

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.7.08:535.23

DOI:10.34229/2707-451X.21.3.9

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

БІОСЕНСОРНІ ПРИЛАДИ У ВИРОБНИЦТВІ АЛКОГОЛЬНИХ І БЕЗАЛКОГОЛЬНИХ НАПОЇВ

Вступ. В процесі виробництва продуктів харчування, важливим етапом є моніторинг компонентів які беруть участь в технологічних процесах. Умови сучасної ринкової економіки підштовхують учасників товарного виробництва шукати більш ефективні рішення, з точки зору економії ресурсів і при цьому відповідати всім технологічним стандартам і нормам. Розвиток сучасних технологій на основі останніх досягнень у біофізиці і матеріалознавстві дає можливість використовувати нові підходи і методи для моніторингу та контролю якості в багатьох виробничих процесах. Все частіше, виробничий процес, на етапі збору інформації для вироблення управлінського рішення відмовляється від дорогих, громіздких лабораторних приладів та інструментів на користь більш швидких і дешевих біосенсорних методів.

«Розумні» мультисенсори та біосенсорні системи на основі сучасних інформаційних і комунікаційних технологій дають можливість якісно поліпшити 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 інших областях діяльності людини. Такі прилади нового покоління об'єднують біологічні чутливі елементи з перетворювачами біофізичних сигналів в електричні цифрові сигнали.

Зазначимо, що сенсорні технології відносять до ключових світових технологій, розвиток яких відбувається експоненціально, тобто параметри цих технологій покращуються на десятки чи навіть сотні процентів за рік при тому ж рівні вартості. А якщо при цьому можливе використання таких технологій сумісно з іншими технологіями, наприклад, інформаційно-комунікаційними, то відбувається запрограмований технологічний вибух.

Так, наприклад, ринок сенсорів за 10 років з 2007 року виріс у тисячу разів, а їх вартість зменшилася в тисячу разів. Це найкращим чином демонструє успіхи в розвитку біосенсоріки.

Розкрито основні принципи побудови біосенсорних приладів, їх практична реалізація та застосування. Представлені власні результати розробки бездротових мереж «розумних» мультисенсорів та біосенсорних приладів для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю процесу виробництва вина. Виконано огляд та аналіз сучасних біосенсорних пристроїв, які застосовуються у виробництві алкогольних та безалкогольних напоїв.

Ключові слова: біосенсори, амперометричні перетворювачі, бездротові сенсорні мережі, експрес-діагностика стану виноградних і плодоягідних культур.

© Г.В. Антонова, Є.В. Бабенко,
О.В. Вороненко, І.Б. Галелюка,
А.В. Кедич, О.В. Ковирьова, 2021

Таким чином, розробка та підготовка до серійного виробництва «розумних» біосенсорів, біосенсорних приладів і мереж на їх основі знаходиться у руслі світових науково-технічних тенденцій сьогодення і, безсумнівно, недалекого майбутнього. Це передбачає побудову нових підходів до створення «розумних» біосенсорів на широкій базі біофізичних і електрохімічних ефектів, використання комп'ютерних і комунікаційних мереж для охоплення максимальної кількості об'єктів і виробничих процесів у харчовій промисловості, цифровому сільському господарстві, моніторингу стану довкілля тощо.

Мета – розглянути основні класи біосенсорів, їх склад та принцип роботи. Навести результати розробки вбудованого програмного забезпечення для мікропроцесора ADuCM350. Описати мережеве рішення «розумних» мультисенсорів та біосенсорних приладів для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю процесу виробництва вина. Проаналізувати ринок виробників біосенсорів. Порівняти аналізатори для різних досліджень на основі біосенсорів.

1. Загальні відомості про біосенсор: визначення, склад, принцип роботи. Біосенсор – це автономний інтегральний аналітичний прилад, який забезпечує кількісний чи напівкількісний аналіз, з використанням біологічного розпізнавального елемента, що знаходиться у прямому контакті з фізичним перетворювачем [1].

Найважливіші характерні ознаки біосенсорів – високі чутливість і селективність, простота використання, швидкість аналізу, широкий діапазон речовин, які можна детектувати. Це визначає можливість, а швидше необхідність, їх застосування практично в усіх галузях людської діяльності, включаючи медицину, фармацевтичну, харчову, біотехнологічну та хімічну промисловість, сільське господарство, охорону довкілля тощо. Порівняно з існуючими аналітичними методами біосенсори здатні забезпечувати швидкий, надійний, чутливий і дешевий аналіз різноманітних сполук.

Біосенсор завжди складається з двох основних частин – біоселективного елемента, що відповідає за розпізнавання і трансляцію інформації з біологічного домену в хімічний чи фізичний вихідний сигнал з визначеною чутливістю, та перетворювача, який відповідає за трансляцію цього сигналу до електричного домену та його перетворення на аналітично доступну інформацію. Електрохімічні перетворювачі поділяють на амперометричні, потенціометричні та кондуктометричні [1]. Види перетворювачів біосенсора наведено в табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1

| | Види перетворювачів біосенсора | | |
|----------------------|--|--|---|
| | Амперометричні | Потенціометричні | Кондуктометричні |
| Принципи вимірювання | Визначають струм, що генерується вивільненням електронів під час окисно-відновного процесу | Вимагають вимірювання потенціалу при нульовому струмі, потенціал пропорційний логарифму концентрації аналіту | Визначають зміни провідності (властивість розчинів електrolітів) або імпеданс зарядів, викликані змінами в аналізованому середовищі |
| Матеріал електроду | Платина, золото, кисневий електрод Кларка (платиновий катод, срібний анод) | Іоноселективний електрод, наприклад скляний для виміру рН, газовий мембранний | Платина, титан |

Слід зазначити, що глюкозу можна визначити за допомогою усіх трьох перетворювачів. А для аналізу етанолу придатний лише амперометричний біосенсор [1]. Стаття написана в рамках проекту «Розробка та підготовка до серійного виробництва бездротових мереж «розумних» мультисенсорів та біосенсорних приладів для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю процесу виробництва вина» програми наукових досліджень НАН, тому зосередимо увагу саме на амперометричних біосенсорах.

