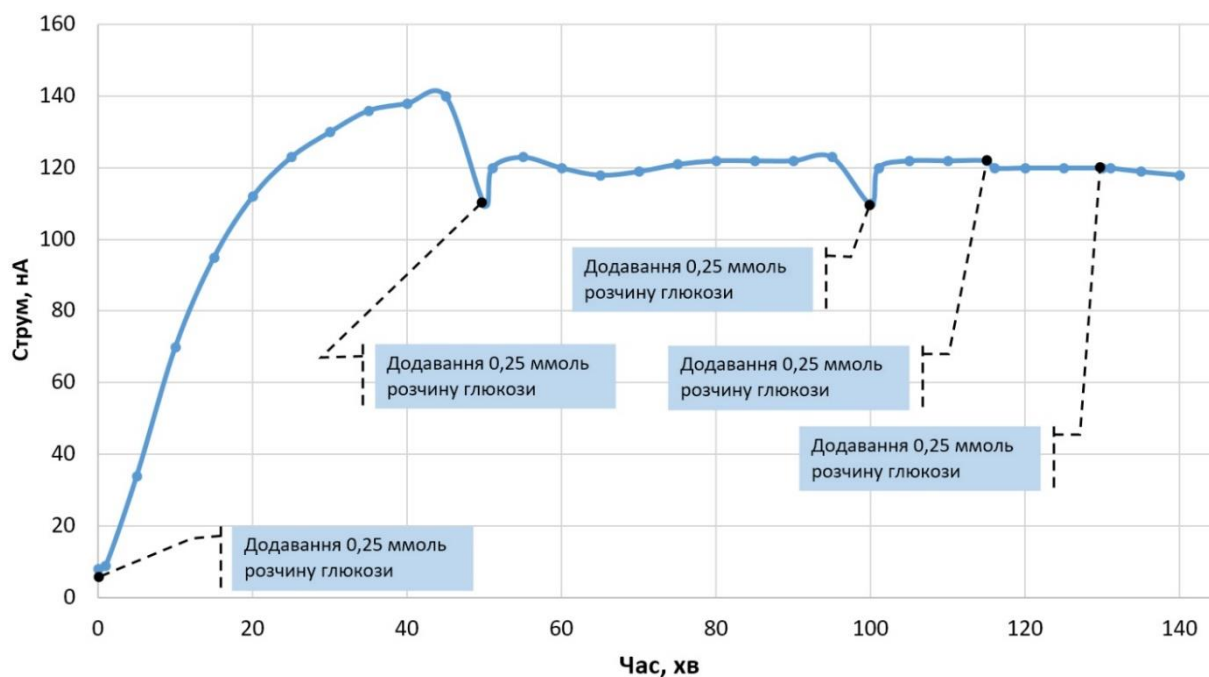


РИС. 5. Результати тестування прототипу мультисенсорного вузла на вимірах концентрації глюкози при додаванні розчину глюкози у буферний розчин (об'єм = 5 мл, рН = 7.2)

**Обґрунтування вибору модуля бездротового зв'язку. Вибір бездротової технології відповідно до вибраного модуля.** У "розумних" біосенсорах як модуль бездротового обміну даними використано систему на кристалі nRF82540 виробництва компанії Nordic Semiconductor з підтримкою кількох протоколів бездротового зв'язку, зокрема: Bluetooth 5, Bluetooth mesh, Thread, Zigbee, 802.15.4, ANT. Система на кристалі містить мікропроцесор з архітектурою ARM і ядром Cortex-M4 з максимальною тактовою частотою в 64 МГц, модулем підтримки операцій з плаваючою крапкою і набором 32-бітних інструкцій. Для можливості інтеграцій у різні пристрої або підключення додаткових модулів передбачено кілька стандартних інтерфейсів, серед яких USB, QSPI, SPI, TWI, I<sup>2</sup>S та ряд інших. Для реалізації операцій бездротового обміну даними "розумних" біосенсорів та створення бездротової мережі на базі цих біосенсорів [22–25] вибрано протокол Bluetooth 5, який має кілька позитивних особливостей у сукупності з апаратними засобами системи-на-кристалі. Використання протоколу Bluetooth 5 передбачає швидкості обміну даними, рівними 125 кбіт/с, 250 кбіт/с, 500 кбіт/с, 1 Мбіт/с і 2 Мбіт/с. Чутливість приймача, наприклад, при швидкості 125 кбіт/с складе -103 дБм, а при швидкості 1 Мбіт/с дорівнюватиме -95 дБм. Підсилення передавача знаходиться у межах від -20 до +8 дБм з можливим кроком налаштування в 4 дБм. Пікове споживання струму в режимі приймача складає 4,6 мА, а в режимі передавача - 4,8 мА при рівні підсилення у 0 дБ. Структурну схему модуля бездротового зв'язку на базі системи-на-кристалі nRF82540 з основними інтерфейсами підключення показано на рис. 6.

