

Михайло Мельник¹, Роман Голяка², Роман Винарович³, Павло Денисюк⁴

¹ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8593-8799

² Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: Roman.L.Holiaka@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-7720-0372

³ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: Roman.I.Vynarovych@lpnu.ua, ORCID 0009-0000-3462-977X

⁴ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: Pavlo.Y.Denyshuk@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-6544-0128

ПРОГРАМОВАНА ВБУДОВАНА СИСТЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АДАПТИВНОЇ АКУСТИКИ

Отримано: Лютий 20, 2025 / Переглянуто: Лютий 28, 2025 / Прийнято: Березень 03, 2025

© Мельник М., Голяка Р., Винарович Р., Денисюк П., 2025

<https://doi.org/>

Анотація. У статті розглянуто структуру та функціональні можливості програмованої вбудованої системи дослідження параметрів адаптивної акустики AMES (Acoustic Measurement Embedded System). Основною платформою реалізації є програмована система на кристалі PSoC 5 LP, що забезпечує широкі можливості програмного керування процесами вимірювання акустичних параметрів. Запропоновано метод змішаного сигнального перетворення на основі селективного підсилення заряду, що дає змогу підвищити завадостійкість і точність вимірювань. Проведено аналіз сучасних підходів до адаптивної акустики та визначено основні тенденції її розвитку в контексті автоматизованого проектування. Отримані результати демонструють ефективність використання запропонованої системи для дослідження акустичних характеристик закритих приміщень.

Ключові слова: адаптивна акустика, вбудовані системи, PSoC, змішане сигнальне перетворення, САПР.

Вступ

Дослідження акустичних характеристик приміщень і створення сучасних систем адаптивної акустики [1] є складними міждисциплінарними завданнями, які охоплюють численні фактори та потребують використання високоточних технічних засобів [2]. Така складність зумовлена великою кількістю параметрів, що використовуються для комплексної оцінки звукових властивостей середовища [3].

Аналіз поточних трендів у галузі адаптивної акустики свідчить про зростаючий вплив інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проектування на розвиток акустометричних систем. Одним із ключових напрямів є спеціалізація обчислювальних засобів на аналізі параметрів довкілля, сенсорних технологіях і засобах взаємодії людини з машиною. Ці підходи інтегруються в рамки концепцій повсюдного обчислення (Ubiquitous Computing) та Індустріального Інтернету Речей (IIoT), які ставлять вимоги до універсальності, масштабованості та уніфікації рішень.

Ще одним важливим напрямом є розвиток вимірювальних технологій у рамках концепцій "інтелектуальних" систем, таких як Smart Tech і Smart Home. У цьому контексті виникло поняття адаптивної акустики, як галузі, що динамічно розвивається на стику акустичних вимірювань та інтелектуального керування.

Крім того, істотне значення має вдосконалення систем автоматизованого проектування (САПР) у сфері акустичних досліджень. До їх складу входять як інформаційні, так і математичні

моделі, що дозволяють проектувати системи дослідження акустики приміщень і здійснювати обробку інформативних сигналів у межах акустометричних систем.

Подальший прогрес у цій галузі стикається з низкою протиріч, зокрема між високими вимогами до точності, складності та багатофункціональності технічних рішень і водночас — потребами в масштабованості, мінімізації енергоспоживання, вартості та габаритів, що диктуються концепціями УС та ПоТ. Крім того, системи повинні надійно функціонувати в різноманітних умовах без необхідності постійного обслуговування чи складного налаштування.

Запропоноване дослідження присвячено розробці апаратно-програмних рішень для вивчення параметрів компонентів адаптивної акустики відповідно до зазначених вимог. Основою цієї розробки є методи змішаного сигнального перетворення (Mixed Signal Front-End), реалізовані в рамках вбудованих систем на одному кристалі (Mixed Signal System-on-Chip, SoC).

Постановка проблеми

Дослідження акустичних характеристик закритих приміщень є складною багатофакторною проблемою, що потребує застосування сучасних інформаційно-вимірювальних технологій. Існуючі методи та системи не завжди відповідають вимогам точності, завадостійкості та автоматизованої обробки сигналів. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових апаратно-програмних засобів, здатних здійснювати точні вимірювання з можливістю гнучкого налаштування параметрів. Основними завданнями дослідження є:

- аналіз сучасних методів та засобів дослідження адаптивної акустики;
- розроблення архітектури програмованої вбудованої системи для вимірювання акустичних параметрів;
- реалізація методу змішаного сигнального перетворення на основі селективного підсилення заряду;
- експериментальна перевірка ефективності запропонованої системи.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

Проблематика адаптивної акустики представлена в ряді сучасних монографій. Зокрема, методи виявлення голосової активності, оцінка шуму та адаптивні фільтри для покращення акустичного сигналу розглянуті в монографії «Методи захисту від шуму в автоматичному розпізнаванні мовлення» [4], методи контролю акустичного відлуння в монографії «Цифрова передача та покращення мови» [5], методи захисту від шуму в автоматичному розпізнаванні мовлення — в монографії «Машинне навчання на акустичній моделі для надійного розпізнавання мовлення» [6].

Дослідження компонентів адаптивної акустики, зокрема акустичних каналів, акустичних масивів та матриць, гучномовців тощо представлені в наукових публікаціях: адаптивне формування променя для сигналу постійного модуля на основі акустичного векторного масиву [7]; кругова акустична векторна матриця датчиків для режиму формування променя [8]; аналіз акустичного опору стінки каналу повітропроводу на основі кінцевих елементів та адаптивного еволюційного алгоритму [9]; придушення акустичного відлуння та виявлення подвійного розмови за допомогою оцінених імпульсних характеристик гучномовця [10]; покращення характеристик передачі з адаптивною мікрофонною решіткою [11]; дослідження надійного адаптивного формування променя на основі матриці акустичних векторних датчиків [12].

