

ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 535.31: 620.186

DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.032>

СИНТЕЗ БЛОКІВ ФОРМУВАННЯ І ОБРОБКИ СИГНАЛУ СЕНСОРА ДИФУЗНОГО ВІДБИВАННЯ СВІТЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ПКВМ-МІКРОКОНТРОЛЕРА PSoC5

І. Б. Івасів, Л. Є. Червінка, О. О. Червінка

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: igreg@ukr.net, luda.chervin@gmail.com

Розв'язано задачу реалізації частини функціоналу електронних блоків формування й обробки сигналу сенсора дифузного відбивання світла з використанням мікроконтролера PSoC5, що містить програмовану користувачем вентиляну матрицю (ПКВМ). Зокрема, на ПКВМ реалізовано комутатор каналів, вимірювальний та опорний підсилювачі другого каскаду, АЦП з диференціальними входами, а також схему керування і синхронізації на широтно-імпульсному модуляторі. Поєднанням компонентів, синтезованих на ПКВМ з потужним 32-бітним ядром Arm Cortex-M3, мінімізовано вплив темнових струмів чутливих елементів фотолінійки сенсора та шумів, забезпечено гнучкість налаштувань, можливість програмного вирівнювання чутливості вимірювальних каналів та калібрування сенсора.

Ключові слова: *дифузне відбивання світла, сенсор, електронний блок, ПКВМ, мікроконтролер, PSoC5.*

SYNTHESIS OF SIGNAL FORMATION AND PROCESSING BLOCKS OF DIFFUSE LIGHT REFLECTION SENSOR USING FPGA PSoC5 MICROCONTROLLER

I. B. Ivasiv, L. Ye. Chervinka, O. O. Chervinka

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

The problem of partial implementing the functional of the electronic blocks for forming and processing the diffuse light reflection sensor signal using an FPGA-microcontroller PSoC5 is solved. The urgency of this problem is caused by necessity of precision and high resolution measurement of the difference between, on the one hand, the reference signal of light reflection from the clear sensor working surface and, on the other hand, the signal of diffuse light reflection from the inspected corroded surface. For this purpose, in particular, a channels multiplexer, measuring and reference operational amplifiers of the second stage, a delta-sigma ADC with differential inputs, as well as a PWM control and synchronization scheme are implemented on the built into microcontroller FPGA consisting of universal digital blocks (UDB) together with programmed logical devices (PLD). The only components implemented outside the FPGA-microcontroller are the first stage operational amplifiers (in the amount of sixteen), the current pulses generator for LED, as well as power supply block. The combination of components synthesized on FPGA with a powerful 32-bit Arm Cortex-M3 core makes it possible to ensure flexibility of settings, to minimize the influence of dark currents of sensitive elements of the sensor photodiode linear array as well as noises, to align programmatically the sensitivity of the measuring channels and to carry out sensor calibration. Thus, noise mitigation is implemented programmatically by ADC's data collection and averaging in measurement buffer or calibration buffer (for reference signal from clear working surface). Several software routines for mode selection and settings, channels scanning (including measurement and calibration with alignment), as well as for measurement data (difference between the measurement and calibration buffers) displaying and transfer to PC (via one of onboard communication devices) have been developed. These all features can allow implementing the algorithms for deep analysis of measurement data and calculation of the characteristics of surface corrosion defects.

Keywords: *diffuse light reflectance, sensor, electronic block, FPGA, microcontroller, PSoC5.*

© І. Б. Івасів, Л. Є. Червінка, О. О. Червінка, 2023

Вступ. Розглянемо задачу ефективної обробки сигналу сенсора дифузного відбивання світла (ДВС) як складової частини компактного переносного приладу для оперативного оцінювання ранніх стадій корозійного ураження конструкцій. Оптична конфігурація такого сенсора та електронна схема формування і обробки його сигналу описані раніше [1]. Корисним сигналом сенсора є різниця між розподілами інтенсивності світла вздовж фотолінійки, отриманими, з одного боку, внаслідок відбивання від чистої робочої поверхні сенсора, та, з іншого боку, внаслідок ДВС від досліджуваної поверхні з корозійними дефектами у вигляді зернистих нагромаджень продуктів корозії [1]. Оскільки амплітуда різницевого сигналу значно менша, ніж первинні сигнали, а структура залежить від розміру корозійних зерен і різниться кількістю, положеннями та абсолютними значеннями екстремумів (рис. 1), то від сенсора вимагають високу амплітудну роздільну здатність і стійкість до завад [2–4].

