

УДК 543.07

Д.В. Сніжко, М.М. Рожицький

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків*

## **ДРАЙВЕР КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОХЕМІЛЮМІНЕСЦЕНТНИМ СЕНСОРОМ НА БАЗІ СИСТЕМИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

*В роботі проведено розробку структури сенсорної системи на базі технологій цифрової обробки сигналів для керування електрохемілюмінесцентним або електрохімічним сенсорами. Розглянуто проблему перетворення інформації, що отримується в аналоговій та цифрових частинах системи, як наслідок взаємодії сенсора з дослідним зразком. Проведено побудову сенсорної системи на базі запропонованої елементної бази, визначено функціональність системи та технічні характеристики елементів системи.*

**Ключові слова:** електрохемілюмінесценція, сенсор, перетворення інформації, коло управління, аналітична система.

### **Вступ**

**Мета та завдання роботи.** Метою роботи є розробка сенсорної системи на базі технологій цифрової обробки сигналів для керування електрохемілюмінесцентним (ЕХЛ) сенсором. Для цього в роботі проведено вирішення наступних задач: розглянуто проблему перетворення інформації, що одержується під час ЕХЛ експерименту, як наслідок перетворення її в сенсорі, аналоговій та цифрових частинах системи. Запропоновано структурну схему та відповідну елементну базу для реалізації системи, визначено відповідну функціональність системи та технічні характеристики елементів системи.

Виходячи з постійно зростаючого попиту до портативних інтелектуальних аналітичних систем, розробка подібних системи є важливою та актуальною задачею.

Сучасні аналітичні системи частіш за все будуються за принципом керуючої системи з замкнутим колом управління. Тобто сигнал керування, що генерується, залежить від сигналів, що надходять з давачів, сенсорів, які контролюють певні фізичні процеси в системі. Отже, узагальнююче вище наведено, аналітичну електрохімічну систему можливо представити у вигляді системи управління з замкнутим колом керування. Відповідно до цього здійснюється аналіз перетворення інформації, що збирається під час процедури аналізу.

До структури керуючої системи входять наступні основні елементи: перетворювачі фізичної величини у електричну (давачі фізичних або хімічних характеристик – сенсори), аналоговий інтерфейс давача, що трансформує його сигнал відповідно до методики аналізу, забезпечуючи можливість перетворення його до цифрового вигляду у наступному елементі, що виконує аналого-цифрове перетворення. Далі сигнал обробляється в цифровому вигляді, для чого частіш за все використовується контролер

(мікроконтролер, мікроЕОМ, процесор цифрової обробки сигналів). Наступним кроком є випрацювання сигналу керування у відповідності до аналітичної методики та процедури аналізу. Оскільки елементом, котрий відповідає за прийняття рішень, є контролер, тому сигнал керування випрацюється в цифровому вигляді. Для керування аналоговим процесом необхідно здійснення перетворення інформації з цифрового вигляду до аналогового у відповідному елементі та здійснення спряження з аналоговою частиною перетворення сигналу. Всі ці та деякі інші стадії перетворення сигналу, отже й перетворення інформації у аналітичних електрохемілюмінесцентних системах, а також електрохімічних системах, мають місце, які, відповідно, потрібно враховувати при розробці аналітичної системи.

Розглянемо основні стадії перетворення інформації у відповідних елементах системи (рис. 1). Відповідно до збуджуючого сигналу дослідний зразок змінює свій стан, що відбивається у зміні фізичних або хімічних параметрів системи. За допомогою первинних перетворювачів – сенсорів можлива реєстрація цих змін. Інформація про стан зразка поступає в аналітичну систему як сигнал з давача. Частіш за все до процесу перетворення інформації з аналогового вигляду до цифрового потрібно здійснити підсилення електричного сигналу, що випрацює давач, при необхідності сигнал перетворюється зі струмового до потенціального за допомогою перетворення струм-напруга. Важливою стадією перед перетворенням аналогового сигналу до його цифрового відображення є його аналогова фільтрація, яка може відбуватися як у давачі, так і наступних аналогових каскадах, наприклад підсилувачів. Необхідність обмеження спектру сигналу визначається потребою у пригніченні дзеркальних компонент у спектрі цифрового образу сигналу після його отримання внаслідок аналого-цифрового перетворення вхідного аналогового сигналу.