Запропоновані три елементи мережі – вимірювальний мультисенсорний вузол, координатор мережі, вузол керування, які дають можливість побудувати декілька топологій мережі за принципом пікомережі. Слід зазначити, що для деяких прикладних задач координатор мережі можна замінити

смартфоном або планшетним комп'ютером зі спеціальним прикладним програмним забезпеченням, яке повністю реалізує функції координатора мережі.

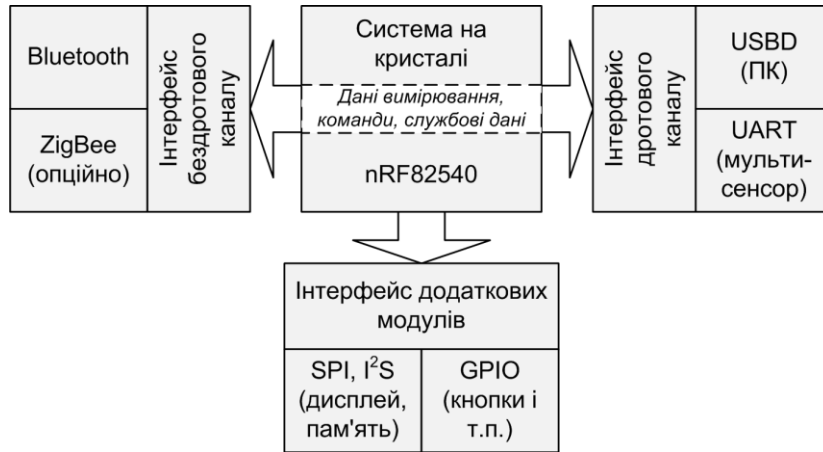


РИС. 6. Структурна схема модуля бездротового зв'язку на базі системи-на-кристалі nRF82540

**Експериментальна перевірка параметрів мережі.** Під час експериментальної перевірки оцінено гарантованість доставки повідомлення при передаванні великих масивів даних в умовах роботи мультисенсорного вузла у режимі реального часу та оцінено швидкість передавання даних або, іншими словами, пропускну здатність каналу в умовах, наближених до промислової експлуатації мережі. Для експериментальної перевірки параметрів бездротового каналу передавання даних вимірювання у реальному часі на базі протоколу Bluetooth між вимірювальним вузлом і центральним вузлом на базі двох мікроконтролерів nRF52840 було використано багатofункціональний TCP-термінал RealTerm версії 3.0.0.30. Один термінал було підключено до вимірювального вузла (nRF52840) через шину UART і використано для емуляції роботи сенсора та передавання ним даних вимірювання. Другий термінал через шину UART було підключено до центрального вузла (nRF52840). Експериментальна перевірка полягала у тому, що через перший термінал і шину UART у вимірювальний вузол подавали задану кількість числових даних різного розміру (через програмний генератор або у вигляді файлу) відповідно до визначеного формату повідомлення через задані періоди часу. Тим самим моделювали роботу мультисенсорного вузла і передавання ним вимірювань з заданою частотою. Через другий термінал реєстрували отримані дані, що надійшли до центрального вузла через протокол Bluetooth. Передані та отримані дані порівнювали, оцінювали та робили висновки.

При проведенні експериментальної перевірки гарантованості доставки достовірного повідомлення на вхід вимірювального вузла подавали файл з даними, які імітували дані вимірювання від мультисенсорного вузла. Кожний файл містив 10 тис. вимірювань. Кожне вимірювання поміщалося у пакет даних, який окрім результатів вимірювання містив службову інформацію. Кожний пакет даних поміщався у новий рядок файлу і розмір пакета складав від 3 до 10 байт. Кожний рядок файлу передавали бездротовим каналом до центрального вузла (координатора чи ПК) через однакові проміжки часу, які дорівнювали наперед визначеним значенням від 2 до 500 мс.

Для кожного розміру пакета даних та часу між надсиланням пакетів виконано по три спроби експерименту. Тривалість кожного експерименту залежно від часу між передаванням пакетів даних наведено у табл. 6.