Науково-прикладні задачі змішаного сигнального перетворення у вбудованих системах на чіпі (Mixed Signal SoC) представлена роботами: матрична оцінка аудіосигналів за допомогою сліпого мікшування [13]; нерегресійний підхід для генератора моделі поведінки у верифікації системи змішаних сигналів [14]; методи виявлення несправностей для дизайну SoC з аналоговим/змішаним сигналом [15]; нова конструкція комірок аналогового та змішаного сигналу, використовуючи перехресну структуру зворотного зв'язку [16]; конфігурована та малопотужна SoC зі змішаним сигналом для портативних програм моніторингу ЕКГ [17]; змішаний сигнал SoC на базі Bio-Sensor Node для довготривалого моніторингу здоров'я [18]; система компенсації зміщення змішаного сигналу для фронтендів оптичних приймачів з кількома Гбіт/с [19]; симуляція змішаних

сигналів у фазовій автопідстройці частоти та визначення характеристик за допомогою поведінкового моделювання [20].

Відтак проведений аналіз останніх досліджень та наукових публікацій показує значну актуальність тематики адаптивної акустики та розкриває основні тенденції подальшого розвитку її компонентів, зокрема засобів сигнального перетворення з реалізацією в концепції вбудованих систем на чіпі.

Виклад основного матеріалу

Структура запропонованої вбудованої системи для аналізу параметрів елементів адаптивної акустики, умовно іменованої AMES (Acoustic Measurement Embedded System), подана на рис. 1. Основу цієї системи складає програмований чип – PSoC (Programmable System on Chip), розроблений компаніями Cypress / Infineon. На базі цього рішення реалізовано як структурну організацію, так і алгоритмічне забезпечення процедур конфігурації та керування вимірювальними процесами. Зокрема, система забезпечує програмну модифікацію таких параметрів сигналу, як частота, фаза та гармонічні складові. Обчислювальне ядро PSoC поєднує в собі як цифрові, так і аналогові функціональні блоки, мікропроцесорні модулі, оперативну та постійну пам'ять, а також системні ресурси, необхідні для енергоменеджменту й інтегрованого програмування. Для реалізації поставлених завдань було обрано мікросистему серії PSoC 5 LP, яка вирізняється наявністю широкого спектра конфігурованих вузлів для обробки аналогових і цифрових сигналів у змішаному середовищі. Крім основного обчислювального модуля, до складу AMES також входять модулі живлення (Power Unit) та підсилення сигналів (Power Amplifier), які забезпечують керування виконавчими пристроями – акустичними перетворювачами, що генерують звукові хвилі у досліджуваному середовищі.

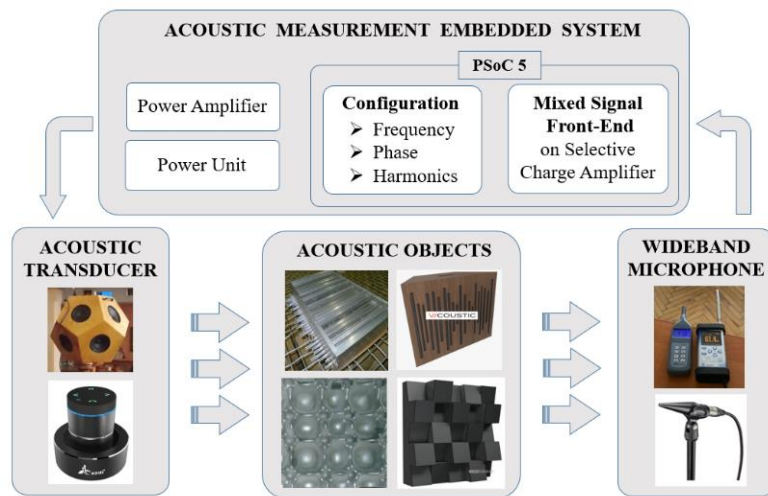


Рис. 1. Структура вбудованої системи дослідження акустичних параметрів AMES

У запропонованій системі AMES частотна селекція реалізована через набір режимів Mode #N, до яких входять зокрема методи кореляційного (мультиплікативного) аналізу — Mode A, а також квадратурного (знакового) детектування — Mode Q. Ці режими дозволяють адаптивно обирати оптимальні алгоритми для обробки сигналів залежно від умов та характеристик вимірювань. Особливістю розробленого вхідного тракту системи є використання підходу змішаного сигнального перетворення (Mixed Signal Front-End), реалізованого за допомогою методу селективного підсилення електричного заряду (Selective Charge Amplifier). Застосування такого методу дозволяє ефективно фільтрувати завади та забезпечує високу точність вимірювання змін електричного заряду, що виникають на виході п'єзоелектричних сенсорів. Це, в свою чергу, істотно підвищує достовірність результатів акустичних вимірювань у складних умовах.

Основою методу селективного підсилення заряду є використання ефекту Міллера, що дозволяє реалізувати високоточне перетворення сигналу за принципом «заряд-напруга». Такий

підхід забезпечує підвищену стійкість до впливу дестабілізуючих чинників, серед яких основну роль відіграють паразитні ємності п'єзоелектричних сенсорів та сигнальних ліній (наприклад, екранізованих або коаксіальних кабелів). Особливо помітні переваги цього методу спостерігаються в задачах аналізу низькочастотних коливань, де традиційні мікрофонні технології демонструють обмежену точність через чутливість до зовнішніх перешкод та недостатню якість сигналу. Застосування селективного підсилення заряду в таких випадках дозволяє істотно підвищити достовірність і стабільність результатів вимірювання.