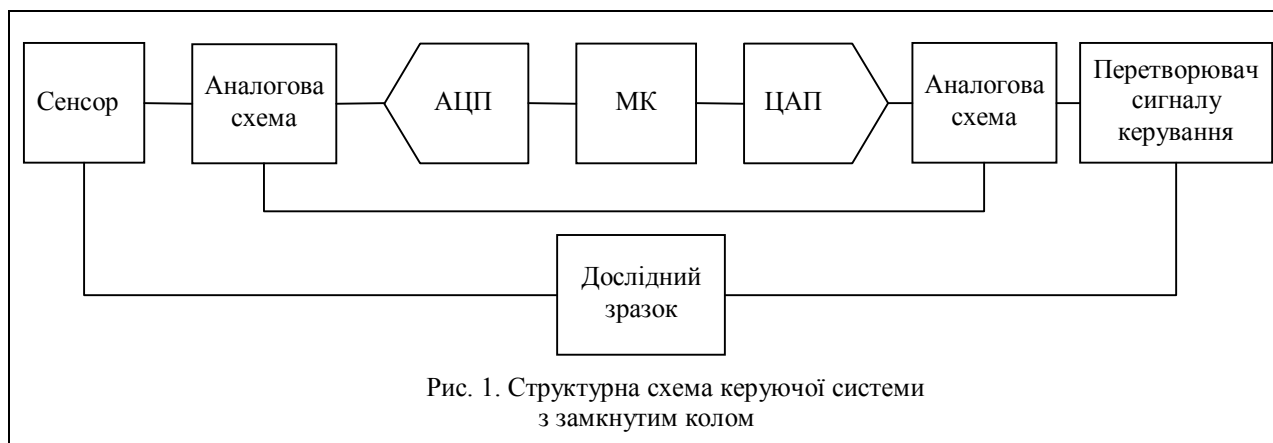


Рис. 1. Структурна схема керуючої системи з замкнутим колом

Цифровий сигнал, як образ первинної інформації оброблюється в мікроконтролері, де може здійснюватися його цифрова фільтрація, аналіз за певними алгоритмами, накопичення, збереження та архівація, передача до зовнішніх цифрових систем. Результатом аналізу є випрацювання керуючих команд та генерація відповідних цифрових сигналів, що надходять до цифро-аналогових перетворювачів. Звідки сигнал надходить до аналогової частини, де проводиться знов фільтрація сигналу з метою пригнічення дзеркальних компонент у вихідному сигналі, та перетворення аналогового сигналу для можливості здійснення керуванням станом дослідного зразка через вихідний перетворювач сигналу, де формується сигнал збудження дослідного зразка. Таким чином коло управління замикається, відповідно інформація в аналітичній системі проходить складний шлях багатьох перетворень, кожний з яких має певний вплив на склад сигналу, звідси впливає необхідність визначення ступеня впливу та контроль цих показників, як важливий аспект у розробці аналітичної системи.

### Драйвер електрохемілюмінесцентного сенсору

Методики проведення електрохімічного аналізу [1, 2] потребують залучення декількох важливих елементів: безпосередньо зразка, що буде досліджуватися; електрохімічної ячейки, що може бути реалізована у вигляді сенсора; електрохімічного потенціостату для технічної реалізації керування потенціалами поляризації електродів та отримання аналітичного відгуку у вигляді електричного та оптичного сигналу; керуючої електроніки (драйвера), що необхідна для методичного та алгоритмічного забезпечення та здійснення, обробки та візуалізації отриманої у експерименті інформації.

Важливим аспектом використання ЕХЛ аналізу є необхідність застосування потенціостату – приладу, що дозволяє здійснювати поляризацію

протиелектрода відповідно до потенціалу утворюючих умов у електрохімічній ячейці (дослідному зразку), що визначаються сигналом електрода порівняння та термодинамічною рівновагою у певній електрохімічній системі (розчині), сумісно з синхронізованою схемою реєстрації оптичного сигналу. Тобто проблема керування ЕХЛ сенсором, що здійснюється за допомогою відповідного драйвера аналітичної системи, потребує вирішення задачі генерації електрохімічного сигналу збудження, реєстрації відгуків у електричному за допомогою потенціостату та оптичному каналі за допомогою каналу реєстрації люмінесценції – оптичного випромінювання, що має місце під час проходження певних електрохімічних реакцій.

