

АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ВБУДОВАНА СИСТЕМА ЧАСТОТНОЇ СЕЛЕКЦІЇ СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ГІРАТОРА

*Барило Г.І., д.т.н., доц., Гельжинський І.І., к.т.н., доц., Марусенкова Т.А., к.т.н., доц.,
Кривенчук Ю.П., к.т.н., доц., Хільчук М.О., аспірант.*

Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: yurkokryvenchuk@gmail.com

*Голяка Р.Л., д.т.н., проф., Оксана Бойко, д.т.н., доц.
Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, Україна;*

Анотація

Робота присвячена проблематиці частотно-селективного сигнального перетворення в мікроелектронних сенсорних пристроях. Показано, що сигнальний тракт таких пристроїв, зокрема, сенсорних вузлів в концепції Інтернету речей, повинен задовольняти вимогам вбудованих систем з використанням змішаного аналого-цифрового інтерфейсу. Проведено аналіз сигнального перетворення фотovoltaїдних сенсорів, зокрема, проблеми значного паразитного впливу стороннього неінформативного оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Синтезовано SPICE моделі сигнальних кіл фотovoltaїдних сенсорів, що забезпечують частотну селекцію на смугових фільтрах. Розглянуто основні підходи апаратно-програмної реалізації вбудованої системи частотної селекції з змішаним сигнальним перетворенням. В склад сигнального тракту вбудованої системи входять гіратор, програмно керований підсилювач, синхронний демодулятор, аналого-цифровий перетворювач та цифровий фільтр. Реалізація здійснена на платформі програмованої системи на кристалі PSoC. Використано інтегральні схеми PSoC 5 LP з широким набором програмно керованих вузлів аналогового інтерфейсу (AFE, Analog Front-End), зокрема, операційні підсилювачі, компаратори, блоки на перемикальних конденсаторах, джерела опорної напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплексори, синтезатори сигналів тощо. Показана ефективність змішаного аналогового та цифрового перетворення сигналу.

Ключові слова

Сигнальне перетворення, частотна селекція, програмована система на кристалі, інтерфейс сенсорних вузлів, оптичні сенсори в концепції Інтернету Речей.

1. Вступ

Електронні засоби інформаційно-комп'ютерних технологій в даний час є одним з найбільш домінуючих рушіїв технічного розвитку сучасного суспільства. Крім традиційно електронних галузей техніки – радіо, телекомунікації, інформаційно-вимірювальної та обчислювальної техніки тощо, електроніка та пристрої на їх основі стали важливими засобами розвитку промисловості, біології, медицини, екології тощо. Реалізація сучасних електронних пристроїв в цих галузях базується на концепції вбудованих систем [1].

Основою засобів взаємодії електроніки з фізичним світом є сенсори, актуатори та сигнальні перетворювачі, які отримали назву аналогового інтерфейсу [2]. Поєднання вузлів аналогового інтерфейсу та засобів цифрового оброблення сигналів демонструється в публікаціях з питань реалізації вбудованих систем змішаного [3] та гетерогенного [4] сигнального перетворення. Актуальність проблематики розроблення та використання таких вбудованих систем обумовлена сучасною концепцією Інтернету Речей (IoT) [5].

Прикладами аналогового та змішаного інтерфейсу IoT є вбудовані системи ємнісних акселерометрів [6] та сенсорних мереж підводної локації [7]. Акцент робиться на актуальності безіндуктивних схем сигнального тракту [8].

У відповідності до сучасних тенденцій розвитку вбудованих систем змішаного сигнального перетворення в даній статті розглядається підходи апаратно-програмної реалізації сигнального тракту сенсорних пристроїв з високим рівнем частотної селекції. Реалізація сигнального тракту здійснена на платформі програмованої системи на кристалі PSoC [9] з API керуванням. Показана

ефективність поєднання аналогового та цифрового сигнального перетворення. Основою аналогового тракту є гіратор [10] - безіндуктивна схема частотно-селективного транс-імпедансного ТІА перетворення [11], а цифрового тракту – смуговий фільтр типу FIR. Крім цього, сигнальний тракт містить програмно керований підсилювач PGA, синхронний демодулятор на основі мультифункціонального мікзера, дельта-сигма аналого-цифровий перетворювач та послідовний UART інтерфейс, що забезпечує його високу універсальність в різноманітних вбудованих системах інтерфейсу мікроелектронних сенсорів IoT.