Основні елементи графічного інтерфейсу програмного забезпечення вбудованої системи AMES подано на рис. 2. У процесі вимірювання в головному вікні AMES Control здійснюється налаштування режимів роботи (Mode #1, #2, #3), параметрів частоти (Frequency), гармонічних складових (Harmonics) та фази (Phase). Крім цього, реалізовано можливість програмного регулювання коефіцієнта підсилення (PGA Gain) у сигнальному тракті між зарядовим підсилювачем та аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Керування тривалістю циклів вимірювання та виведенням результатів візуалізації здійснюється шляхом встановлення параметра Period. Функції Data save та Clear відповідають відповідно за збереження отриманих даних і очищення вікна результатів.

Графічне подання вимірюваної інформації реалізовано через спеціалізовані вікна:

Wave Actuator — відображення форми сигналу, який активує генерацію акустичних хвиль;

SAR oscilloscope — візуалізація сигналів у реальному часі, отриманих із використанням швидкісного аналого-цифрового перетворювача типу SAR ADC (Successive Approximation Register Analog-to-Digital Converter);

Measurement data — відображення числових результатів згідно з вибраними режимами та методами вимірювання.

Приклади реалізації різних режимів Mode AMES, а також форми сигналів активації акустичних хвиль для окремих сценаріїв: Case #1: Harmonic #1, Phase = 0°; Case #2: Harmonic #1, Phase = 30°; Case #3: Harmonic #2, Phase = 0°; Case #4: Harmonic #2, Phase = 60° — представлено на рис. 3.

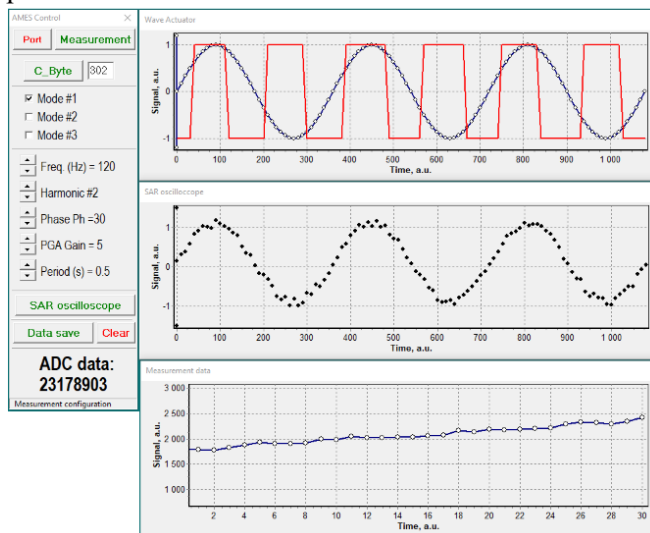


Рис. 2. Інтерфейсні компоненти програмного забезпечення системи AMES

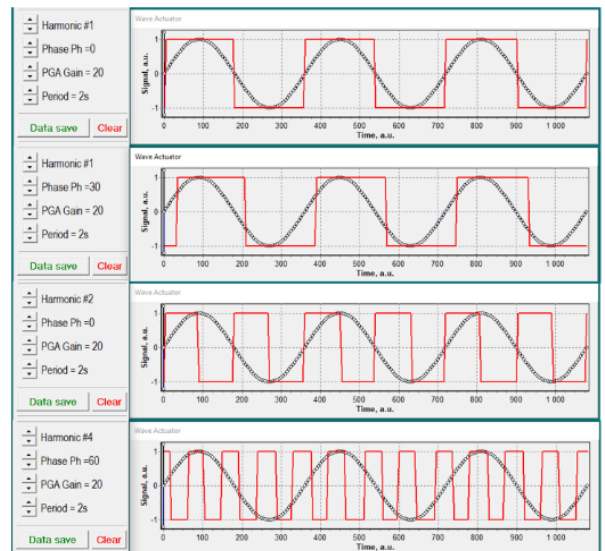


Рис. 3. Ілюстрація реалізації режимів вимірювання в системі AMES

До складу програмно-керованих модулів вбудованої системи AMES, що реалізовані на основі мікросхеми PSoC 5 LP, входить низка функціональних компонентів, які забезпечують вимірювання, генерацію сигналів та обробку даних. Серед них — таймери (Timer), цифро-аналоговий перетворювач з можливістю формування довільної хвилі (Wave DAC), графічне налаштування якого наведено на рисунку 5, а також швидкодіючий SAR ADC (Successive Approximation Register ADC) та високоточний АЦП типу DelSig ADC (Delta-Sigma Analog-to-Digital Converter). Крім того, функціональність системи розширюється завдяки операційним підсилювачам (Opamp), аналоговим

мультиплексорам (A Mux), регістру керування (Control Reg), генератору опорної напруги (Vref) та асинхронному послідовному інтерфейсу UART, що забезпечує зв'язок з іншими пристроями. Схема генерації сигналів за допомогою Wave DAC представлена на рисунку 4, а вікно конфігурування параметрів цього модуля – на рис. 5.