В даній роботі вирішується проблема, відповідно запропонована конструкція аналітичної системи, призначеної для здійснення ЕХЛ експерименту на базі розробленого сенсора на основі мікроконтролера (МК) ATmega128A1, Atmel, Co. Даний МК має відмінні характеристики для використання в аналітичних сенсорних приладах, включаючи такі, як низький коефіцієнт споживання енергії при високій продуктивності, реалізація 3-рівневої системи переривань, наявність 4 каналів прямого доступу до пам'яті (DMA), велика кількість периферійних пристроїв. Поєднання модулю "Event System" з DMA в МК дозволяє здійснювати програмно незалежну швидку передачу даних між периферійними пристроями МК. Наявність кількох типів інтерфейсних модулів, що інтегровані в МК, дає можливість організувати мережу між МК, керуючим персональним комп'ютером (ПК) та внутрішніми модулями аналітичної системи.

Розроблений пристрій має такі особливості: можливість роботи з електрохімічними сенсорами, що мають від 2 до 5 електродів, одночасна реєстрація аналітичного оптичного сигналу, вимірювання температури оточуючого середовища. Інтегрований до драйвера потенціостат забезпечує поляризацію сигналу в діапазонах  $\pm 10$  В,

$\pm 75$  мА, можливість синтезу сигналу довільної форми, сканування потенційним кроком 1,5 мВ з роздільною здатністю токових вимірів від 50 пА, цифрову дискретизацію зі швидкістю до  $10^5$  відліків за секунду. З'єднання з ПК здійснюється через USB інтерфейс.

Важливо, що запропонований драйвер може бути використано в портативній аналітичній системі.

Основною перевагою концепції драйвера на основі зазначеного контролера є можливість

економічної та мініатюрної реалізації платформи для електрохімічних і ЕХЛ давачів для вирішення задачі керування експериментом з застосуванням розробленого сенсора, використовуючи принцип реалізації аналізу-на-місці в режимі реального часу.

## Структура драйвера

Основу драйвера складають два модулі: мікроконтролера та потенціостата. Схема запропонованого драйвера ЕХЛ сенсора наведена на рис. 2.