Амперометричний метод ґрунтується на вимірюванні густини чи сили струму, що проходить крізь електрохімічну комірку з постійного потенціалу. Амперометрична система найчастіше складається з трьох електродів, також існують двохелектродні системи [1]. Амперометрія належить до групи електрохімічних методів досліджень. Більш загальна назва даного метода вольтамперометрія, що полягає у контролі двох параметрів: потенціалу робочого електрода і струму, що протікає через нього.

Амперометричні біосенсори поділяють на три основні класи, які наведено у табл. 2.

ТАБЛИЦЯ 2

| | Класи амперометричних біосенсорів | | |
|-----------------------|---|---|---|
| | Безмедіаторні | Медіаторні | З прямим перенесенням електронів |
| Принцип роботи | Вимірювання концентрацій природних субстратів і продуктів ферментативної реакції | Медіатори використовуються як переносники електронів з активного центра ферменту на електрод (медіатор-низькомолекулярна частинка, що переносить електрон між окисно-відновним центром ферменту та робочим електродом | Пряме перенесення електронів між активним центром ферменту та електродом (біоелектрокаталіз). Перенесення електрона з електрода на молекулу субстрату і навпаки відбувається безпосередньо через активний центр ферменту за відсутності будь-яких переносників електронів |
| Переваги | <ul style="list-style-type: none"> • Проста методика, не потребує значних часових витрат, • висока селективність, • невелика кількість ферментів, необхідних для проведення аналізу, можливість їх багаторазового використання | | <ul style="list-style-type: none"> • Висока чутливість внаслідок високої густини струму, що уможлиблює мініатюризацію електродів, • значне зменшення неспецифічних інтерферуючих відгуків |
| Недоліки | <ul style="list-style-type: none"> • Вплив на відгук біосенсора: геометрії електродів, масопереносу частинок крізь біокаталітичні і напівпроникні мембрани, • підкалібрування сенсорів через перебіг фарадеевських процесів на електродах, • врахування впливу фонового струму | <ul style="list-style-type: none"> • Низька стабільність іммобілізованих датчиків, • на характеристики сенсора впливає розчинність медіатора | – |
| Досліджувана речовина | Глюкоза, лактоза, алкоголь | Глюкоза, фруктоза, лактат, глутамат, лізин, етанол | – |

Матеріали для виготовлення амперометричних перетворювачів. Більшість з них складається з робочого електрода та матеріалу підкладки. Матеріали електродів – благородні метали: золото, платина і різні форми вуглецю, такі як графіт, активований вуглець, вуглецеве волокно. Як підкладку застосовують кераміку, ситал, скло, кремній, полістирол, полівінілхлорид.

Технології виготовлення амперометричних сенсорів: трафаретний друк, хімічне нанесення, полімеризація, плазмова полімеризація (вакуумне напилення) мікролітографія.

При створенні амперометричних біосенсорів часто використовують клас оксидаз, основні з яких це – глюкозооксидаза, лактатооксидаза, холінооксидаза, алкогольоксидаза. Також в безмедіаторних амперометричних сенсорах використовують другий клас ферментів: альдегіддегідрогіназа, алкогольдегідрогіназа, лактатдегідрогіназа, глутаматдегідрогіназа, глюкозодегідрогіназа, гліцеролдегідрогіназа.

Такі ферменти, як алкогольдегідрогеназа (АДН) і алкогольоксидаза (АО) використовуються для виявлення етанолу. Час відгуку молекули АДН одна, дві хвилини. Переваги АДН це висока стабільність і точність вимірювань, недоліком при кількісному визначенні це розчинність ферменту, який додається НАД⁺. Проблема вирішується додаванням метиленового зеленого. При вимірюванні вмісту етанолу в алкогольному напої – джин використовували одноразовий біосенсор на трафаретному друку. Для посилення стабільності АО в етаноловому сенсорі була використана гідрофобна напівтверда матриця, ферментні реактори, комплекси на скловуглецевому електроді з додаванням лактіту та позитивно зарядженого похідного декстрану. Для визначення поліфенолів, наприклад, у вині, можна використовувати амперометричний біосенсор з ферментом тирозиназою, який є каталізатором окислення фенолів до хінонової форми. Реакція відновлення відбувається на поверхні графіту, поляризованої при – 200 мВ, у порівнянні з контрольним електродом Ag/AgCl. Оскільки багато мікроорганізмів можуть використовувати етанол або метанол як джерело вуглецю і енергії, стає можливо, встановити засвоєння алкоголю використовуючи дихальну активність мікроорганізмів. Їх дихальна активність безпосередньо може бути виміряна кисневим електродом. Таким чином, можливе створення мікробного біосенсора для аналізу вмісту спиртів з використанням іммобілізованих мікроорганізмів і кисневого електрода. Це може бути мікробний електрод з іммобілізованою культурою дріжджів або бактерій на тефлоновій мембрані, яка здатна пропускати CO₂, і кисневий електрод підготовлений для вимірювання етанолу або метанолу. Метод дає можливість безперервного визначення вмісту спирту в середовищі, надійність методу перевірена методом газової хроматографії.