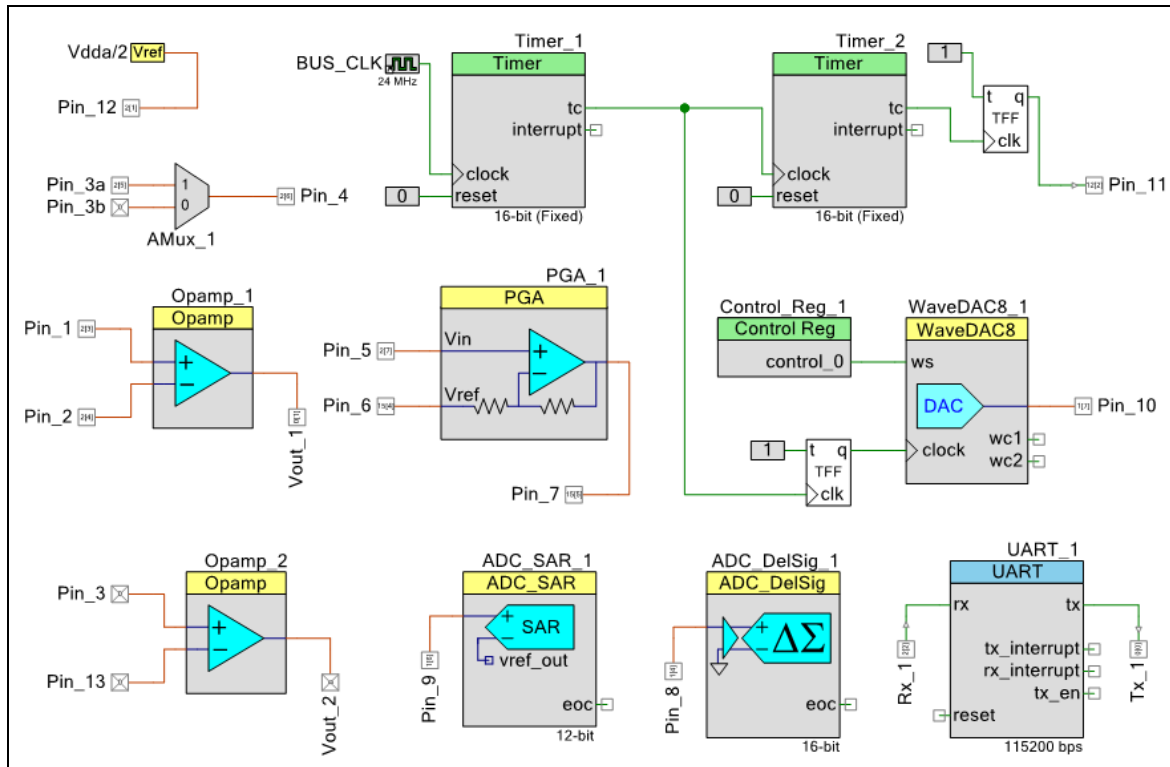


Рис. 4. Основні вузли вбудованої системи AMES

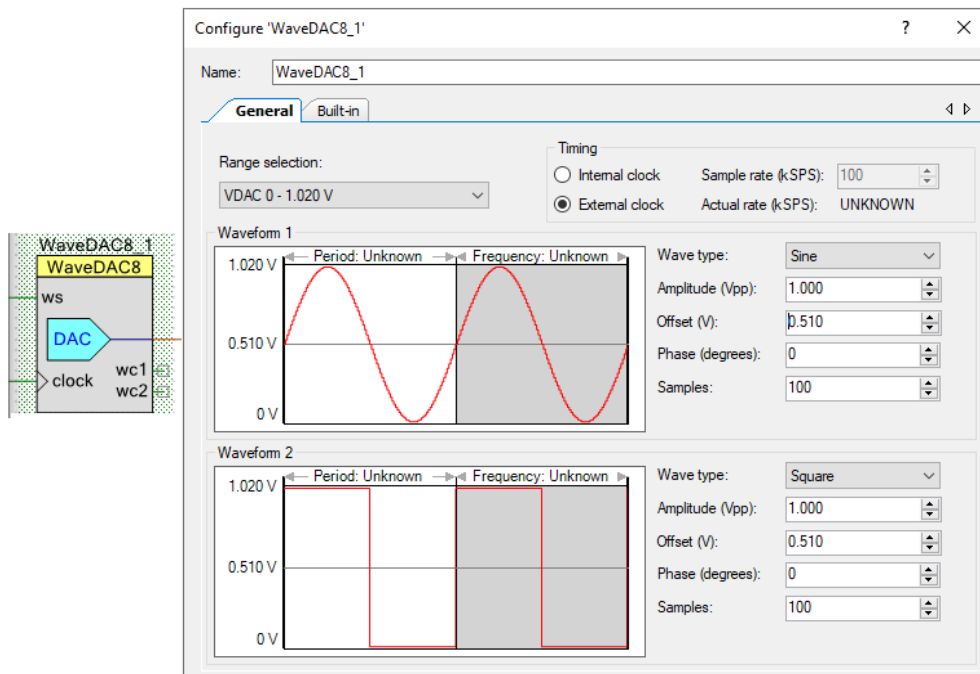


Рис. 5. Віконний інтерфейс налаштування Wave DAC

Ключовим елементом вхідного тракту системи змішаного типу перетворення сигналів є зарядовий підсилювач, функціональна структура якого зображена на рис. 6. Основний принцип його роботи полягає у перетворенні електричного заряду в напругу (charge-to-voltage conversion),

при цьому досягається високий рівень стійкості до впливу зовнішніх електричних збурень і паразитних впливів. Інформативний сигнал формується п'єзоелектричним сенсором QT, який має електричну ємність C_{QT} і генерує заряд Q у відповідь на звукові коливання або механічні вібрації. Цей заряд передається через сигнальний тракт TL на вхід підсилювача, де подається як вхідна напруга V_{IN} . У процесі передачі сигналу можуть виникати небажані викривлення, спричинені впливом паразитних ємностей – C_{P1} та C_{P2} , які є дестабілізуючими факторами системи.