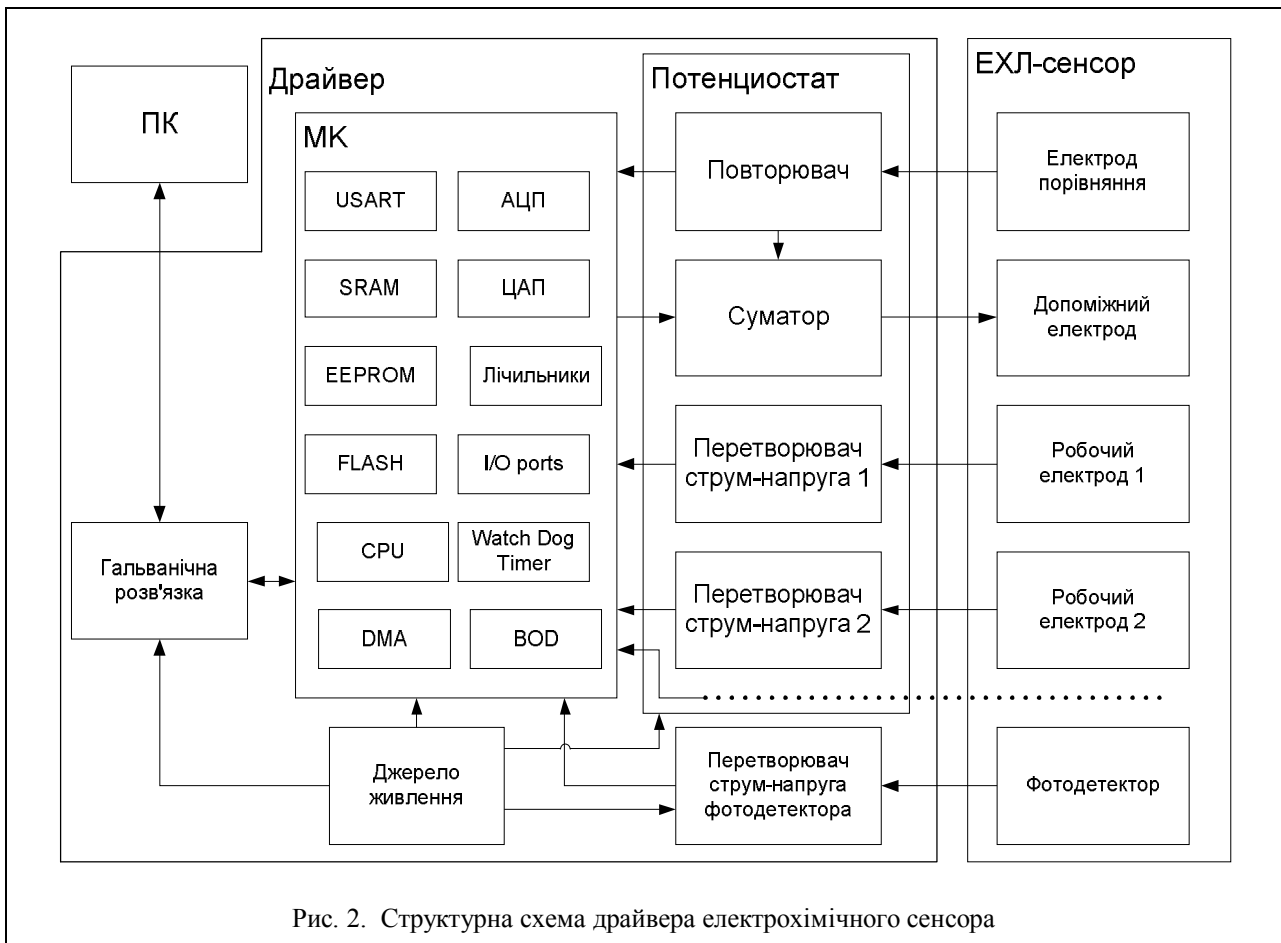


Рис. 2. Структурна схема драйвера електрохімічного сенсора

Базою для побудови мікроконтролерного модуля є мікроконтролер ATxmega-128A1 [1], що дозволило максимально зменшити кількість елементів за рахунок великої функціональної інтеграції та переваг архітектури обраного МК.

До функцій модуля МК входять:

- реалізація інтерфейсу з ПК, передача даних щодо параметрів аналізу, програми електрохімічного експерименту, результатів виміру;
- обробка вхідних даних, аналіз цифрових даних, що надходять, визначення команд та їх параметрів, збереження їх в буферах оперативної пам'яті відповідно до методології експерименту;
- формування аналогових сигналів, що необхідні для здійснення електрохімічного збудження сенсорної матриці, відповідно до отриманих пара-

метрів аналізу;

- обробка аналогових вхідних сигналів, що надходять від потенціостату, їх перетворення у цифрову форму та збереження отриманих експериментальних даних у виділені області пам'яті;
- контроль роботи потенціостату, що включає моніторинг відсутності переважання за напругою та струмом потенціостату, завдання коефіцієнтів перетворення струм-напруга, підключення чи відключення електродів (протиелектрода, електрода порівняння);
- допоміжні функції, контроль оточуючої температури під час функціонування приладу, контроль рівнів напруги живлення драйвера;
- реалізація інтерфейсів USART та I<sup>2</sup>C для керування зовнішніми модулями системи.

Конструкцію потенціостата розроблено відповідно до класичної схеми [1, 3], яка частіш за все використовується для побудови аналітичної техніки для електрохімічних вимірювань. Оскільки в ЕХЛ аналізі методологічно передбачена реєстрація люмінесценції, тому до складу драйвера додано перетворювач струм-напруга фотодетектора. Для реєстрації оптичних сигналів використовується фотоелектронний помножувач або фотодіод, вихідним сигналом яких є струм. Невелике значення фотоструму при малій інтенсивності люмінесценції робить необхідним розміщення перетворювача як можливо ближче до оптичного детектора для зменшення вірогідності появи завад та збереження відношення сигнал/шум. Для фотоелектронних помножувачів деякі компанії виробляють модулі з інтегрованими перетворювачами [4], як і для фотодетекторів на базі фотодіодів [5]. Таким чином, модуль МК працює з потенціальним сигналом, а не струмовим. Відповідно до типу та характеристик перетворювача, насамперед швидкодії, визначаються характеристики аналогового фільтру, що є проміжним ланцюгом між перетворювачем струм-напруга фотодетектора та мікроконтролерним модулем, оскільки сигнал, що надходить до модуля МК через канал виміру оптичного сигналу, безпосередньо подається на інтегрований до МК аналогово-цифровий перетворювач. Тому для спряження перетворювача оптичного детектора та АЦП мікроконтролера потрібно здійснення НЧ фільтрації.