Потенційні компоненти, які можуть бути досліджені за допомогою біосенсорів можна розділити на групи: спирти, феноли (етанол, метанол, ацетальдегід, фенол, складні ефіри гліцерину, катехін); органічні речовини і кислоти (оцтова, мурашина, глюконова, ізоцітронова, аскорбінова, молочна, яблучна, щавелевооцтова, піровиноградна, янтарна або нітріоцтова кислота, амінокислоти, аміни, аміди, цукри, кофактори, гази, важкі метали, мутагени, вітаміни, антибіотики); неорганічні кислоти (сульфати і сульфіді) [2].

Найбільші області застосування, це область клінічних випробувань у фармакології та медицині, такі як вимір метаболітів, інсулінотерапія діабету. Екологічні випробування, військове застосування та моніторинг, експрес-тести на наявність забруднень у повітрі, воді та ґрунті. Сільське господарство не менш важлива область застосування, де проводяться аналізи та виміри в тваринництві і рослинництві. Тестування ряду процесів у харчовій промисловості, як процеси ферментації і аналіз при виробництві продуктів харчування і напоїв.

2. Результати розробки біосенсора для визначення якості вина та засоби передачі і обробки інформації. Мета проекту «Розробка та підготовка до серійного виробництва бездротових мереж «розумних» мультисенсорів та біосенсорних приладів для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю процесу виробництва вина» є розробка «розумних» біосенсорних приладів і мереж на їх основі. Згідно отриманих результатів на попередніх етапах проекту та вивчення процесу амперометричного вимірювання біохімічних реакцій, побудований багатоканальний блок вимірювання для роботи з різними амперометричними біосенсорами на базі мікроконтролера компанії Analog Devices – ADuC350 [3].

З метою перевірки можливостей блока вимірювання (БВ) проведено ряд експериментальних робіт. Для виконання таких робіт перш за все було необхідно розробити нове вбудоване програмне забезпечення (ВПЗ) для мікропроцесора компанії Analog Devices ADuCM350, та відповідного програмного забезпечення користувача для операційної системи Windows 10. Інтерфейс користувача на ОС Windows 10 показано на рис. 1.

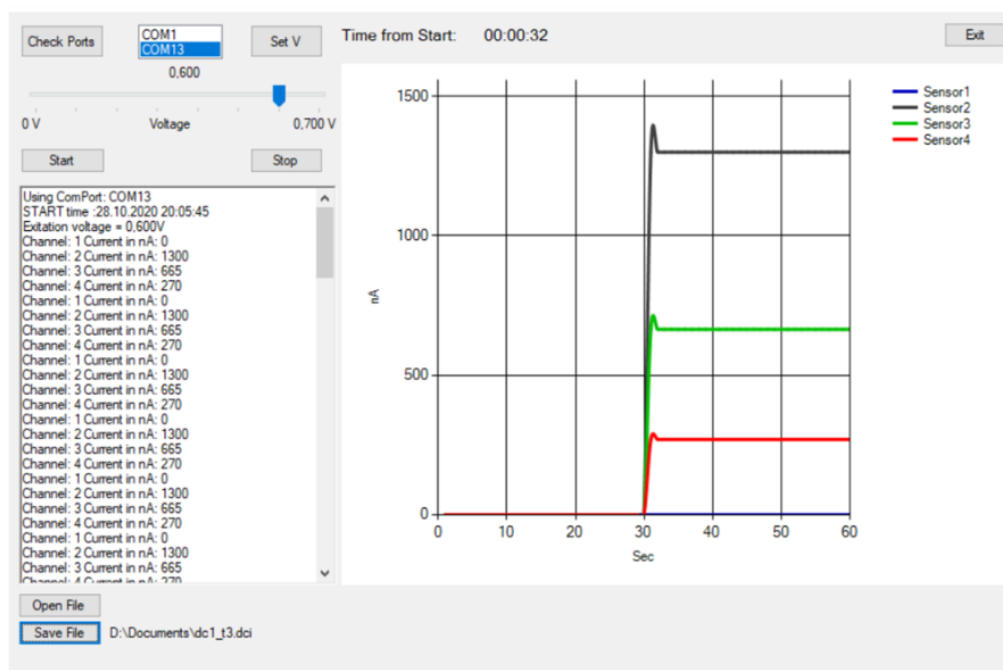


РИС. 1. Інтерфейс користувача на ОС Windows 10

Сформульовано вимоги до ПЗ користувача на ОС Windows 10:

- фізичний порт під'єднання – USB;
- ініціалізація БВ в ОС Windows 10;
- підтримання двостороннього зв'язку між ПК користувача та БВ;
- виконання команд користувача – «СТАРТ», «СТОП», встановити напругу збудження сенсора;
- відображення процесу вимірювання;
- збереження даних вимірювання у файльовій системі Windows 10 для подальшого аналізу.

Відповідно до вимог ПЗ користувача на ОС Windows 10 сформовані вимоги до вбудованого ПЗ ADuCM350.