Об'єкт дослідження даної роботи продемонструємо на прикладі побудови функціонально-інтегрованих фотovoltaїдних сенсорних вузлів інфо-комунікаційної системи бездротової мережі WSN в концепції злиття даних. Іншими, спорідненими, термінами цієї концепції є синтез даних сенсорів, чи в більш короткому формулюванні - синтез сенсорів [12]. Такі сенсорні пристрої та інфо-комунікаційні системи на їх основі визначається поняттями «Розумних сенсорів» [13] та «Лабораторії на чіпі» [14] з телекомунікацією у відповідності до технологій бездротового оптичного зв'язку: OWC, FSO, VLC [15].

2. Постановка та аналіз проблеми

Інформативною величиною фотovoltaїдних сенсорів є, зокрема, колір (спектр оптичного поглинання) активного середовища, що взаємодіє з досліджуваними компонентами (домішками, забрудненнями тощо) в атмосфері, розчинах чи поверхнях. Для цього передавач формує послідовності імпульсів випромінювання світлового потоку різного спектру. Приймач приймає та конвертує ці світлові потоки в сигнали керування, енергію живлення та спектральні складові сигналу оптоелектронної сенсорики.

Основною проблемою фотovoltaїдних сенсорів є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Так, інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла (сонця, ламп освітлення тощо) в сотні, а то і тисячі, раз перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину. Типове вирішення вказаної проблеми шляхом затемнення сторонніх джерел світла протирічить вимозі до відкритості активного середовища, яке передбачає ефективну взаємодію цього середовища з оточенням. Малоєфективним є вирішення проблеми на оптичних фільтрах. По-перше, ефективність спектральної селекції оптичних фільтрів не є високою, а по-друге, використання таких фільтрів обмежує інформативність корисного сигналу. Паразитний вплив електромагнітних завад в першу чергу обумовлений випромінюванням силової електромережі частотою 50 Гц. Інтенсивність такого випромінювання типово є значною, а екранування оптоелектронної пари сенсорного пристрою протирічить тій же вимозі до її відкритості.

Особливо паразитний вплив стороннього оптичного випромінювання та електромагнітних завад проявляється в оптоелектронних сенсорних пристроях на фотодіодних перетворювачах. Інформативним сигналом таких перетворювачів є фотострум, тобто останні реалізують вимірювальну схему з виходом по струму.

Відмінність сигнальних перетворювачів з виходом по струму та напрузі розглянемо на прикладі смугових фільтрів. Для цього синтезуємо SPICE моделі елементарних сигнальних кіл частотної селекції на пасивних смугових фільтрах (рис. 1, зліва), де C_1, R_1 та C_2, R_2 – фільтри верхніх частот, а C_3, R_4 та C_4, R_5 – фільтри нижніх частот. Модель сигналу первинного перетворювача потенціометричного типу представлено джерелом напруги V_1 . Для реалізації моделі первинного перетворювача зі струмовим виходом використано функціональний компонент керованого джерела струму G_1 , вихідне коло якого шунтується резистором R_G . Цей резистор (в наведеному прикладі – $R_G = 1E5$ Ом) в моделі перетворювача зі струмовим виходом представляє його вихідний опір (для ідеального струмового перетворювача ($R_G \rightarrow \infty$)).