Для обрахунку НЧ фільтрів потрібно розглянути характеристики АЦП та ЦАП, що використовуються в системі.

Максимальна продуктивність для АЦП, що інтегровано до МК, становить  $2 \times 10^6$  вибірок/с, оскільки в МК використовується мультиплексерний режим роботи АЦП, його продуктивність для кожного з каналів при вимірі сигналів за трьома каналами (струм робочого електроду, потенціал на протиелектроді та фотострум) не перевищуватиме  $667 \times 10^3$  вибірок/с. При використанні додаткового каналу виміру, що можливо завдяки наявності буферизації за чотирма каналами, продуктивність АЦП не перевищуватиме  $5 \times 10^5$  вибірок/с.

Задля збереження експериментальних даних не передбачається буфер розміру відповідного до загального об'єму даних, що будуть отримані в експерименті, але запропонована концепція багатостадійної буферизації та передачі зібраної інформації пакетами до керуючого комп'ютера по інтерфейсу USB 2.0 в режимі FullSpeed.

Обраний інтерфейс реалізовано за допомогою інтегрованого до МК USB модуля та інтегральної мікросхеми гальванічної розв'язки для USB ADuM4160, Analog Devices, Inc. [6]. Це необхідно для зменшення завад та безпечності використання

драйвера ЕХЛ-сенсору. Наявність буферизації даних для модулів USART, ЦАП та АЦП у сукупності з реалізацією DMA (прямого доступу до пам'яті) між периферійними модулями та пам'яттю МК, де програмно реалізовано FIFO-буфер, забезпечує надійну передачу експериментальних даних з необхідною швидкістю без затримок та втрат, відповідно без збоїв у програмі експерименту.

Для обраного режиму USB характерна тактова частота 12 МГц. Ефективна швидкість передачі даних у залежності від параметрів керуючої системи та завантаженості інтерфейсної шини у реальних умовах складатиме 3...7 Мбіт/с. Значення для АЦП та ЦАП зберігаються у вигляді 16-бітних значень (2-байтні слова). Оскільки дані не компресуються, необхідна середня швидкість передачі даних складає 1,6 Мбіт/с (для даних від АЦП) та 1,6 Мбіт/с (для даних до ЦАП), загалом 3,2 Мбіт/с. Вона реалізована в обраному інтерфейсі між розробленим драйвером сенсора та керуючим комп'ютером. Тому частоту дискретизації для ЦАП та АЦП зменшено до  $10^5$  вибірок/с. Таким чином, вхідними даними для розрахунку параметрів НЧ фільтрів, що необхідно задіяти для зв'язку аналогової та цифрової частин, є частота Найквіста 50 кГц.

Фільтрація вихідних сигналів потенціостата та вхідних сигналів для потенціостата, що поступають з модуля МК як сигнал збудження, забезпечується фільтрами НЧ Баттерворта 4-го порядку [7]. Для даного типу фільтрів притаманна відносно проста монотонно спадаюча амплітудно-частотна характеристика  $|H(j\omega)|$ , що описується рівнянням

$$|H(j\omega)| = \frac{A}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^8}},$$

де  $A$  – амплітуда сигналу,  $\omega$  – циклічна частота,  $\omega_3$  – циклічна частота зрізу фільтра,  $j$  – мніма одиниця.

Амплітудно-частотна характеристика фільтра Баттерворта найбільш плоска біля частот  $\omega = 0$  у співставленні з іншими типами поліноміальних фільтрів [8]. Тому для діапазону НЧ даний тип фільтрів найліпше апроксимує амплітудно-частотну характеристику ідеального фільтру.