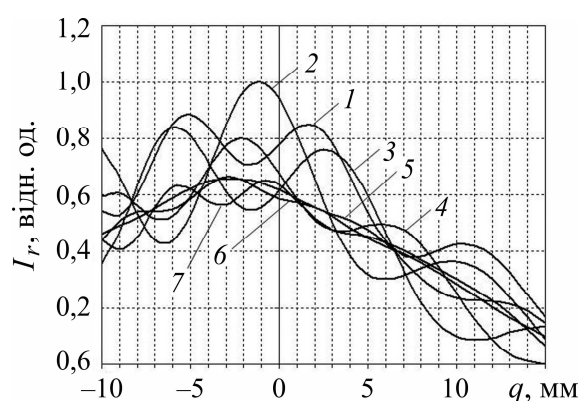


Рис. 1. Нормовані амплітуди різницевого сигналу сенсора дифузного відбивання світла для різних розмірів зерен в осередках корозії: 1 – 1 мкм; 2 – 0,7; 3 – 0,8; 4 – 0,9; 5 – 1, 1; 6 – 1,2; 7 – 1,3 мкм.

Для забезпечення цих характеристик необхідно, в першу чергу, збалансувати вимірювальні канали, компенсувати зміщення сигналу включених у вентильному режимі фотодіодів (вимірювальних комірок фотолінійки) [5, 6] та їх темновий струм, а також послабити вплив шумів у вимірювальних каналах.

Зокрема, на важливість збалансування каналів у різницевій вимірювальній схемі вказано в праці [7]. Традиційний метод компенсації високої напруги зміщення на фотодіоді полягає у включенні розділювальної ємності перед входом підсилювача [5]. Однак така схема спотворює сигнал, що формується у сенсорі ДВС [1].

Найпростіший метод компенсації темного струму вимірювального фотодіода з паралельним включенням захищеного від світла ідентичного фотодіода в зворотному напрямку описаний у праці [8]. Для фотодіодної лінійки ефективніший метод, описаний раніше [9].

Вплив шумів зменшується як за рахунок вибору електронних компонентів, так і, в першу чергу, інтегрування отриманого вихідного сигналу. Зокрема, таке інтегрування забезпечували [1] пристроєм вибірки/зберігання та інтегровальним АЦП. Недолік такого поєднання – складність реалізації короткого часу вибірки вхідного сигналу з тривалим утриманням стабільного вихідного сигналу для коректної роботи АЦП з фіксованим періодом інтегрування.

Спільним недоліком реалізації усіх перелічених вище методів є недостатня гнучкість, що вимагає докорінної переробки електронних блоків сенсорів у ви-

падку зміни методів обробки сигналів чи виявлення схемотехнічних помилок і, як результат, великих витрат часу.

Тому важливий перехід проектування і реалізація блоку електроніки описаного в праці [1] сенсора ДВС на сучасну елементну базу, що спирається на мікроконтролер з програмованою користувачем вентиляційною матрицею (ПКВМ). За таким переходом вдається не лише скоротити час проектування та налаштування блоку електроніки, але й органічно поєднати аналогову та цифрову обробку сигналів.

Особливості ПКВМ-мікроконтролера PSoC5LP. Для досліджень використовували ПКВМ-мікроконтролер PSoC5LP компанії Cypress Semiconductor з відносною простотою розробки та відлагодження електронних схем середньої складності за допомогою спеціалізованого інтегрованого середовища PSoC Creator. Іншою перевагою є сумісна робота з високопродуктивним мікропроцесорним ядром Cortex-M3, що дає можливість гнучкішого керування електронними компонентами схеми та цифрової обробки отриманого вихідного аналогового сигналу.