ТАБЛИЦЯ 6. Тривалість експерименту залежно від часу між передаванням пакетів даних

Час між передаванням пакетів даних, мс	2	5	10	20	50	100	500
Тривалість експерименту	20 с	50 с	1 хв 40 с	3 хв 20 с	8 хв 20 с	16 хв 40 с	83 хв 20 с

На центральному вузлі дані отримувалися і записувалися у файл. Далі значення з переданого і отриманого файлів порівнювали та підраховували кількість недоставлених або пошкоджених пакетів. Кількість недоставлених або пошкоджених пакетів для трьох спроб кожного експерименту усереднювали і прирівнювали до більшого цілого числа. Експеримент проводили при прямій видимості між центральним і вимірювальним вузлами. Зведені дані, які отримано при експериментальній перевірці з штатними налаштуваннями протоколу Bluetooth і бездротових модулів, наведено в табл. 7. В дужка біля кількості втрачених або пошкоджених пакетів вказано відсоток цих пакетів до загальної кількості переданих пакетів.

ТАБЛИЦЯ 7. Результати експериментальної перевірки параметрів мережі з штатними налаштуваннями протоколу Bluetooth і бездротових модулів

Розмір пакета даних, байти	Час між передаванням пакетів, мс			
	500	100	50	20
3	0	0	0	1 (0,01 %)
4	0	0	4 (0,04 %)	74 (0,74 %)
6	0	0	27 (0,27 %)	148 (1,48 %)
8	0	0	71 (0,71 %)	153 (1,53 %)
10	0	0	94 (0,94 %)	172 (1,72 %)

Для підвищення надійності роботи бездротового каналу оптимізовано параметри буферу вхідних і вихідних повідомлень бездротового каналу як на головному пристрої, так і на вимірювальному мультисенсорному вузлі. Порядок виконання експериментальної перевірки зі зміненими налаштуваннями, включаючи оцінювані параметри і кількість спроб експерименту, був такий же, як і у попередньому випадку. Зведені дані, які отримано при експериментальній перевірці з оптимізованими налаштуваннями протоколу Bluetooth і бездротових модулів, наведено в табл. 8. Як і раніше, в дужках біля кількості втрачених або пошкоджених пакетів вказано відсоток цих пакетів до загальної кількості переданих пакетів.

ТАБЛИЦЯ 8. Результати експериментальної перевірки параметрів мережі з оптимізованими налаштуваннями протоколу Bluetooth і бездротових модулів

Розмір пакета даних, байти	Час між передаванням пакетів, мс					
	500	100	50	20	10	5
3	0	0	0	0	753 (7,53 %)	801 (8,01 %)
4	0	0	1 (0,01 %)	35 (0,35 %)	70 (0,7 %)	702 (7,02 %)
6	0	0	6 (0,06 %)	54 (0,54 %)	83 (0,83 %)	123 (1,23 %)
8	0	0	2 (0,02 %)	94 (0,94 %)	126 (1,26 %)	359 (3,59 %)
10	0	0	53 (0,53 %)	521 (5,21 %)	806 (8,06 %)	965 (9,65 %)

Отже, при незначній оптимізації параметрів протоколу Bluetooth і бездротових модулів вдалося дещо покращити параметри мережі. Пакети передавалися без втрат, як мінімум, з інтервалом у 5 мс. При передаванні пакетів даних з різницею 5 мс і більше відбувалося тільки пошкодження деяких пакетів даних. Втрат пакетів при цьому не відбувалося.

Для покращення роботи каналу передачі даних і підвищення його пропускної здатності оптимізовано параметри алгоритму вибору і розподілу ресурсів бездротового каналу. Алгоритм розподілу ресурсів каналу налаштовано таким чином, щоб усі вільні ресурси надавалися тільки активному в даний час підключенню. При кількох одночасних підключеннях ресурси розподіляються пропорційно або відповідно навантаженню. Здійснено зміни у налаштуваннях конфігураційних файлів головного вузла, які використовують при формуванні файлу прошивки.

Зведені дані, які отримано при експериментальній перевірці з оптимізованими налаштуваннями алгоритму розподілу ресурсів бездротового каналу, наведено в табл. 9. Як і раніше, в дужках біля кількості втрачених або пошкоджених пакетів вказано відсоток цих пакетів до загальної кількості переданих пакетів.