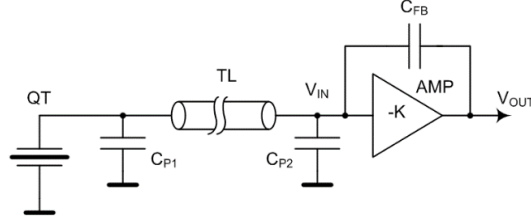


Рис. 6. Функціональна схема зарядового підсилювача

Принцип дії зарядового підсилювача ґрунтується на реалізації від'ємного зворотного зв'язку, який формується через ємнісний елемент C_{FB} . У цьому випадку перезарядження конденсатора зворотного зв'язку відбувається між входом V_{IN} та виходом V_{OUT} підсилювача, що створює умови для стабільного перетворення сигналу. Коефіцієнт підсилення у протифазі, що визначає динаміку взаємозв'язку між вхідним та вихідним колами, задається співвідношенням:

$$K_A = -\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}. \quad (1)$$

Завдяки зворотному зв'язку виникає так званий ефект Міллера, внаслідок чого у вхідному колі формується еквівалентна ємність:

$$C_{IN} = C_{FB}(1 + K_A). \quad (2)$$

При виконанні умови суттєвого домінування ефективної ємності зворотного зв'язку над сумарною паразитною ємністю системи:

$$|C_{FB} \cdot K_A| \gg C_{QT} + C_{P1} + C_{P2}, \quad (3)$$

вираз для вихідної напруги, що за загальним випадком має вигляд:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot K_A = \frac{Q \cdot K_A}{C_{QT} + C_{P1} + C_{P2} - C_{FB} \cdot K_A}, \quad (4)$$

можна спростити до аналітичного співвідношення:

$$V_{OUT} \approx \frac{Q}{C_{FB}}. \quad (5)$$

Таким чином, вихідна напруга зарядового підсилювача стає залежною лише від величини заряду, створеного п'єзоелектричним перетворювачем, і ємності зворотного зв'язку, водночас незалежною від паразитних ємностей вхідного кола. На рис. 7 подано схему заміщення SPICE-моделі зарядового підсилювача, побудовану без врахування параметрів активного підсилювального елемента. Ця модель відображає функціональну структуру пристрою та дозволяє аналізувати його поведінку при взаємодії з джерелом сигналу та навколишніми електричними характеристиками. З урахуванням фізичних властивостей п'єзоелектричного сенсора, його еквівалентна схема (Q-модель) подана у вигляді RC-ланцюга, що включає елементи R_{q1} , R_{q2} , C_{q1} , C_{q2} і активується джерелом сигналу V_{INP} (рис. 8). Такий підхід дозволяє відтворити динаміку генерації заряду при акустичному або вібраційному збудженні. Крім того, паразитні впливи сигнального тракту, включно з ємнісними й омичними втратами на вході підсилювача X_1 , змодельовано за допомогою компонентів C_p і R_p . Зворотне коло підсилювача, яке визначає основні параметри перетворення, описано елементами C_{fb} і R_{fb} . Результати моделювання, отримані для різних значень ємності зворотного зв'язку C_{fb} , підтверджують аналітичні розрахунки, зокрема, на рис. 9 наведено відповідні епюри сигналів, побудовані для трьох випадків: #1 – $C_{fb} = 3 \times 10^{-10}$ F, #2 – $C_{fb} = 1 \times 10^{-10}$ F, #3 – $C_{fb} = 3 \times 10^{-11}$ F. Отримані залежності підтверджують адекватність побудованої моделі й відображають вплив ємності C_{fb} на форму та стабільність вихідного сигналу. Для додаткового

аналізу впливу зовнішніх факторів нестабільності досліджено залежність вхідної та вихідної реакції системи від зміни опору R_p , що моделює омичну складову імпедансу лінії зв'язку між перетворювачем та підсилювачем. Як видно з результатів на рис. 10, поступове зменшення значення R_p (відповідно: #1 – 1×10^5 Ом, #2 – 3×10^5 Ом, #3 – 1×10^6 Ом) призводить до вираженої нестабільності амплітуди та форми сигналів, що вказує на підвищену чутливість вхідного каскаду до параметрів ізоляції. Таким чином, під час проєктування зарядового підсилювача необхідно враховувати ці ефекти. Зокрема, не слід використовувати традиційні схеми інвертуючих операційних підсилювачів, які базуються на простому резистивному зворотному зв'язку, оскільки такі рішення характеризуються недостатньо високим вхідним імпедансом через конструкцію кола зворотного зв'язку. Це може призводити до значних спотворень вимірюваного сигналу у практичних умовах експлуатації.