На відміну від мікроконтролерів із фіксованою функцією, PSoC дає можливість вибрати потрібну вбудовану периферію з каталога заздалегідь визначених і перевічених компонентів, які варіюють від простих елементів логіки до реалізації цифрових та аналогових периферійних функцій, складних комунікаційних і прикладних рішень.

Спеціалізоване інтегроване середовище PSoC Creator і мікроконтролер PSoC утворюють гнучку комбінацію для проектування та створення системи на кристалі. PSoC Creator організує унікальне та потужне середовище спільного проектування апаратного та програмного забезпечення PSoC.

PSoC5LP – це програмована вбудована система на кристалі, яка об'єднує аналогові та цифрові периферійні пристрої, що налаштовують пам'ять і мікроконтролер [10]. Архітектура PSoC5LP має високу продуктивність завдяки:

- 32-бітному ядру Arm Cortex-M3 з контролером DMA і процесором цифрового фільтра;
- низькому енергоспоживанню та широкого діапазону напруг;
- програмованим цифровим та аналоговим периферійним пристроям, які дозволяють налаштувати функції користувача;
- гнучкій маршрутизації будь-якої аналогової або цифрової периферійної функції до будь-якого виводу.

Реалізація блоку електроніки сенсора ДВС на базі мікроконтролера PSoC5LP. Модифікація блоку електроніки сенсора ДВС полягала ось у чому. Частина схеми обробки сигналу, а саме, комутатор на 16 каналів, підсилювачі 1 і 2, АЦП (дельта-сігма), а також схема керування реалізовані за допомогою мікроконтролера PSoC5LP (рис. 2). Перевагами такого підходу є більша гнучкість проектування, можливість попередньої цифрової обробки сигналів фотолінійки з виведенням даних на матричний рідкокристалічний індикатор або їх передачі в ПК за допомогою послідовного інтерфейсу.

Частина блоку електроніки реалізована за допомогою мікроконтролера PSoC5LP, інша частина складається з генератора струму, світлодіода і фотолінійки з попередніми підсилювачами та джерела живлення.

Сигнал, який випромінює світлодіод, через оптичний канал потрапляє на фотолінійку у вигляді імпульсу і розділяється на 15 каналів. Він має постійну складову, зумовлену опорною напругою і темновими струмами у фотодіодах лінійки. Для її усунення замість розділювальної ємності [5] використовують схему, подібну до описаної в праці [9], в якій з 16-ти елементів фотолінійки перші 15 застосо-

вують для вимірювання, а останній (спеціально затемнений) – для компенсації опорної напруги і темнових струмів.

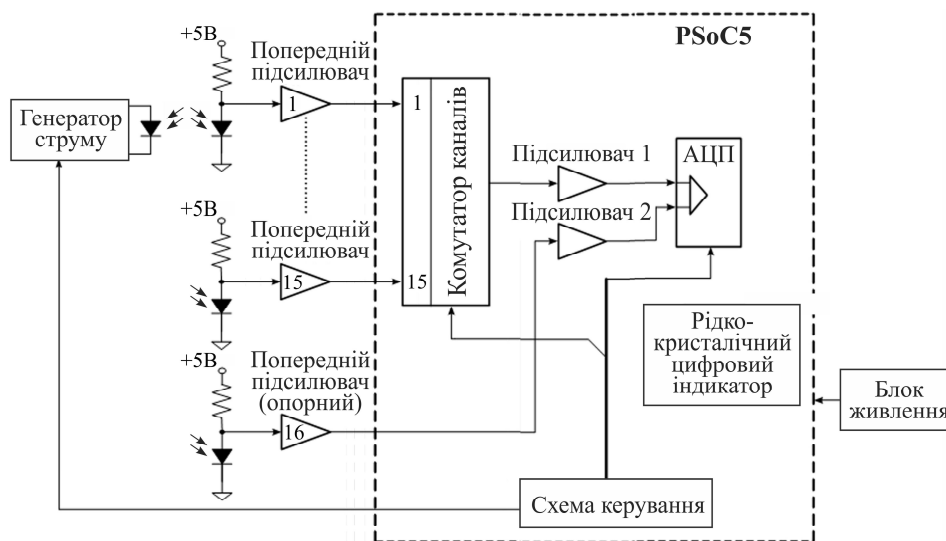


Рис. 2. Блок-схема формування і обробки сигналу сенсора ДВС.