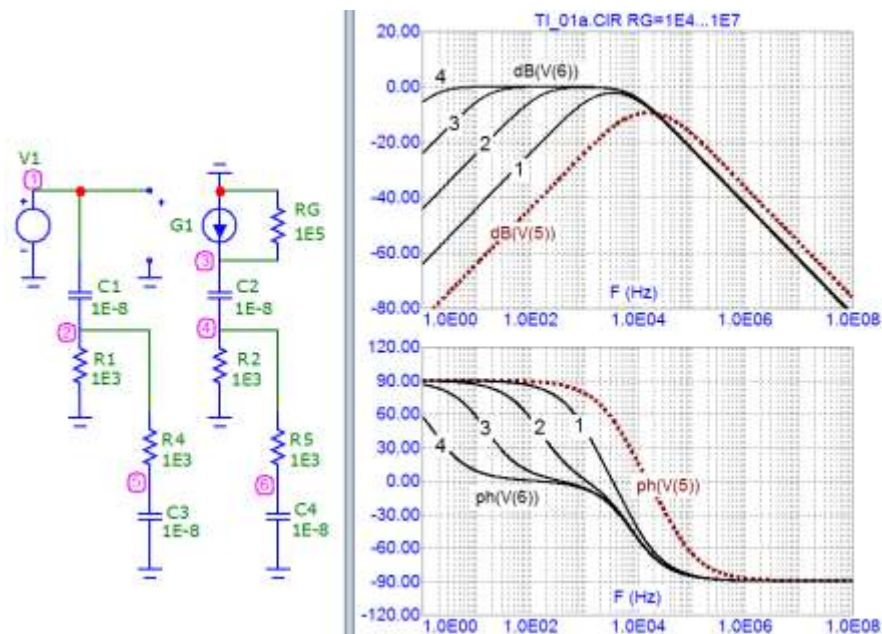


Рис. 1. Порівняння АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) схем частотно-селективних перетворювачів (зліва) з потенціометричним (V(5)) та струмовим (V(6)) виходом при: $R_G = 1E4$ (1), $1E5$ (2), $1E6$ (3), $1E7$ (4)

З метою порівняння процесу фільтрування сигналів обох типів перетворювачів в нормалізованому виді та з врахуванням вхідного імпедансу фільтрів (зокрема, враховуючи опори їх резисторів $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1E3$ Ом) коефіцієнт перетворення напруга – струм перетворювача G_1 становить $K_G = 1E-3$ А/В. Вихідний сигнал смугового фільтра перетворювача потенціометричного типу представлено напругою V(5), а перетворювача зі струмовим виходом – напругою V(6).

Результати порівняльних модельних досліджень амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик цих фільтрів представлено (рис. 1, справа) коефіцієнтами передачі $\text{dB}(V(5))$, $\text{dB}(V(6))$ в дБ та фазовими затримками $\text{ph}(V(5))$, $\text{ph}(V(6))$ в градусах. Дослідження проводилися для набору значень вихідного опору перетворювача зі струмовим виходом $R_G = 1E4$ (1), $1E5$ (2), $1E6$ (3), $1E7$ (4). Отримані результати демонструють закономірності ефекту фільтрування сигналу перетворювачів зі струмовим виходом, зокрема їх відмінність від перетворювачів потенціометричного типу та залежність смуги частот пропускання від вихідного опору R_G . Можна бачити, що при збільшенні R_G смуга частот пропускання зростає, а відтак, ефективність смугового фільтру зменшується.

Вирішення цієї проблеми базується на використанні у сигнальному колі вимірювальних перетворювачів зі струмовим виходом спеціалізованих фільтрів на гіраторах – функціональних схемних вузлах перетворення реактивного імпедансу, що синтезують реактивне навантаження індуктивного типу з використанням лише ємнісних компонентів. Сучасним представником спеціалізованих сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів на основі гіраторів є інтегральна схема E909.07 [16].

Однак, використання таких спеціалізованих інтегральних схем в мікроелектронних сенсорах, зокрема в концепції IoT, призводить до збільшення їх габаритів та енергоспоживання і є небажаним. Таким чином, вирішення задачі подальшого розвитку фотovoltaїдних мікроелектронних сенсорів передбачає розроблення вбудованих систем сигнального перетворення з одночиповим інтегруванням всіх компонентів їх інтерфейсу.

3. Мета роботи

Метою роботи є структурний синтез, схемотехнічна реалізація та дослідження параметрів апаратно-програмної вбудованої системи фотovoltaїдних мікроелектронних сенсорів, що забезпечує ефективну частотну селекцію сигналу з використанням одночіпових систем на кристалі.

4. Структурна схема та функціонування сигнального тракту

У відповідності до вищезгаданих вимог сигнальний тракт вбудованої системи фотovoltaїдних мікроелектронних сенсорів здійснено на платформі вбудованої програмованої системи на кристалі PSoC 5 LP з широким набором програмно керованих вузлів аналогового інтерфейсу, зокрема, операційні підсилювачі, компаратори, блоки на перемикальних конденсаторах, джерела опорної напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплексори, синтезатори сигналів тощо.

Основними компонентами сигнального тракту (рис. 2) розробленої вбудованої системи PSoC є: Z_X – первинний перетворювач сенсорного пристрою, зокрема, фотодіод; GAF – аналоговий інтерфейс на основі схеми гіратора; PGA – підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення K_V ; SD – детектор на основі синхронного демодулятора з керуванням синхронізуючими імпульсами CP; ADC – аналого-цифровий перетворювач типу Sigma-Delta; DMA – пам'ять; DF – смуговий цифровий фільтр. Вихідний цифровий сигнал D_{OUT} передається з використанням провідного чи безпроводного інтерфейсу. Керування режимами роботи вузлів сигнального тракту здійснюється з використанням API команд.