Додатково необхідно було: зменшити час однієї вибірки вимірювання, виконати необхідну комутацію каналу вимірювання, виконати цифрову фільтрацію результату вимірювання від випадкових впливів, кодування даних вимірювання та інше.

Розроблене ВПЗ надає змогу:

- багатоканального вимірювання із 100 вимірюваннями за одну секунду для кожного каналу;
- встановлення напруги збудження від 0 до 0,7 вольт;
- вимірювання від 0 до 75000 нА з похибкою ± 3 нА;
- автоматичного початку вимірювання.

Для виконання експериментальних досліджень створено робоче місце експериментатора, рис. 2.

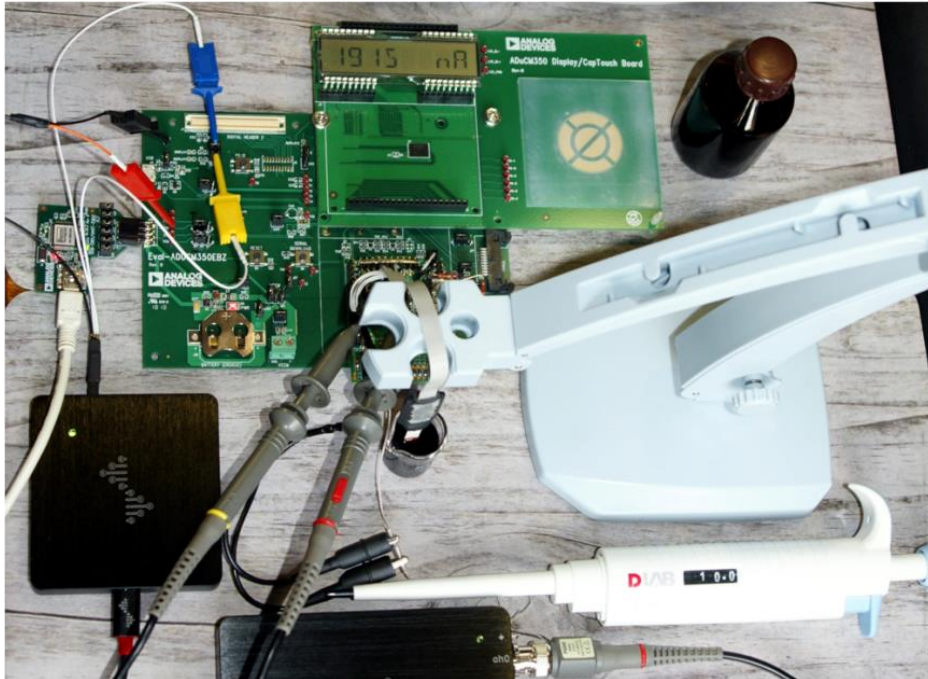


РИС. 2. Робоче місце для проведення експериментальних робіт

Проведено експерименти з використанням одноразових сенсорів на основі ферменту глюкозооксидази для вимірювання вмісту цукру у розчині глюкози та вина, результати наведено на рис. 3 та 4, відповідно.

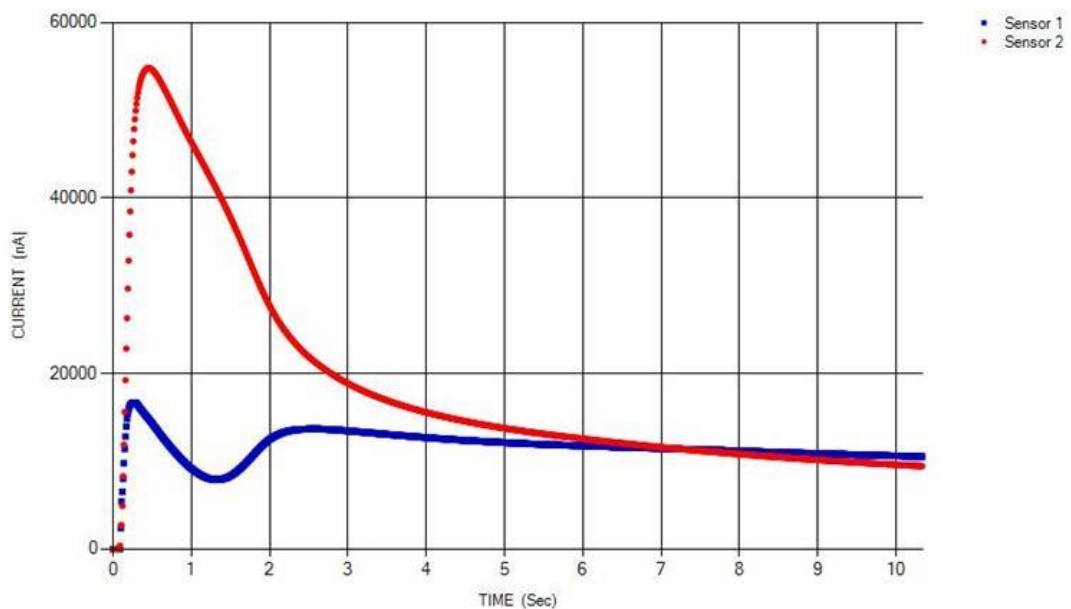


РИС. 3. Експериментальні дані результату вимірювання цукру у розчині глюкози 5°Bx