ТАБЛИЦЯ 9. Результати експериментальної перевірки параметрів мережі з оптимізованими налаштуваннями алгоритму розподілу ресурсів бездротового каналу

Розмір пакета даних, байти	Час між передаванням пакетів, мс					
	100	50	20	10	5	2
3	0	0	0	6 (0,06 %)	96 (0,96 %)	128 (1,28 %)
4	0	0	2 (0,02 %)	3 (0,03 %)	99 (0,99 %)	152 (1,52 %)
6	0	0	25 (0,25 %)	4 (0,04 %)	124 (1,24 %)	168 (1,68 %)
8	0	0	27 (0,27 %)	1 (0,01 %)	19 (0,19 %)	39 (0,39 %)
10	0	0	1 (0,01 %)	11 (0,11 %)	145 (1,45 %)	253 (2,53 %)

Отже, оптимізація параметрів протоколу Bluetooth, бездротових модулів й алгоритму розподілу ресурсів каналу дала можливість покращити параметри мережі. Пакети передавалися без втрат, як мінімум, з інтервалом в 2 мс. При передаванні пакетів даних з різницею 2 мс і більше відбувалося тільки пошкодження деяких пакетів даних. Втрат пакетів при цьому не відбувалося.

Прототип мережі було протестовано в умовах експлуатації за розробленою у відповідності до стандарту методикою [26].

#### Висновки.

В результаті виконаних досліджень отримано такі результати:

1. Розроблено базові структури, функціональні й принципові електричні схеми мережі бездротових «розумних» мультисенсорів для контролю процесу виробництва вина.
2. Створено робочі місця для налагоджування, модифікації, тестування та програмування мережі бездротових «розумних» мультисенсорів різного призначення.
3. Розроблено прикладне програмне забезпечення для бездротових «розумних» мультисенсорів координатора та мережі бездротових «розумних» мультисенсорів.
4. Створено діючі прототипи мережі бездротових «розумних» мультисенсорів з протоколами обміну даними ZigBee та Bluetooth 5.
5. Створено конструкторську документацію для впровадження мережі бездротових «розумних» мультисенсорів у харчову промисловість.
6. На базі міжнародних стандартів розроблено методику тестування мережі бездротових «розумних» мультисенсорів, за якою виконано тестування параметрів прототипу мережі в умовах, наближених до умов експлуатації.

#### Список літератури

1. Romanov V., Galelyuka I., Antonova H., Kovyrova O., Hrusha V., Voronenko O. Application of wireless sensor networks for digital agriculture. Proceeding of the 10th IEEE International conference on «Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications», IDAACS'2019. Metz, France, September 18–21, 2019. P. 340–344. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1109/IDAACS.2019.8924267>

2. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O. Wireless Smart Biosensor for Sensor Networks in Ecological Monitoring. Proceeding of the 9th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2017. Bucharest, Romania. 2017, September 21–23. P. 679–683. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095177>
3. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O., Brayko Yu., Imamutdinova R. Wireless sensor network for precision farming and environmental protection. *Information theories and applications*. **24** (1). Sofia, Bulgaria. 2017. P. 19–34.
4. Подпратов Г.І., Скалецька Л.Ф., Сеньков А.М., Хилевич В.С. Зберігання і переробка продукції рослинництва. К.: Мета, 2002. 495 с.
5. ДСТУ 4805:2007 Виноматеріали оброблені. Загальні технічні умови.
6. ГН 6.6.1.1-130–2006 Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді. Державні гігієнічні нормативи, затверджені наказом МОЗ України від 03.05.2006. № 256.
7. Антонова Г.В., Бабенко Є.В., Вороненко О.В., Галелюка І.Б., Кедич А.В., Ковирьова О.В. Біосенсорні прилади у виробництві алкогольних і безалкогольних напоїв. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2021. 3. С. 103–114. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.21.3.9>
8. Дзядевич С.В., Солдаткін О.П. Наукові та технологічні засади створення мініатюрних електрохімічних біосенсорів. К.: Наукова думка, 2006. 256 с.
9. Шкотова Л.В., Солдаткін А.П., Дзядевич С.В. Адаптація амперометрического ферментного біосенсора для аналізу глюкози в винах. *Український біохімічний журнал*. 2004. **76** (3). С. 114–121.
10. Шкотова Л.В., Сластья Е.А., Жиликова Т.А., Солдаткін О.П., Шуманн В., Дзядевич С.В. Амперометричний біосенсор для аналізу етанолу у вині та у виноградному суслі в процесі його ферментації. *Український біохімічний журнал*. 2005. **77** (1). С. 96–103.
11. В.О. Романов. Вимоги до сенсорних вузлів у системах Інтернету речей. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2018. 17. С. 5–9. [http://www.dasd.com.ua/kzms/2018/2018\\_st1.pdf](http://www.dasd.com.ua/kzms/2018/2018_st1.pdf)
12. Beavers I. Intelligence at the Edge Part 1: The Edge Node. <https://www.analog.com/en/technical-articles/intelligence-at-the-edge-part-1-the-edge-node.html> (звернення: 03.03.2023)
13. Beavers I. Intelligence at the Edge Part 2: The Edge Node. <https://www.analog.com/en/technical-articles/intelligence-at-the-edge-part-2-reduced-time-to-insight.html> (звернення: 03.03.23)
14. 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 book "Recent advances in Information Technology" (Editors: Waldemar Wojcik and Jan Sikora), CRC Press/Balkema, 2017. P. 105–134.
15. [www.analog.com/ADuCM350](http://www.analog.com/ADuCM350) (звернення: 03.03.2023)
16. [www.analog.com/ADuCM5933](http://www.analog.com/ADuCM5933) (звернення: 03.03.2023)
17. Палагін О.В., Романов В.О., Галелюка І.Б., Вороненко О.В., Груша В.М., Ковирьова О.В., Антонова Г.В., Лаврентьев В.М., Брайко Ю.О., Імамутдінова Р.Г. "Розумні" сенсорні мережі: від ідеї до ринку. XII Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 18–20.
18. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір "Комп'ютерна програма "Отримання даних з бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану біологічних об'єктів". / Галелюка І.Б., Романов В.О., Вороненко О.В., Антонова Г.В. № 79447 від 30.05.2018.
19. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір "Комп'ютерна програма "Програмне забезпечення координатора бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану біологічних об'єктів". / Галелюка І.Б., Романов В.О., Вороненко О.В. № 79763 від 13.06.2018.
20. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір "Комп'ютерна програма "Програмне забезпечення пристрою спряження ZigBee/USB бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану біологічних об'єктів". / Галелюка І.Б., Романов В.О., Вороненко О.В. № 79764 від 13.06.2018.
21. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір "Комп'ютерна програма "Програмне забезпечення вузла бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану біологічних об'єктів". / Галелюка І.Б., Романов В.О., Вороненко О.В. № 79765 від 13.06.2018.
22. Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O., Kovyrova O., Dzyadevych S., Shkotova L. Wireless smart multisensor networks for winemaking process control. *Information theories and applications*. **26** (2). Sofia, Bulgaria. 2019. P. 165–177.
23. Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O., Kovyrova O., Dzyadevych S., Shkotova L. Smart Sensors and Computer Devices for Agriculture, Food Production Process Control and Medicine. Proceeding of the 29th International Conference on Computer Theory and Applications. Alexandria, Egypt. 2019, October 29–31. P. 9–13.

24. Романов В.А., Вороненко А.В., Галелюка І.Б. Применение беспроводных сенсорных сетей в пищевой промышленности. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2019, 18. С. 74–78. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms\\_2019\\_18\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms_2019_18_14)
25. Патент України на корисну модель № 141975. Пристрій визначення стану нативного хлорофілу. / Вороненко О.В., Галелюка І.Б., Романов В.О. Бюл. № 9 від 12.05.2020.
26. Антонова Г.В., Кедич А.В. Тестування бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2020. 3. С. 90–100. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.20.3.9>

Одержано 13.03.2023

**Романов Володимир Олександрович**,  
доктор технічних наук, завідувач відділом  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0001-6277-8756>

**Галелюка Ігор Богданович**,  
кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0003-1504-4439>

**Вороненко Олександр Володимирович**,  
молодший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0002-5022-8017>

**Ковирьова Олександра Валеріївна**,  
молодший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0003-0253-4658>

**Антонова Ганна Валеріївна**,  
молодший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
[antanna78@gmail.com](mailto:antanna78@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1876-8267>

**Кедич Анна Василівна**,  
молодший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0003-1784-4296>

УДК 681.7.08:535.3; 004.387:621.3.087.92

**В.О. Романов, І.Б. Галелюка, О.В. Вороненко, О.В. Ковирьова, Г.В. Антонова\*, А.В. Кедич**

## **Бездротові мережі «розумних» мультисенсорів та біосенсорних приладів для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю якості продуктів виноробства**

*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ*

\* Листування: [antanna78@gmail.com](mailto:antanna78@gmail.com)

Застосування інформаційних та бездротових технологій, мультисенсорних та біосенсорних пристроїв, а також сенсорних мереж на їх основі для контролю параметрів технологічних процесів у різних галузях дає можливість значно покращити якість кінцевої продукції та зменшити втрати сировини на усіх етапах виробництва та зберігання. Це стосується як промислового виробництва товарів загального вжитку, так і харчової та переробної промисловості.