Вимірювані сигнали надходять на комутатор, а далі – на підсилювач 1. На підсилювач 2 подають сигнал з 16-го опорного (затемненого) елемента фотолінійки.

Сигнали з першого (вимірювального) і другого (опорного) підсилювачів подають на входи АЦП, включеного у диференціальному режимі. Як результат на виході АЦП отримуємо цифровий код – різницю напруги між вимірювальним і опорним вхідними сигналами. Таким чином, для кожного вимірювального каналу компенсуємо не тільки напругу зміщення, а й повністю темнові струми (нехтуючи їх незначну різницю для елементів фотолінійки).

Широтно-імпульсний модулятор PWM дає можливість генерувати частоти, затримувати імпульси та коректувати їх тривалість, а також синхронізувати логічні пристрої з тактовим сигналом. За допомогою PWM2 (рис. 3а) формують імпульси, які надходять на підсилювач потужності струму для випромінювального світлодіода.

Генератор струму формує імпульси для світлодіода. Під їх впливом світлодіод випромінює зондувальні імпульси світла, які потрапляють на робочу поверхню призми, а імпульси ДВС – на фотолінійку, до якої під'єднані попередні підсилювачі у фотодіодному (вентильному) режимі.

Схема керування (рис. 3б) складається з компонентів Sync (синхронізація), LUT (таблиця пошуку), PWM і Control Register (регістр керування). Основною її функцією є управління комутатором та синхронізація роботи комутатора і АЦП.

Компонент Sync повторно синхронізує вхідний сигнал за переднім фронтом тактового сигналу (clock). Ширина імпульсу вхідного сигналу для повторної синхронізації повинна складати не менше одного періоду тактової частоти і додатково 2 нс. Sync формує з сигналу EOC (End-of-Conversion – кінець перетворення) по передньому фронту тактового імпульсу сигнал управління для LUT.

Компонент LUT використовують для керування каналами комутатора згідно зі заданою таблицею істинності. Таке керування значно гнучкіше, ніж, наприклад, двійковим лічильником, вихідний код якого забезпечує лише послідовний вибір

усіх каналів комутатора. Таблицю ж істинності LUT можна налаштувати так, щоб комутувати лише вибрані канали в будь-якій послідовності, що дає можливість оптимізувати обробку сигналу фотолінійки.