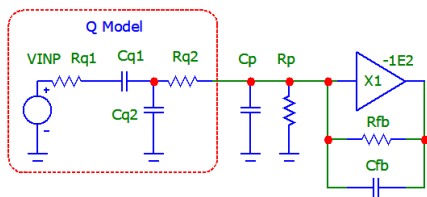


Рис. 7. Еквівалентна схема функціонального моделювання зарядового підсилювача у середовищі SPICE

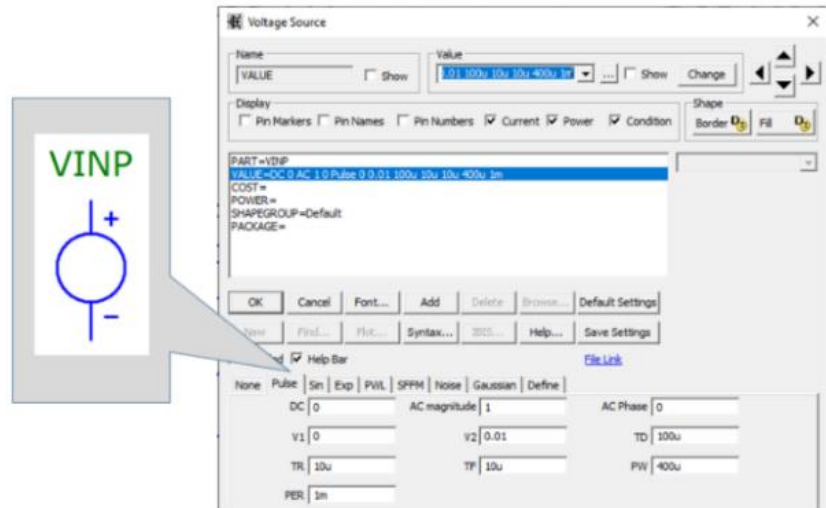


Рис. 8. Конфігурація моделі джерела сигналу VINP для збудження п'єзоелектричного перетворювача

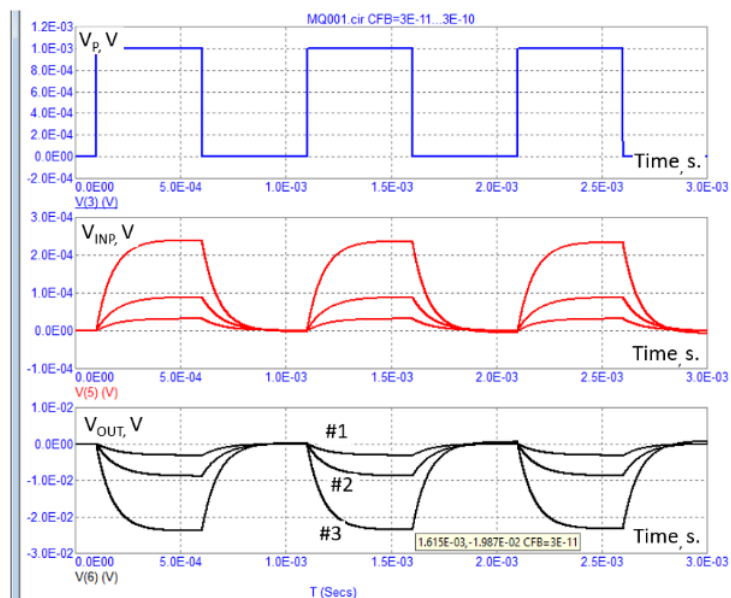
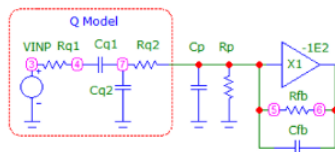


Рис. 9. Результати для різних ємностей зворотного зв'язку $C_{fb} = 3 \times 10^{-10}$ (#1), 1×10^{-10} (#2), 1×10^{-11} (#3)

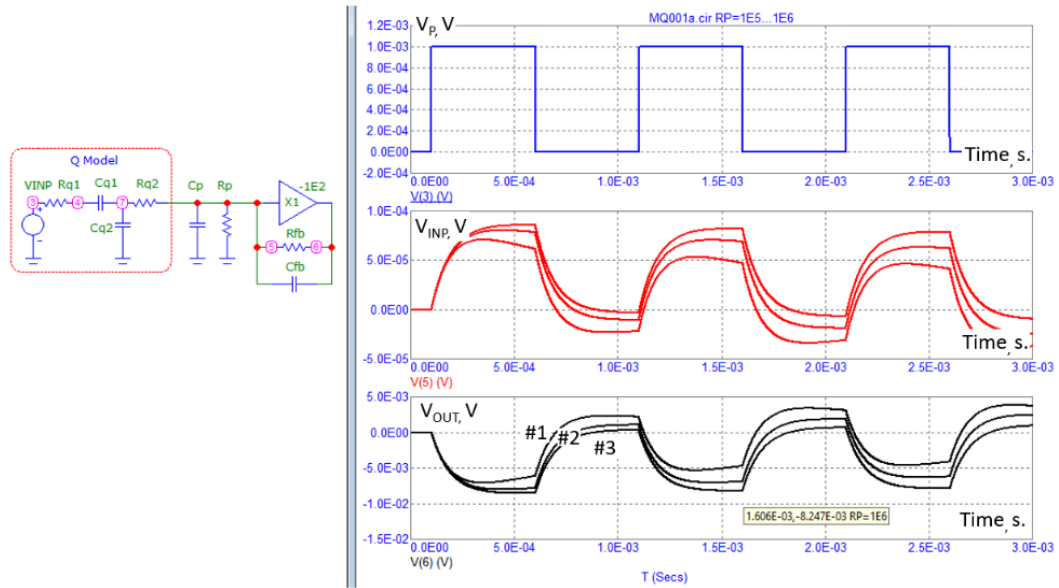


Рис. 10. Форма сигналів від величини паразитного опору $R_p = 1 \times 10^5$ Ом (#1), 3×10^5 Ом (#2), 1×10^6 Ом (#3)