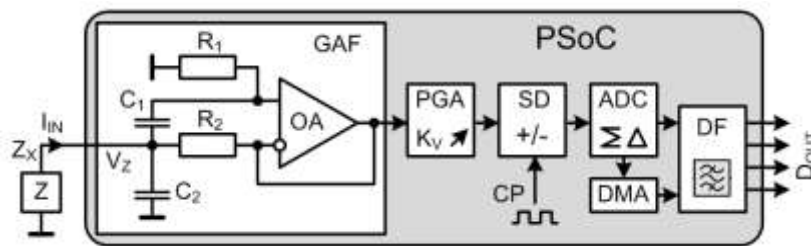


Рис. 2. Структурна схема сигнального тракту

Схема гіратора GAF реалізована на операційному підсилювачі OA, що функціонує в режимі повторювача напруги, та пасивних компонентах – R_1 , R_2 , C_1 . Конденсатор C_2 є допоміжним та використовується лише при необхідності подальшого підвищення коефіцієнту селекції. Функціонування цієї схеми описується системою рівнянь функціонального зв'язку між векторами струмів \dot{I} , напруг \dot{U} , та комплексних опорів \dot{Z} , індекси умовних позначень яких визначаються позначеннями компонентів на рис. 2:

$$\begin{cases} \dot{I}_{IN} = \dot{I}_{R1} + \dot{I}_{R2} \\ \dot{U}_{R2} = \dot{U}_{C1} \\ \dot{U}_Z = \dot{I}_{IN} \dot{Z}_{IN} \\ \dot{U}_Z = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{R1} \end{cases}$$

Для наближеного розрахунку частотної залежності вхідного імпедансу Z_{IN} , провівши заміну векторів струмів та напруг на їх модульні значення $\dot{U} \Rightarrow U$, $\dot{I} \Rightarrow I$, запишемо

$$U_{C1} = U_Z - U_{R1}; \quad I_{C1} = \frac{U_Z}{Z_{C1} + R_1}; \quad Z_{C1} = \frac{1}{\omega C_1}; \quad I_{R2} = U_Z \frac{Z_{C1}}{(Z_{C1} + R_1)R_2}.$$

Провівши відповідні перетворення цих виразів, отримуємо

$$Z_{IN} = \frac{(1 + \omega R_1 C_1)R_2}{1 + \omega R_2 C_1}.$$

Прийнявши до уваги, що такий розрахунок не враховує фазовий зсув векторів напруг та струму, тобто представляє лише перше наближення, все ж можна виявити певні закономірності

частотної залежності вхідного імпедансу Z_{IN} . Зокрема, на низьких частотах ($\omega \rightarrow 0$) має місце наближення вхідного імпедансу до $Z_{IN} \rightarrow R_2$. Натомість, на високих частотах ($\omega \rightarrow \infty$) має місце $Z_{IN} \rightarrow R_1$.

Таким чином, змінюючи співвідношення між резисторами R_1 та R_2 представляється можливим синтез імпедансу, як ємнісного ($R_1 / R_2 < 1$), так і індуктивного ($R_1 / R_2 > 1$) характеру. Зокрема, із зростанням частоти при $R_1 / R_2 = 10^4$ отримуємо зріст імпедансу в децибелах на

$$K_{ZIN} \text{ (dB)} = K_{ZIN} (\omega \rightarrow \infty) / K_{ZIN} (\omega \rightarrow 0) = 20 \log (10^4) = 80 \text{ dB}.$$

Приклади SPICE модельних досліджень параметрів розглянутої схеми гіратора, що підтверджують вищенаведені викладки та дають більш точні дані з врахуванням фазових характеристик сигнального тракту, наведені на рис. 3. Модель первинного перетворювача GPHD представлена джерелом вхідної напруги V_{IN} , перетворювачем напруга-струм $V \rightarrow I$ та діодом D_1 , параметри якого характеризують відповідні характеристики фотодіода. Повторювач напруги представлено схемним компонентом X_1 .