Відношення максимального рівня сигналу в смузі пропускання для фільтра до рівню сигналу в смузі пригнічення визначає міру максимального затухання в смузі пригнічення фільтра. Задля забезпечення максимального динамічного діапазону рівень сигналу в смузі пригнічення фільтру не повинен перевищувати рівень мінімального рівня шуму АЦП. Зробивши припущення про синусоїдальний характер вхідного сигналу з максимальною амплітудою  $A$ , маємо, що середнє значення вхідного сигналу дорівнює  $A/\sqrt{2}$ , шаг квантування

$$q = 2A / (2^B - 1) \approx 2A / 2^B,$$

відповідно середній квадратичний шум квантування дорівнює

$$q / 2\sqrt{3} = A / (2^B \sqrt{3}),$$

де  $B$  – розрядність АЦП (для обраного МК 12 біт).

Мінімальне затухання в смузі пригнічення  $A_{\min}$  для фільтра захисту від накладання спектрів має не перевищувати середньоквадратичний шум квантування АЦП для збереження динамічного діапазону, тобто ефективного використання всіх розрядів АЦП. Звідси

$$A_{\min} = 20 \lg(\sqrt{1,5} \cdot 2^B) = 74 \text{ дБ},$$

виходячи з розрядності інтегрованого до МК АЦП та ЦАП. Виходячи з того, що  $A_{\min} = A / H(j\omega)$  та враховуючи обрану частоту дискретизації та тип обраного фільтра маємо, що частота зрізу фільтра становитиме

$$\left( \frac{50000}{f_3} \right) = (5011,27)^2 - 1,$$

тобто частота зрізу фільтру є  $f_3 = 5942$  Гц.

Для побудови фільтру четвертого порядку про-

понується використати каскадне включення фільтрів другого порядку. Поліном, що описує фільтр четвертого порядку, може бути представлено у вигляді добутку поліномів другого ступеня, що нормовані відносно частоти зрізу

$$(1+0,765s+s^2)(1+1,848s+s^2),$$

де  $s$  – комплексна частота. Даний фільтр може бути реалізовано шляхом каскадного з'єднання фільтрів другого порядку з добротністю пар полюсів 1,31 та 0,54 відповідно. Зазначені дані дають змогу провести обрахунок параметрів фільтрів, що використовуватимуться для адекватного поєднання аналогової та цифрової частин запропонованої у роботі аналітичної системи.

### Технічні характеристики

Загальні характеристики драйвера ЕХЛ сенсора, що розроблено, приведено у табл. 1.

Їх аналіз дозволяє стверджувати, що розроблений у роботі драйвер сенсора може застосовуватися для проведення електрохімічних та електрохемілюмінесцентних досліджень за різними методиками, адаптуватися для різних конфігурацій та характеристик сенсору.

Таблиця 1

Характеристики драйвера електрохімічного сенсора

Параметр	Значення
Вимірювальна конфігурація	багатоелектродна
Робочий електрод	
Діапазон вимірювального струмового опору	1кОм ... 10МОм
Повний діапазон струму	62,5нА ... 10мА
Максимальне струмова роздільна здатність	30пА
Протиелектрод	
Максимальна напруга відносно робочого електрода	± 13,5В
Струм	≤ 10мА
Швидкість вихідної напруги (у режимі керованого потенціостата)	> 3 В/мкс
Електрод порівняння	
Вхідний імпеданс	> 10 ГОм
Вхідний струм	≤ 1 пА
Пригнічення синфазних шумів	70 дБ
Поляризація робочого електрода	
Діапазон потенціалів	±10 В
Гранична похибка	1 мВ
Діапазон струму	±10 мА
Вимірювання рівноважного потенціалу	мається
Діапазон потенціалів	±10 В
Гранична похибка	1 мВ
Розгортка потенціалу робочого електрода	ступеньково-лінійна
Швидкість розгортки потенціалу	до 10 В/с
Максимальний потенціал реверсу розгортки	±10 В
Потенціал початку і закінчення розгортки	рівноважний
Оптичний канал (люмінесцентні вимірювання)	
Тип фотоприймача	фотопомножувач «Hamamatsu H5784-20»