В статті описано процес розробки та тестування мережі бездротових "розумних" біосенсорних пристроїв для харчової промисловості, а саме для контролю якості вина, виноматеріалів та продуктів харчування у процесі виробництва.

Розглянуто технологічний процес виробництва виноматеріалів і вина, а також параметри, які підлягають контролю. Сформульовано вимоги для "розумних" мультисенсорних пристроїв, які доцільно використовувати у таких технологічних виробництвах. Вимірювальні вузли побудовано на основі амперметричних сенсорів та вузлів бездротового передавання даних. Розроблено структурні, функціональні та принципові схеми вимірювальних пристроїв та створено конструкторську документацію для їх виготовлення на контрактних виробництвах.

Інтеграція вузлів бездротового передавання даних у вимірювальні вузли дала можливість будувати бездротові сенсорні мережі на їх основі. Розроблено кілька структур бездротових мереж, які базовано на бездротових вузлах з різною функціональністю та із застосуванням різних протоколів бездротового передавання даних. Розроблено апаратні та програмні засоби бездротових вузлів мережі.

Виконано тестування мультисенсорного вимірювального вузла в автономному режимі, а також цілої мережі у складі кількох бездротових вузлів. Результати випробувань показали як слабкі сторони розроблених пристроїв, які слід усунути при подальших дослідженнях, так і доцільність використання "розумних" мультисенсорних пристроїв та мереж на їх основі для контролю якості виноматеріалів та вина на різних етапах їх виробництва і зберігання.

Роботу виконано за підтримки та в рамках Цільової програми наукових досліджень НАН України ««Розумні» сенсорні прилади нового покоління на основі сучасних матеріалів та технологій».

**Ключові слова:** біосенсори, амперметричні перетворювачі, смарт мультисенсори, бездротові сенсорні мережі, контроль якості вина та продуктів харчування.

UDC 681.7.08:535.3; 004.387:621.3.087.92

**Volodymyr Romanov, Igor Galelyuka, Oleksandr Voronenko, Oleksandra Kovyrova, Hanna Antonova \*, Anna Kedych**

## **Wireless Networks of Smart Multisensors and Biosensor Devices for Express Diagnostics of the State of Grape and Fruit-Berry Crops and Quality Control of Winemaking Products**

*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv*

\* Correspondence: [antanna78@gmail.com](mailto:antanna78@gmail.com)

The application of information and wireless technologies, multisensor and biosensor devices, as well as sensor networks based on them to control the parameters of technological processes in different industries makes it possible to greatly improve the quality of final products and reduce losses of raw materials at all stages of production and storage. This covers both the industrial production of consumer goods and the food and processing industry.

The article describes the developing and testing of network of wireless smart biosensor devices for food industry, namely for controlling the quality of wine, wine materials and food products in the production process.

It is considered the technological process of production of wine materials and wine, as well as parameters that are subject of controlling. The requirements for smart multisensor devices, which are reasonable to use in such technological productions, are formulated. Measuring nodes are built on the basis of amperometric sensors and wireless data transmission units. Structural, functional and principle schemas of measuring devices were developed. The design documentation was created for their production at contract manufactures.

The integration of wireless data transmission units into measuring nodes made it possible to build wireless sensor networks based on them. Several structures of wireless networks were developed on the base of wireless nodes with different functionality and with using of different wireless data transmission protocols. Hardware and software for wireless network nodes were developed.

It was fulfilled the testing of the multisensor measuring node in autonomous mode, as well as the whole network consisting of several wireless nodes. The test results showed both the weaknesses of the developed devices, which should be eliminated in further researches, and the reasonability of using smart multisensor devices and networks based on them to control the quality of wine materials and wine at different stages of their production and storage.

The work was performed with the support and within the Complex program of scientific research of the National Academy of Sciences of Ukraine "Smart" sensor devices of the new generation based on modern materials and technologies."

**Keywords:** biosensors, amperometric transducers, smart multisensors, wireless sensor network, wine and food quality control.