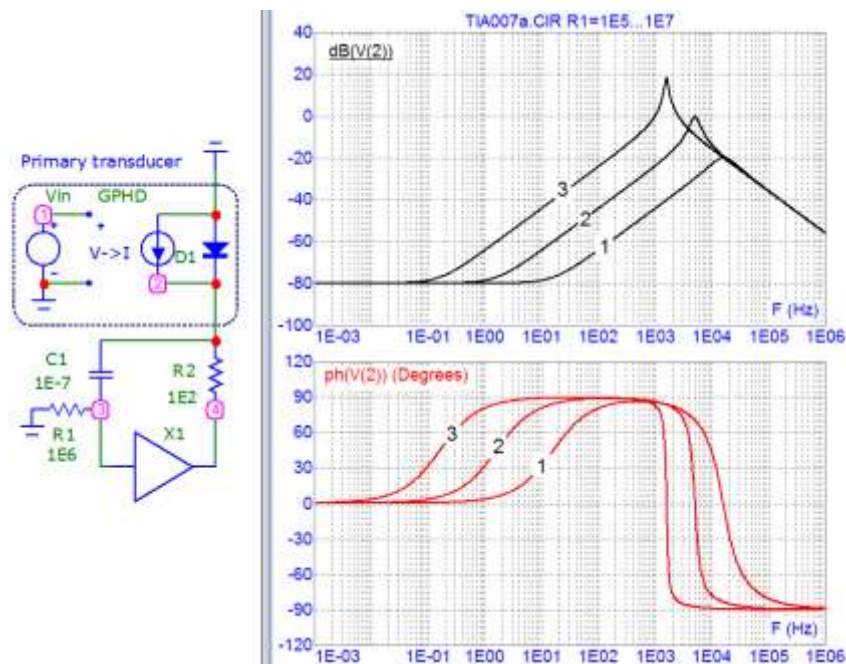


Рис. 3. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) схеми гіратора при $R_1 = [1E5 (1), 1E6 (2), 1E7 (3)]$ Ом

Результати модельних досліджень амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик сигнального кола представлено (рис. 3, справа) коефіцієнтами перетворення напруги $\text{dB}(V(2))$ в дБ та фазовими затримками $\text{ph}(V(2))$ в градусах. Ці коефіцієнти характеризують ефект зростання імпедансу гіратора у вузлі 2 в області частотної селекції інформативного сигналу. Дослідження проводилися для набору значень опору резистора $R_1 = [1E5 (1), 1E6 (2), 1E7 (3)]$ Ом. Можна бачити, що розглянута схема гіратора забезпечує високої частотної селекції сигналу в колах з струмовим виходом первинного перетворювача. Так, при $R_1 = 1E6$ Ом коефіцієнт селекції становить $K_{ZIN} \approx 80$ дБ, а при $R_1 = 1E5$ Ом - $K_{ZIN} \approx 100$ дБ. При цьому смуга частот селекції сигналу визначається параметрами RC кіл гіратора, паразитною ємністю первинного перетворювача (в даному випадку – діодної D_1 структури фотодіода) та частотною характеристикою операційного підсилювача в режимі повторювача напруги (в даному випадку – компоненту X_1). Подальше підвищення частотної селекції забезпечується каскадами синхронного детектування сигналу та його цифрової фільтрації.

5. Реалізація та параметри апаратно-програмної вбудованої системи

Схема сигнального тракту вбудованої програмованої системи сенсорного фотovoltaїдного пристрою реалізована на компонентах кристалу PSoC 5 LP (рис. 4). В її склад входять вищерозглянутий гіратор на операційному підсилювачі Opamp_1, два каскади на програмно керованих підсилювачах PGA_1 та PGA_2, формувач сигналу на цифро-аналоговому перетворювачі WaveDAC8_1 (8-bit Waveform Generator), синхронному детекторі на міксері Mixer_1, аналого-цифровий перетворювач ADC_DelSig_1 (Delta-Sigma Analog-to-Digit Converter) з DMA_1 (Direct Memory Access) записом даних в оперативну пам'ять, програмно-керований цифровий фільтр Filter_1, формувач Vref (Reference Voltage Generator) опорної напруги $V_{dda}/2$, послідовний асинхронний інтерфейс UART та ряд інших компонентів. Це, зокрема, допоміжні вузли формувач сигналу – таймер Timer_1, керуючий регістр Control_Reg_1, подільник частоти FreqDiv_1 тощо.