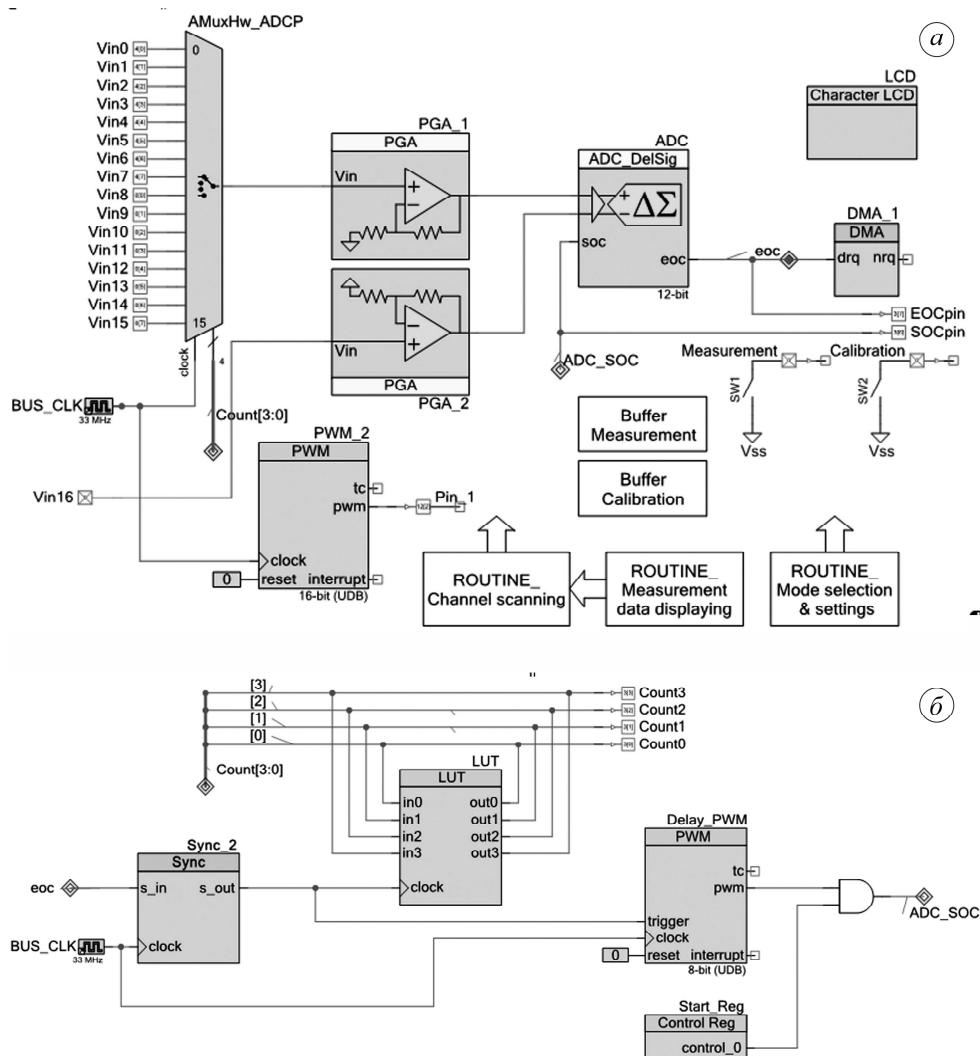


Рис. 3. Реалізація схеми формування та обробки сигналу на мікроконтролері PSoc5 (а) і схема керування (б).

АЦП включений у режимі одиночної вибірки: вхід SOC (Start-of-Conversion – початок перетворення) запускає його для кожної вибірки. Сигнал SOC генерується шляхом затримання сигналу з виходу EOC АЦП на 1,5 мкс за допомогою Delay_PWM, внаслідок чого встановлюється сигнал на виході мультиплектора під час перемикання між входами. Таким чином, сигнал EOC використовують як тригер для Delay_PWM у режимі одноразового запуску. Він також служить сигналом DRQ для DMA (Direct Memory Access – прямиий доступ до пам'яті) і тактовим сигналом для LUT. Отже, після кожного перетворення АЦП DMA передає його вихідні дані у пам'ять, а LUT оновлює свій вихідний код. Керуючий регістр Start_Reg запускає SOC АЦП і на початку встановлюється значення "1", щоб дозволити перетворення АЦП.

Для керування комутатором, зчитування даних з буферів, вибору режимів роботи і обробки результатів вимірювання розроблені підпрограми.

Підпрограма сканування каналів (Channel scanning routine) керує комутатором АМухНw і буферами Buffer Measurement і Buffer Calibration, послідовно вибирає канали для буферів, за допомогою яких зчитують дані з АЦП та нагромаджують їх для усереднення чи інших методів цифрового інтегрування. Підпрограма відображення даних вимірювань (Measurement data displaying routine) зчитує вміст буферів і відображає їх на LCD. Також вона керує підпрограмою сканування каналів, задає старт/стоп вимірювань і керує відображенням даних на дисплеї згідно з заданими налаштуваннями.

Підпрограма вибору режиму та налаштування (Mode selection & settings routine) за допомогою кнопок керування Measurement і Calibration послідовно вибирає режими роботи (налаштування, калібрування, вимірювання), причому в налаштуваннях задано кількість даних для усереднення, спосіб врахування калібрування (наприклад, від даних вимірювань віднімають дані калібрування для чистої поверхні), спосіб відображення даних на дисплеї (послідовне виведення значень для кожного каналу разом із номером каналу чи побудова гістограми).