З огляду на встановлену залежність, конструкція зарядового підсилювача доцільно повинна ґрунтуватися на двокаскадній архітектурі (рис. 11). У такій структурі перший каскад (ХОА1) виконує функцію буферного етапу – повторювача напруги, що забезпечує високий вхідний опір, тоді як другий каскад (ХОА2) реалізовано як інвертуючий підсилювач із коефіцієнтом підсилення

$$KV = -\frac{Ra2}{Ra1}.$$

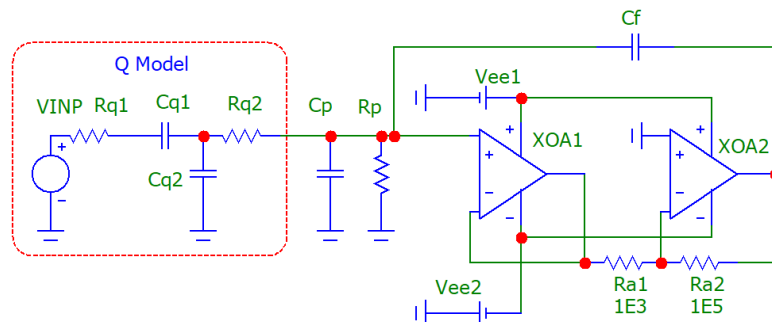


Рис. 11. Параметризована SPICE-модель зарядового підсилювача з двокаскадною структурою

Результати та обговорення

З метою ілюстрації параметричного аналізу роботи підсилювальних каскадів, а також для виявлення закономірностей похибок функціонування при варіації параметрів операційних підсилювачів, було здійснено моделювання на основі SPICE-моделей активних компонентів. Проведено дослідження поведінки інвертуючого підсилювача зі стандартними номіналами резисторів: $R1 = 1 \times 10^3$ Ом, $R2 = 1 \times 10^5$ Ом. Аналіз включав вивчення впливу зміни напруги зміщення VOFF на вихідний сигнал. Зокрема, розглядалися три варіанти: #1 – $VOFF = +2 \times 10^{-3}$ В, #2 – $VOFF = 0$ В, #3 – $VOFF = -2 \times 10^{-3}$ В. Результати наведено на рис. 12. Крім того, для оцінки впливу частотних характеристик підсилювача виконано варіацію параметра GBW (Gain Bandwidth Product). Аналіз охоплює значення: #1 – $GBW = 1 \times 10^7$ Гц, #2 – $GBW = 1 \times 10^6$ Гц, #3 – $GBW = 1 \times 10^5$ Гц (рис. 13). Отримані результати є критично важливими для вибору типу операційних підсилювачів та оптимізації схемотехнічних рішень у процесі розроблення сигнального тракту вбудованої системи.

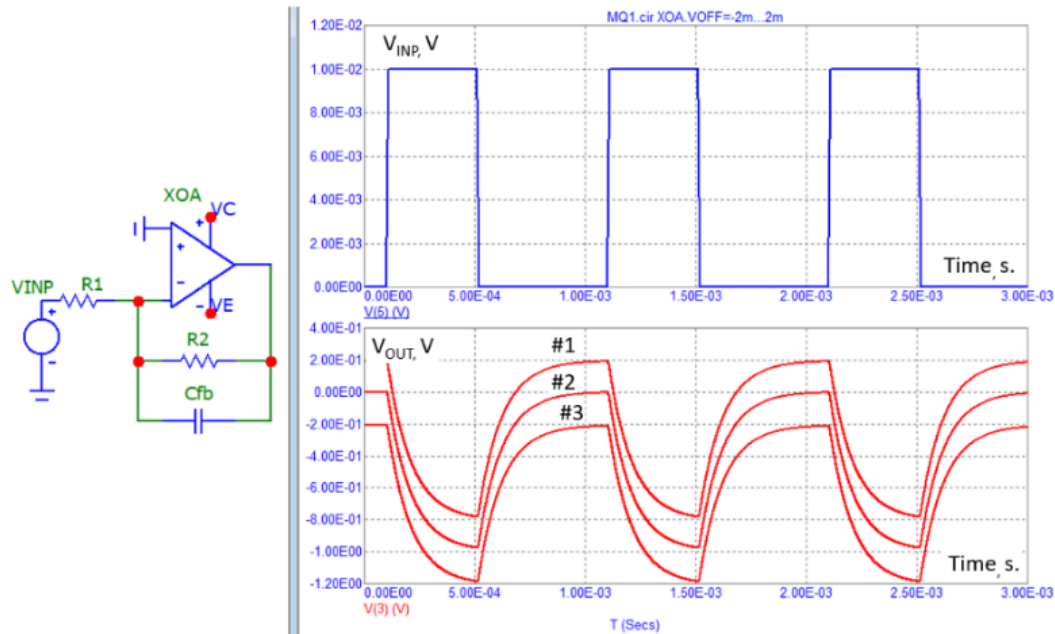


Рис. 12. Сигнали інвертуючого підсилювача при напрузі зміщення $V_{OFF}=2\times 10^{-3}$ В (#1), 0 В (#2), -2×10^{-3} В (#3)