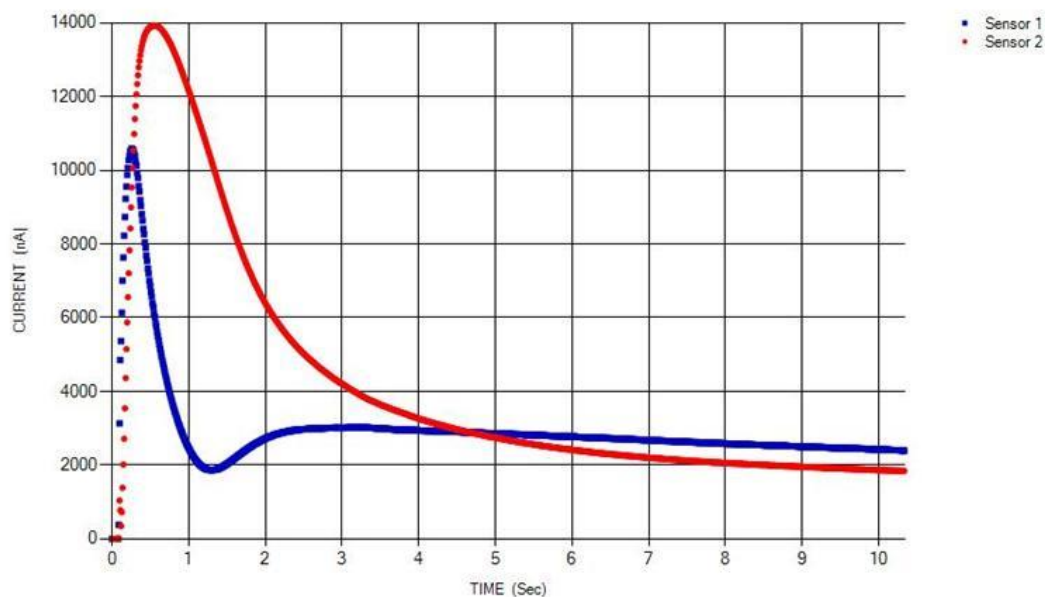


РИС. 4. Експериментальні дані результату вимірювання цукру у вині 7°Vrx

Мережеве рішення. 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, I²S та ряд інших. Серед аналогових входів передбачено 8-канальний блок 12-бітних АЦП з програмованим коефіцієнтом підсилення, 4-канальний контролер ШІМ, вхід аудіо-сигналу, 48 входів/виходів загального призначення. Також у модулі nRF82540 наявні 2 порти UART з підтримкою EasyDMA. Оперативна пам'ять складає 256 Мб, а флеш пам'ять – 1 Мб. Для досягнення кращих показників споживання енергії у системі на кристалі реалізовано кілька енергоефективних технологій, зокрема, апаратне ділення, технологія SIMD на базі 8- і 16-бітних інструкцій та ряд інших. Для захисту даних у систему-на-кристалі інтегровано співпроцесор для підтримки технології шифрування AES та кількох супутніх технологій. Для реалізації операцій бездротового обміну даними «розумних» біосенсорів та створення бездротової мережі на базі цих біосенсорів [4, 5] вибрано протокол Bluetooth 5, який має кілька позитивних особливостей у сукупності з апаратними засобами системи-на-кристалі. Структурну схему модуля бездротового зв'язку на базі системи-на-кристалі nRF82540 з основними реалізованими для нашої прикладної задачі інтерфейсами підключення: інтерфейс бездротового каналу, інтерфейс дротового каналу, інтерфейс додаткових модулів – опубліковано в [5]. Підключення тих чи інших інтерфейсів дає можливість побудувати різні вузли мережі.

3. Огляд ринку біосенсорів. Багато компаній на світовому ринку пропонують свої рішення для аналізу і контролю стану водних ресурсів, продуктів харчування на етапі виробництва безалкогольних та алкогольних напоїв, огляд яких наведено у табл. 3.

ТАБЛИЦЯ 3

| Компанія | Аналіз води | Аналіз продуктів | Виробництво напоїв | Пивоваріння | Виноробство |
|----------------------------|-------------|------------------|--------------------|-------------|-------------|
| HACH | • | • | • | • | • |
| PalmSens | • | • | | | |
| BST | | | | | • |
| BVT Technologies | • | | • | • | • |
| ItalSens | • | | | | • |
| Micrus Technologies | • | | | | • |
| Rusens | • | | • | | • |
| Z&P | • | | | | • |
| eDAQ | • | | • | | • |
| Pico Technology | • | | • | | |
| Bioanalytical Systems Inc. | • | | • | | |
| C-Tech Innovation | • | | | | |
| Photon Systems Instruments | • | | | | |