Спосіб реєстрації оптичного випромінювання	струмовий, з перетворенням у напругу з коефіцієнтом 1В/мкА
Спосіб перетворення струму	вбудований перетворювач на пікострумовому операційному підсилювачі
Спосіб зміни чутливості	Регулюванням напруги живлення фото помножувача
Джерело високовольтного живлення	Вбудований імпульсний перетворювач
Спектральний діапазон	300нм – 920нм
Максимальна чутливість	500мкА/лм (75мА/Вт)
Діаметр фотокатода	8мм
Частотний діапазон	до 20кГц

### Висновки

Використання високоінтегрованого МК AVR ATxmega-128A1 дозволило створити компактний універсальний драйвер електрохімічного сенсора, що може використовуватися для керування експериментом на базі ЕХЛ сенсора з інтегрованою матрицею електродів за різноманітними методиками. Дана розробка може з успіхом застосовуватися для вирішення аналітичних задач у медицині, біології, екології тощо. Наявність великої кількості периферійних модулів обраного МК дозволило отримати гнучку систему, що може масштабуватися відповідно до аналітичних завдань. Наприклад, інтеграція з 2,4 ГГц приймачем AT86RF230, який характеризується низьким споживанням електроенергії, спеціально адаптованого для недорогих IEEE 802.15.4, ZigBee та 6LoWPAN мереж, дозволяє застосовувати драйвер у розподілених бездротових аналітичних системах.

Роботи проведені в рамках міжнародних проєктів Українського науково-технологічного центра №№ 4495, 5067 (керівник д.ф.-м.н., проф. Рожицький М.М.).

### Список літератури

1. Bard A.J. *Electrochemical methods: fundamentals and applications* / A.J. Bard, L.R. Faulkner. – Phoenix, 2001. – 850 p.
2. Zoski C.G. *Handbook of Electrochemistry* / C.G. Zoski. – Elsevier, 2007. – 935 p.
3. Bard A.J. *Encyclopedia of Electrochemistry. Instrumentation and Electroanalytical Chemistry* / A.J. Bard, M. Stratmann, P.R. Unwin. – Vol. 3. – Wiley, 2003. – 689 p.
4. *Photomultiplier tubes. Basics and applications.* – Ed. Chief Toshikazu Hakamata. – Hamamatsu Photonics. K.K., 2006. – 324 p.
5. *OPT101: Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier – Data Sheet.* – Texas: Texas Instruments, 2003. – 15 p.
6. *ADuM4160: Full/Low Speed 5 kV USB Digital Isolator – Data Sheet.* – Analog Devices, 2010. – 16 p.
7. Мошниц Г. *Проектирование активных фильтров* / Г. Мошниц, П. Хорн – М: Мир, 1984. – 320 с.
8. *Ifeachor E.C. Digital Signal Processing: A Practical Approach* / E.C. Ifeachor, B.W. Jervis. – Pearson Education, 2002. – 933 p.

Надійшла до редколегії 20.02.2012

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. А.І. Бих, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

### ДРАЙВЕР УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ СЕНСОРОМ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Д.В. Снежко, Н.Н. Рожицкий

*В работе проведено разработку структуры аналитической системы на базе технологии цифровой обработки сигналов для управления электрохемилюминесцентным или электрохимическим сенсорами. Рассмотрено проблему преобразования информации в аналоговой и цифровой частях системы, как следствие взаимодействия сенсора с исследуемым образцом. Проведено построение сенсорной системы на базе предложенной элементной базы, определена функциональность системы и технические характеристики элементов системы.*

**Ключевые слова:** электрохемилюминесценция, сенсор, преобразование информации, цепь управления, аналитическая система.

### DRIVER FOR ELECTROGENERATED CHEMILUMINESCENCE SENSOR CONTROL BASED ON DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEM

D.V. Snizhko, M.M. Rozhitskii

*In this work the structure of analytical system based on digital signal processing technology for electrochemiluminescent or electrochemical sensors is developed. The problem of information processing in analog and digital parts of the system as a consequence of the sensor interaction with the sample is considered. The sensor system on the basis of the proposed types of elements is designed and the system functionality and technical characteristics of the system elements are determined.*

**Keywords:** electrochemiluminescence, sensor, information conversion, control loop, analytical system.