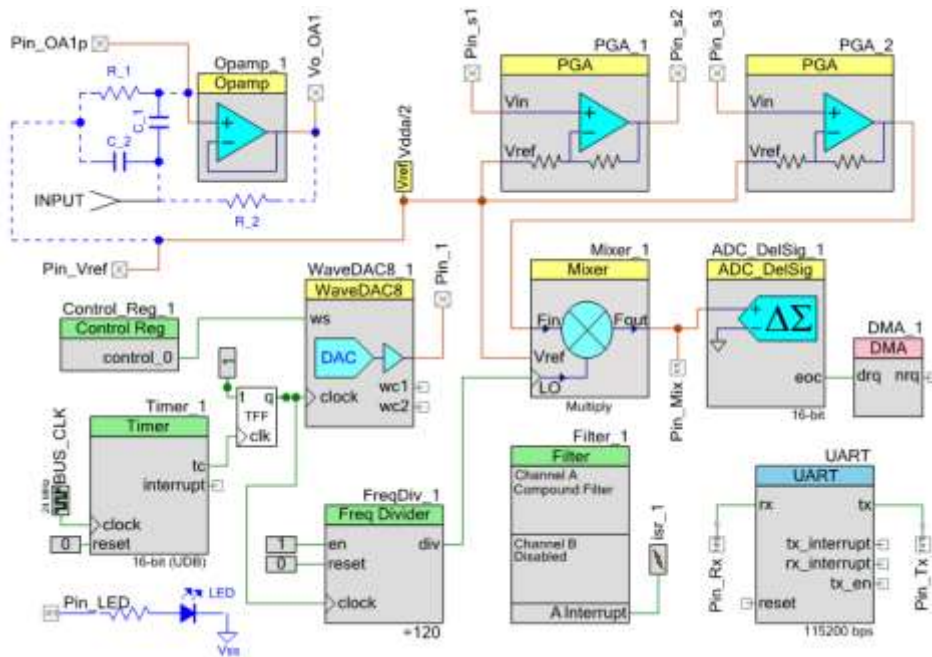


Рис. 4. Схема сигнального тракту на компонентах PSoC

Більшість з компонентів вбудованої системи передбачають можливість програмного керування режимами роботи. Зокрема, на рис. 5 показано вікно програмного керування цифрового фільтру, режими роботи та АЧХ якого керується такими параметрами, як клас фільтру Filter class, тип фільтру Filter type, кількість стадій перетворення Filter stage, коефіцієнт підсилення Filter gain, центральна частота смуги фільтрування Center (кГц) та ширина смуги Bandwidth (кГц). В залежності від цих параметрів та режимів вимірювання коефіцієнт селекції сигналу становить від 40 дБ до 80 дБ.

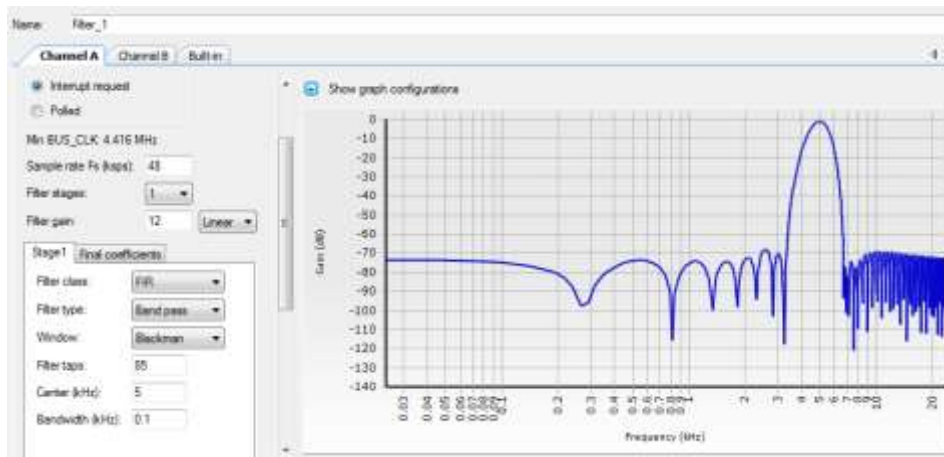


Рис. 5. Вікно програмного керування цифрового фільтра та його АЧХ

Макет розробленої вбудованої системи частотної селекції сигналу на PSoC та вікна програмного забезпечення керування її режимами роботи представлено на рис. 6. Інтерфейс програмного керування режимами вимірювання передбачає можливість вибору частоти та форми задаючого сигналу, коефіцієнту підсилення, параметрів фільтрування, параметрів інтерфейсу тощо. Результати вимірювань візуалізуються у двох графічних вікнах Data Graph 1 та Data Graph 2.