Об'єднання HACH пропонує, виготовляє і дистрибутує комплексні рішення, набори тестів і реагентів для аналізу якості води та продуктів на різних циклах виробництва напоїв. Рішення можуть бути використані для моніторингу води, що поступає у режимі реального часу, на виробничих лініях у харчовій промисловості. Компанія допомагає контролювати якість напоїв на підприємстві, від пивоваріння і неалкогольних напоїв до упакованої води і вина. Компанія пропонує портативні паралельні аналізатори (Portable Parallel Analyzers – PPA) для аналізу якості води шляхом одночасного колориметричного і електростатичного вимірювання. Компанія надає ключ-електрод, який має пояснення до результатів вимірювань Chemkey та містить релевантні реагенти і шкалу показань вимірювання. Розширений спектр вимірювань на монохлорамін Cl_2 (0,04 – 4,00 мг/л), загальний хлор (до 10 мг/л), комбінований вільний NH_3-N (0,05 – 0,50 мг/л) і загальний аміак, для високих концентрацій (20 – 750 мг/л $CaCO_3$). Спеціалізовані вимірювання на вміст нітритів NO_2-N (0,005 – 0,600 мг/л), ортофосфорні сполуки PO_4 (0,20 – 30,0 мг/л), наявності лужних з'єднань $CaCO_3$, з'єднань міді Cu (0,06 – 5,00 мг/л), концентрацію пероцетової кислоти PAA (0,04 – 50,0 мг/л), рН розчинів від 6,3 до 9,0. Лінійку портативних приладів доповнюють портативний спектрофотометр DR1900 (340 – 800 нм), кишеньковий колориметр DR300 з можливістю аналізу на присутність хлору Cl_2 , заліза Fe , бромиду Br_2 , розчиненого кисню O_2 , озону O_3 , цинку Zn , молібдену Mo , марганцю Mn , алюмінію Al , аміаку NH_3-N , оксиду хлору ClO_2 . Ручні, цифрові титратори дають можливість аналізувати вісімнадцять параметрів зі спеціальними титруючими розчинами у вигляді змінних картриджів. Спектральний колориметр з більш ніж 25 кольорними спектральними шкалами виміру. Портативний прилад для вимірювання мутності води зі швидким режимом осадження частинок дає можливість проводити точне вимірювання зразків осаду [6].

PalmSens Компанія представляє серійні потенціостати, які відрізняються параметрами, а саме: одноканальні потенціостати (PalmSens4, EmStat4S, EmStat3 Blue), мультиканальні потенціостати (від 4 до 10 каналів) (MultiPalmSens4, MultiEmStat3), потенціостати для смартфонів та планшетів (Sensit Smart, Sensit BT), потенціостати з вбудованим мультиплексером (EmStatMUX8-R2). На сайті компанії, в розділі електроди на трафаретному друку, представлені їх навчальні набори електродів і сенсорів та продукція інших брендів. Таких, як BST, BVT Technologies (електрохімічний сенсор, сенсорацетилхолінестерази, сенсор глюкози, індивідуальні сенсори і електроди), ItalSens, Micrus Technologies, Rusens, Z&P (набори для визначення глюкози). Аналізовані речовини

і домішки – важкі метали, миш'як, глюкоза, пероксид водню, пестициди. У розділі класичні електроди, які широко використовуються в електрохімічних дослідженнях, наприклад, електроди порівняння Ag/AgCl, електроди з платинового дроту та металеві, полірований скловуглецевий диск [7]. Також на сайті **PalmSens** представлений асортимент таких виробників як BASI, BVT Technologies, ItalSens та інші.

Zahner scientific instruments пропонує універсальну фото- та спектро-електрохімічну портативну робочу станцію з широким спектром застосування. Набір з потенціостата, зонда малого ємнісного опору femto-Farad Probe, мікроелектромеханічної системи (MEMS), сенсорів, нано-електродів [8]. Також доступні зовнішні потенціостати для розширення електрохімічних робочих станцій.

eDAQ для вимірювання глюкози використовує метод циклічної вольтамперометрії ферроцен-карбонатної кислоти (FCA) у водному розчині в присутності глюкози і глюкозооксидази (GOx). Синій сигнал приладу вказує на відсутність глюкози. Глюкоза окислюється електрохімічно згенерованим Fe(III) у FCA⁺, що постійно генерується електродом в окислювальних умовах. Величина анодного струму залежить від концентрації ферменту і глюкози. Амперометричні датчики зазвичай призначені для роботи при певному поляризаційному потенціалі (напрузі). Результуючий струм вимірюється і залежить від концентрації субстрату [9]. Деякі біосенсори включають у себе біоактивні матеріал, іноді сенсорний шар, що містить фермент, який використовується для каталізу певної реакції, перетворює аналітичну речовину в субстрат, який згодом може бути вимірним датчиком. Представлені термопари і датчики RTD, вимірюють рН, окислювально-відновлювальний потенціал, заглиблювальні або проточні датчики провідності, для визначення кисню – гальванічні або полярографічні датчики.

PicoTechnology пропонує проведення і супровід дослідних вимірювань з використанням різних датчиків та їх обладнання, перетворювачів і програмного забезпечення в лінійці продукції PicoScore. Наприклад, перевірка рН звичайних напоїв з використанням датчика-зонда DrDAQ як рН-метра та рестратора. Попит на такі вимірювання обумовлені тим, що останнім часом стоматологи все частіше попереджають про небезпеку вживання кислих напоїв. Спортивні напої, теж відносяться до категорії ризику і підлягають контролю кислотності. Ці дослідження можуть бути використані як введення в подальші дослідження карієсу та процесів руйнування емалі [10].

Bioanalytical Systems, Inc. (BASi) надає послуги контрактних досліджень, критичного тестування у таких галузях, як електрохімія і мас-спектрометрії, унікальні можливості з вивчення рідин і напіврідких розчинів. Інструменти, як автоматизована система відбору проб BASiCulexNxt, використовуються в лабораторіях по всьому світу. Друге підприємство компанії працює на задоволення потреб до клінічних досліджень в області токсикології і ветеринарії [11].