ВИСНОВКИ

Після заміни частини блоку електроніки сенсора ДВС ПКВМ-мікроконтролером PSoC5LP, вдалося зробити компактнішим дизайн блоку, спростити схему компенсації опорної напруги та темнових струмів елементів фотолінійки без втрати інформативності вимірювальних каналів, забезпечити гнучкіший та потужніший функціонал обробки сигналу, а отже, ефективніше послаблювати вплив шумів на точність вимірювань.

Зокрема, з відмовою від попередньої (аналогової) схеми інтегрування сигналів за допомогою пристрою вибірки-зберігання та АЦП подвійного інтегрування зі стандартним періодом перетворення 0,16...0,4 с та з переходом на цифрове інтегрування даних швидкодійного дельта-сигма АЦП зменшили абсолютну похибку в молодшому десятковому розряді вихідного сигналу в 5 разів, що відповідало зменшенню максимальної відносної похибки різницевого сигналу сенсора для імітатора поверхневої точкової корозії з 6,3 до 1,3%.

Крім того, ПКВМ-мікроконтролер в поєднанні з інтегрованим середовищем розробки та бібліотекою готових електронних компонентів пришвидшив розробку і налаштування блоку електроніки приблизно в 10 разів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку орієнтованих на мікроконтролер алгоритмів глибокого аналізу отриманого різницевого сигналу дифузного відбивання світла та алгоритмів оцінювання характеристик корозійних дефектів.

1. Dzhala, R.M.; Ivasiv, I.B.; Chervinka, L.E.; Chervinka, O.O. Diffuse light reflection sensor for early detection of paint damage (in Ukr.). *Information Extraction and Process.* **2015**, 42 (118), 58–67.
2. Elias, J.G.; Eden, D. High accuracy differential measurement of ultrasonic velocity in liquids. *Rev. Sci. Instrum.* **1979**, 50, 1299–1302. <https://doi.org/10.1063/1.1135699>
3. Sircar, S.; Wang, C.Y.; Lueking, A.D. Design of high pressure differential volumetric adsorption measurements with increased accuracy. *Adsorption.* **2013**, 19, 1211–1234. <https://doi.org/10.1007/s10450-013-9558-8>
4. Soprunyuk, P.M.; Ivasiv, I.B. Optical sensor with crossed polarizers for measurement of air dustiness concentration. *Mechanizacja i Automatyżacja Górnicwa.* **2002**, 7(379), 40–48.
5. Filyniuk, M.A.; Lazarev, O.O.; Voitsekhovska, O.V. et al. *Element base of electronic devices. Part 5. Optoelectronic components*; Filyniuk M.A., Lazarev O.O. ed.; Vinnytsia: VNTU, 2018.

6. SHARP Corporation. *Photodiode/phototransistor application circuit* (Sharp Application Note SMA99017), 1999. https://physlab.lums.edu.pk/images/1/10/Photodiode_circuit.pdf
7. Reneau, J.; Adhami, R.R. Differential Phase Measurement Accuracy of a Monobit Receiver. *IEEE Access*. **2018**, *6*, 69672–69681. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2880431>
8. Analog Devices Inc. 2 MHz Bandwidth PIN Photodiode Preamp with Dark Current Compensation. Circuit Note CN-0272. Analog Devices, Inc., USA, 2012-2013. <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0272.pdf>
9. Beaudoin, P.M.; Audet, Y.; Ponce-Ponce, V.H. Dark current compensation in CMOS image sensors using a differential pixel architecture. *In Joint IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference 2009*; Toulouse, France, 2009, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/NEWCAS.2009.5290457>
10. AN77759 Getting Started with PSoC 5LP. Application Notes. V. 08. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN77759_Getting_Started_with_PSoC_5LP-ApplicationNotes-v08_00-EN.pdf

Одержано 06.09.2023