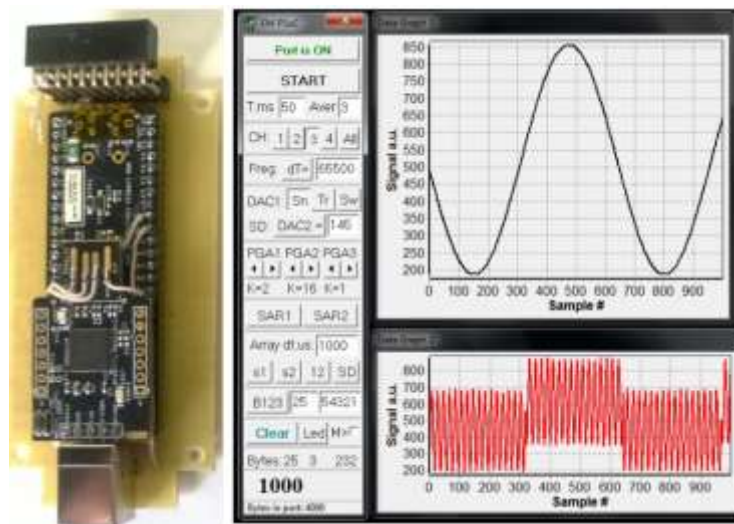


Рис. 6. Макет вбудованої системи на PSoC та вікна програмного забезпечення

Крім фотovoltaїдних сенсорів, представлена система пройшла апробацію в ряді наших розробок інформаційно-вимірювальних пристроїв, зокрема, в пристроях просторового трекінгу (tracking) на магнітних котушках [17, 18]; вимірювальних перетворювачах імпедансної спектроскопії (impedance measuring transducers) [19]; пристроях термічного аналізу [20].

6. Висновки

Проведено синтез SPICE моделей та аналіз параметрів сигнальних кіл фотovoltaїдних сенсорів, що забезпечують частотну селекцію на смугових фільтрах. Реалізація сигнального тракту здійснена на платформі програмованої системи на кристалі PSoC. Використано інтегральні схеми PSoC 5 LP з широким набором програмно керованих вузлів аналогового інтерфейсу AFE. В склад сигнального тракту вбудованої системи входять гіратор, програмно керований підсилювач, синхронний демодулятор, аналого-цифровий перетворювач та цифровий фільтр. зокрема, операційні підсилювачі, компаратори, блоки на перемикальних конденсаторах, джерела опорної

напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплектори, синтезатори сигналів тощо. Показана ефективність змішаного аналогового та цифрового перетворення сигналу.

Основні параметри розробленої вбудованої системи частотної селекції: напруга живлення - 5 В (зокрема, від USB інтерфейсу); струм живлення – не більше 20 мА; діапазон частот – від 1 Гц до 100 кГц; форма задаючого сигналу – прямокутна, синусоїдальна, трикутна; коефіцієнт підсилення сигналу – від 1 до 10000; коефіцієнт селекції корисного сигналу – до 140 дБ; галузі застосування – фотовольтаїдні сенсори, пристрої просторового трекінгу (tracking) на магнітних котушках, вимірювальні перетворювачі імпедансної спектроскопії (impedance measuring transducers), пристрої термічного аналізу тощо.

7. Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-яких фінансових чи інших конфліктів, що стосується роботи.