Photon Systems Instruments (PSI) – один з флагманів на ринку інновацій у керуючих системах представляє продукт з лінії портативних біосенсорних приладів PolyPen-Akva [12] портативний спектрофотометр, призначений для вимірювання світових спектрів у суспензіях. Прилад використовується для досліджень у різних сферах, таких як біотехнологія, екологія, молекулярна біологія, хімія, судова медицина та т. п. Пристрій підходить як для лабораторних, так і для польових робіт, має вбудований GPS модуль. Вимірює спектри поглинання і пропускання світла на основі однопроменевого методу, діапазон становить 380 – 790 нм і 640 – 1050 нм. Існує можливість визначення параметрів, що розраховуються користувачем на основі вимірних спектрів. Вимірювання оптичної щільності проводять при 600 нм, 680 нм, 720 нм і 750 нм.

BVT Technologies – пропонує [13] модульну технологічну установку для керування процесом пивоварного виробництва. Компанія працює над створенням і впровадженням функціонального приладу для відбору проб та швидкого визначення концентрації мальтози, який буде використову-

ватися в пивоварінні. Блок попередньої обробки проб, дозволяє підключати додаткові датчики-аналізатори (діацетил, спирти, спектрометричні вимірювання і т. п.). Лабораторний блок складається з двох автономних блоків, аналізатора і пробопідготовки. Остання може бути використана автономно. Ще один діючий проект компанії це рухома, автономна, плавуча платформа з автономною навігаційною системою для моніторингу води в озерах, яка призначена для раннього виявлення катастроф. Може бути використана для повсякденних вимірювань та оцінки дослідних параметрів з метою визначення якості води в озерах, створених рекультивацією колишніх промислових майданчиків, а також у більш дрібних водоймах. Платформа також дозволить офіційним органам і особам, які відповідальні за обслуговування водойм, виконувати вчасно основні роботи з технічного обслуговування об'єктів.

Фірма Analox Analyzers пропонує аналізатор глюкози GM9 автономну систему для аналізу глюкози в плазмі та інших рідинах, також доступні реагенти та набори для використання з GM9, щоб забезпечити надійні та відтворювані результати. Прилад може використовуватися для дослідження метаболічних захворювань, у біохімічних дослідженнях, у дослідженнях цукрового діабету.

Аналізатор алкоголю AM1 – це автономна система для аналізу алкоголю у плазмі та інших рідинах. Може використовуватися для моніторингу змін у виробництві продуктів харчування та напоїв, включаючи пиво та вино [14].

Компанія Dr. Müller Gerätebau GmbH. SUPER GL2 призначений для використання в лабораторіях, дозволяє одночасно вимірювати глюкозу та лактат з одного зразка. За допомогою спеціального датчика глюкози пристрій перевіряє вплив небезпечних речовин на глюкозу.

За допомогою компактного приладу SUPER GL можна одночасно вимірювати глюкозу, лактат і гемоглобін, а пристрій також показує значення глюкози в плазмі. Може одночасно вимірювати 30 зразків.

SUPER GL speedy може одночасно вимірювати 60 зразків. Як і у всіх аналізаторах, що використовують ферментативно-амперометричний принцип вимірювання, попередній аналіз досить простий. Потрібно лише кілька мкл капілярної крові, взятої з подушечки пальця за допомогою наскрізного або відкритого капіляра. Ці зразки розводять, використовуючи певну кількість розчину в чашці для зразків, і гемолізують, а потім можуть негайно виміряти. Приблизно через одну хвилину після взяття крові ви отримаєте результат. Компанія Dr. Müller Gerätebau виробляє ряд приладів для аналізу глюкози [15].

Біохімічний аналізатор YSI 2900D дозволяє отримати результат аналізу за 60 секунд або менше в автоматичному режимі, має інтуїтивно зрозумілий графічний користувальницький інтерфейс, USB-порт для отримання даних та можливість вимірювати зразки з різних тримачів зразків, включаючи 96 лунок та мікропроцентні пробірки. Можуть бути виміряні наступні речовини: глюкоза, лактат, глютамін, глутамат, ксиліоза, етанол, метанол, сахароза, галактоза, лактоза, перекис водню [16].

Глюкозометр дозволяє вимірювати амперометрію, потенціометрію, кондуктометрію та електрохімічну імпедансну спектроскопію. Він включає в себе повноцінний персональний комп'ютер з сенсорним екраном. Можна керувати за допомогою бездротової клавіатури або миші. Може використовуватися для керування іншими пристроями. Дані можна передавати на персональний комп'ютер через Інтернет, Bluetooth або за допомогою флеш-диску. Базується на модулі PalmSens EmStat Pico. Пристрій в основному пропонується для використання як блок керування в експериментах з мікродіалізом [17].

На основі огляду зроблено порівняльну таблицю аналізаторів для різних досліджень на основі біосенсорів, що наведено у табл. 4.