Список використаних джерел

- [1]. J. Huang, R. Li, J. An, D. Ntalasha, F. Yang, K. Li, "Energy-Efficient Resource Utilization for Heterogeneous Embedded Computing Systems", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 66, Issue 9. - pp. 1518 – 1531, 2017.
DOI: 10.1109/TC.2017.2693186.
- [2]. H. Hu, T. Islam, A. Kostyukova, S. Ha, S. Gupta, "From Battery Enabled to Natural Harvesting: Enzymatic BioFuel Cell Assisted Integrated Analog Front-End in 130nm CMOS for Long-Term Monitoring", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 66, Issue 2, pp. 534 – 545, 2019.
DOI: 10.1109/TCSI.2018.2869343.
- [3]. B. Kim, "Dithering Loopback-Based Prediction Technique for Mixed-Signal Embedded System Specifications", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Vol. 63, Issue 2, pp. 121 – 125, 2016.
DOI: 10.1109/TCSII.2015.2482419.
- [4]. G. Xie, Y. Chen, Y. Liu, Y. Wei, R. Li, K. Li, "Resource Consumption Cost Minimization of Reliable Parallel Applications on Heterogeneous Embedded Systems", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 13, Issue 4, pp. 1629 – 1640, 2017.
DOI: 10.1109/TII.2016.2641473.
- [5]. D. Jo, G. Kim, "ARIoT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 62, Issue 3, pp. 334 – 340, 2016.
DOI: 10.1109/TCE.2016.7613201
- [6]. I. Akita, T. Okazawa, Y. Kurui, A. Fujimoto, T. Asano, "A Feedforward Noise Reduction Technique in Capacitive MEMS Accelerometer Analog Front-End for Ultra-Low-Power IoT Applications", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 55, Issue 6. - pp. 1599 – 1609, 2020.
DOI: 10.1109/JSSC.2019.2952837.
- [7]. H. Serra, I. Bastos, J. L. A. de Melo, "A 0.9-V Analog-to-Digital Acquisition Channel for an IoT Water Management Sensor Node", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Vol. 66, Issue 10, pp. 1678 – 1682.
DOI: 10.1109/TCSII.2019.2933276.
- [8]. Yu. Yang, J. Yang, "Low-power low-noise inductorless front-end for IoT applications", 6th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE), 2017.
DOI: 10.1109/ISNE.2017.7968711.
- [9]. PSOC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc>.
- [10]. R. Barazarte, G. Gonzalez, M. Ehsani, "Generalized Gyrator Theory // *IEEE Transactions on Power Electronics*. - 2010. – Vol. 25, Issue 7. – PP. 1832 – 1837.
DOI: 10.1109/TPEL.2010.2042820.
- [11]. R. Chen, Z. Yang, "CMOS Transimpedance Amplifier for Visible Light Communications", *IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems*, Vol. 23, Issue 11, – pp. 2738 – 2742, 2015.
DOI: 10.1109/TVLSI.2014.2365462.
- [12]. F. Alam, R. Mehmood, I. Katib, N. Albogami, A. Albeshri, "Data Fusion and IoT for Smart Ubiquitous Environments: A Survey", *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 9533 – 9554, 2017.
DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2697839.
- [13]. E. Song, G. FitzPatrick, K. Lee, "Smart Sensors and Standard-Based Interoperability in Smart Grids", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, Issue 23, pp. 7723 – 7730, 2017.
DOI: 10.1109/JSEN.2017.2729893.

- [14]. A. Grimmer, W. Haselmayr, R. Wille, "Automated Dimensioning of Networked Labs-on-Chip", *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 38, Issue 7, pp. 1216 – 1225, 2019.
DOI: 10.1109/TCAD.2018.2834402.
- [15]. W. Xu, J. Wang, H. Shen, H. Zhang, X. You, "Indoor Positioning for Multiphotodiode Device Using Visible-Light Communications", *IEEE Photonics Journal*, Vol. 8, Issue 1, 2016.
DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2513198.
- [16]. Transimpedance amplifier with high sensitivity E909.07. ELMOS Semiconductor AG, Data Sheet, Access mode: <http://www.elmos.com>, 2014.
- [17]. R. Holyaka, T. Marusenkova, D. Fedasyuk, "Signal model for spatial position sensors in magnetic tracking systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), pp. 5–18, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.005>.
- [18]. R. Holyaka, T. Marusenkova, D. Fedasyuk, "Measuring logarithmic signal converter for magnetic tracking systems", *ISTCMTM, Measuring Equipment and Metrology*, -Vol. 81 (1), pp. 16-21, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.01.016>
- [19]. G. Barylo, R. Holyaka, I. Prudyus, S. Fabirovskyy, "Technique of increasing the impedance measuring transducers accuracy at inharmoniousness signals", *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. Radioaparotobuduv*, № 70, pp.30-36 2017. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.72.62-68>
- [20]. O. Boyko, R. Holyaka, Z. Hotra, A. Fechan, H. Ivanyuk, O. Chaban, T. Zyska, I. Shedreyeva, "Functionally integrated sensors of thermal quantities based on optocoupler", In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. International Society for Optics and Photonics*, Vol. 10808F, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2501632>