ТАБЛИЦЯ 4. Аналізатори для досліджень на основі біосенсорів

| № | Назва приладу | Субстрат | Область вимірювань, mg/dl | Діапазон робочих температур, °C | Вага, кг |
|---|---------------|----------|---------------------------|---------------------------------|----------|
| 1 | AM1 | Етанол | 85 | до 30 | 5,9 |
| 2 | GM9 | Глюкоза | 540 | 30 | 6 |
| 3 | GL5 | Глюкоза | 540 | 30 | 6 |
| | | Лактат | 90 | | |
| | | Етанол | 200 | | |
| 4 | Super GL2 | Глюкоза | 9,01 – 900,8 | 15 – 35 | 8 |
| | | Лактат | 4,5 – 270 | | |
| 5 | YSI 2900D | Глюкоза | 5 – 2500 | 15 – 35 | 12,7 |
| | | Лактат | 5 – 270 | | |
| | | Етанол | 4 – 320 | | |
| | | Метанол | 1 – 250 | | |

Висновки. Розглянуто основні класи біосенсорів, їх склад та принцип роботи. Наведено результати розробки вбудованого програмного забезпечення для мікропроцесора ADuCM350. Описано мережеве рішення «розумних» мультисенсорів та біосенсорних приладів для експрес-діагностики стану виноградних і плодоягідних культур та контролю процесу виробництва вина. Проаналізовано ринок виробників біосенсорів. Виходячи з вищевикладеного аналізу, можна виділити декілька основних тенденцій, націлених на розвиток сегменту. Ринок виробників електродів і біосенсорів досить обмежений основними гравцями ринку. Важливо підкреслити чіткі тенденції зростання потреб ринку в подібній продукції, у першу чергу, потребу в готових рішеннях для конкретного виробництва, систем моніторингу окремо взятого технологічного процесу. В найближчий час в зв'язку зі змінами в економіці виробництва та споживання очікується і подальше зростання ринку рішень на основі біосенсорів приладів, так і попиту на подібні комплексні рішення. Також зроблено порівняльний аналіз аналізаторів для різних досліджень на основі біосенсорів.

Список літератури

1. Дзядевич С.В., Солдаткін О.Л. Наукові та технологічні засади створення мініатюрних електрохімічних біосенсорів. Київ: "Наукова думка", 2006. 255 с.
2. <https://fchi.vscht.cz/veda-a-vyzkum/vyznamne-publikace> (звернення: 01.06.2021)
3. www.analog.com/ADuCM350 (звернення: 25.06.2021)
4. 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. <http://www.foibg.com/ijita/vol26/ijita26-02-p05.pdf>
5. Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O., Kovyrova O., Dzyadevych S., Shkotova L. Multisensor prototype for beverage quality control: principle scheme and test results. *Information Theories and Applications*. **27** (1). Sofia, Bulgaria. 2020. P. 82–92. <http://www.foibg.com/ijita/vol27/ijita27-01-p01.pdf>
6. <http://www.hach.com> (звернення: 05.07.2021)
7. <http://www.palmsens.com> (звернення: 05.07.2021)
8. <http://www.zahner.de> (звернення: 05.07.2021)
9. http://www.edaq.com/files/eDAQ_catalog.pdf (звернення: 05.07.2021)
10. <http://www.picotech.com> (звернення: 05.07.2021)
11. <http://www.basinc.com> (звернення: 05.07.2021)
12. <http://handheld.psi.cz/products/polypen-aqua> (звернення: 05.07.2021)
13. <http://bvt.cz/present-projects/fv30332-pivo> (звернення: 05.07.2021)
14. <https://www.analox.com/analysers/> (звернення: 05.07.2021)
15. <https://www.dr-mueller-geraetebau.de/en/products/> (звернення: 05.07.2021)
16. <https://www.ysi.com/ysi-2900-nutrient-biochemistry-analyzer> (звернення: 05.07.2021)
17. <https://bvt.cz/> (звернення: 05.07.2021)

Одержано 19.07.2021

Антонова Ганна Валеріївна,

молодший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
antanna78@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1876-8267>

Бабенко Євгенія Володимирівна,

кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0000-0002-0983-9713>

Вороненко Олександр Володимирович,

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

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>

Кедич Анна Василівна,

провідний інженер-програміст
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0000-0003-1784-4296>

Ковирьова Олександра Валеріївна,

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

UDC 681.7.08:535.23

Hanna Antonova *, Yevgenia Babenko, Oleksandr Voronenko, Igor Galelyuka, Anna Kedych, Oleksandra Kovyrova

Biosensor Devices in the Production of Alcoholic and Non-Alcoholic Beverages

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

* Correspondence: antanna78@gmail.com

"Smart" multisensors and biosensor systems based on modern information and communication technologies make it possible to qualitatively improve the parameters of testing systems for biologically active, chemical and toxic substances and biological or biophysical objects, improve parameter control, data processing and analysis in digital agriculture, food industry, environmental monitoring and other areas of human activity. These next-generation devices combine biologically sensitive elements with converters of biophysical signals into electrical digital signals. The article reveals the basic principles of construction of biosensor devices, their practical implementation and application. The own results of development of a wireless network of "smart" multisensors and biosensor devices for express diagnostics of a condition of grape and fruit crops and control of process of production of wine are presented. In order to test the capabilities of the unit of measurement, a number of experimental works were performed. To perform such work, it was first necessary to develop a new embedded software for the microprocessor of Analog Devices ADuCM350, and the corresponding user software for the OS Windows 10. Experiments were performed using disposable sensors based on the enzyme glucose oxidase to measure the sugar content in glucose and wine solution. A review and analysis of modern biosensor devices used in the production of alcoholic and Non-Alcoholic Beverages were done. The comparative table of analyzers for different studies based on biosensors is made. Development and preparation for mass production of "smart" biosensors, biosensor devices and networks based on them is in line with global scientific and technological trends of today and, of course, the near future.

Keywords: biosensors, ammetric transducers, wireless sensor network, express diagnostics of grape and berry crops.