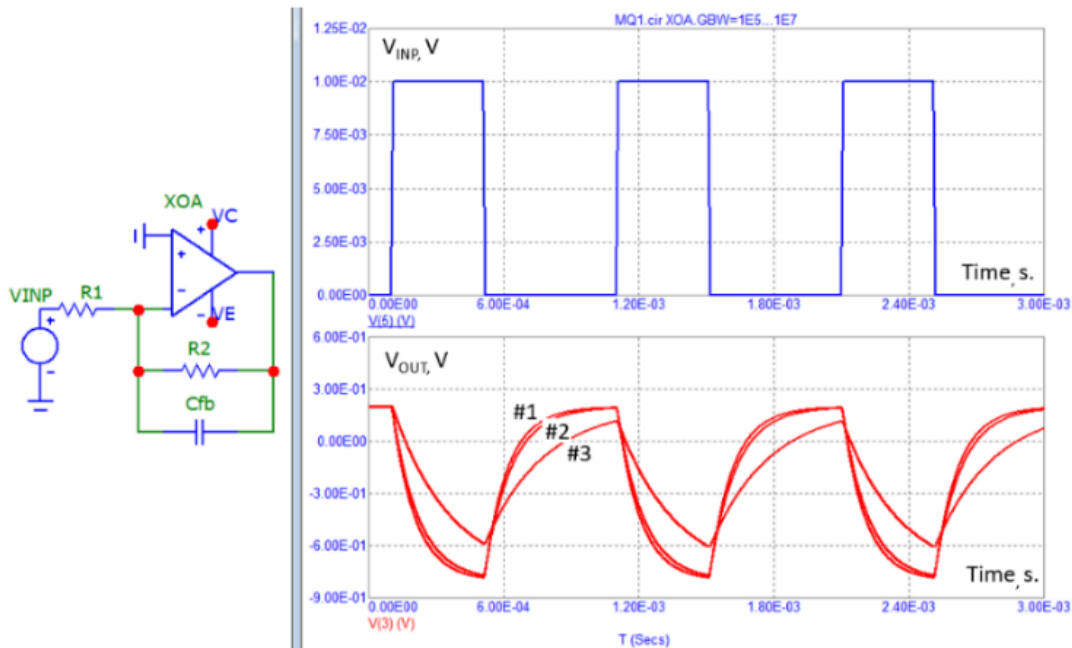


Рис. 13. Реакція підсилювача на зміну смуги частот підсилення $GBW=1\times 10^7$ Гц (#1), 1×10^6 Гц (#2), 1×10^5 Гц (#3)

Наступним етапом дослідження є аналіз впливу ємності конденсатора у колі від'ємного зворотного зв'язку на динамічні характеристики підсилювача, зокрема – на час встановлення вихідної напруги. Для оцінки цієї залежності застосовано метод порівняння, у межах якого виконано параметричний аналіз двох схемотехнічних варіантів: схеми звичайного підсилення та схеми інтегрування. У першому випадку (див. рис. 14) – мова йде про конфігурацію, в якій зворотне коло формується переважно резистивними елементами, а ємність зворотного зв'язку або відсутня, або має незначний вплив. Така схема імітує стандартну поведінку інвертуючого підсилювача. Другий варіант (рис. 15) моделює інтегровальну структуру, яка характерна для вихідних каскадів аналогових сигнальних трактів перед подачею на аналого-цифровий перетворювач. У цьому випадку $R2$ має значення понад 10^7 Ом, і головну роль у зворотному колі відіграє конденсатор C_{fb} , що визначає швидкість накопичення напруги на виході підсилювача та форму реакції системи на вхідний вплив.

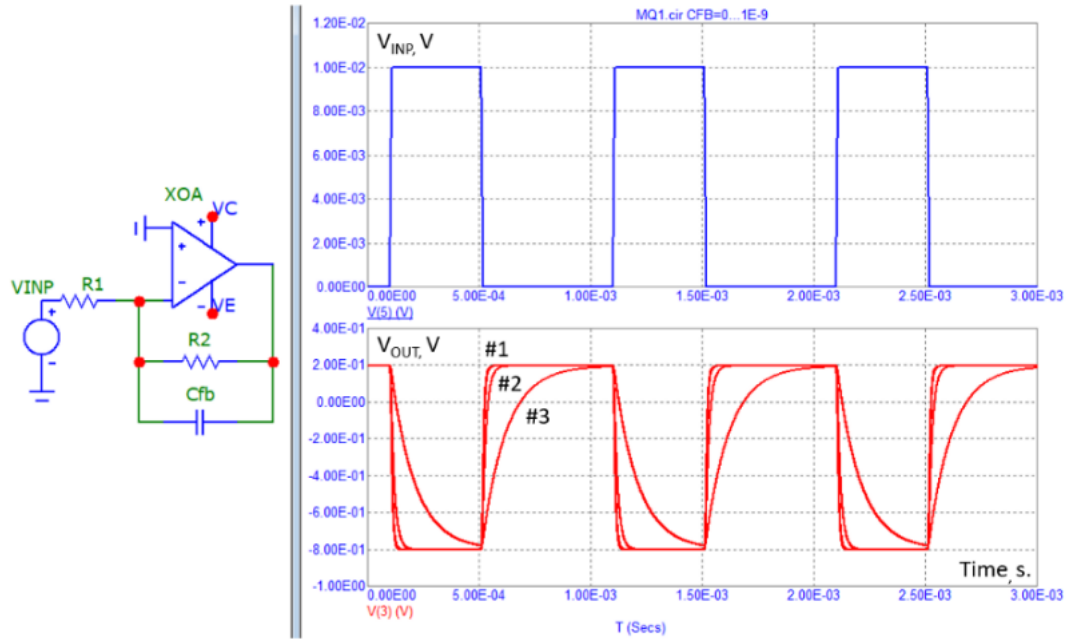


Рис. 14. Динаміка вихідної напруги підсилювача при $R1 = 1 \times 10^3$ Ом, $R2 = 1 \times 10^5$ Ом Cfb : 0 F (#1), 1×10^{-11} F (#2), 1×10^{-9} F (#3)

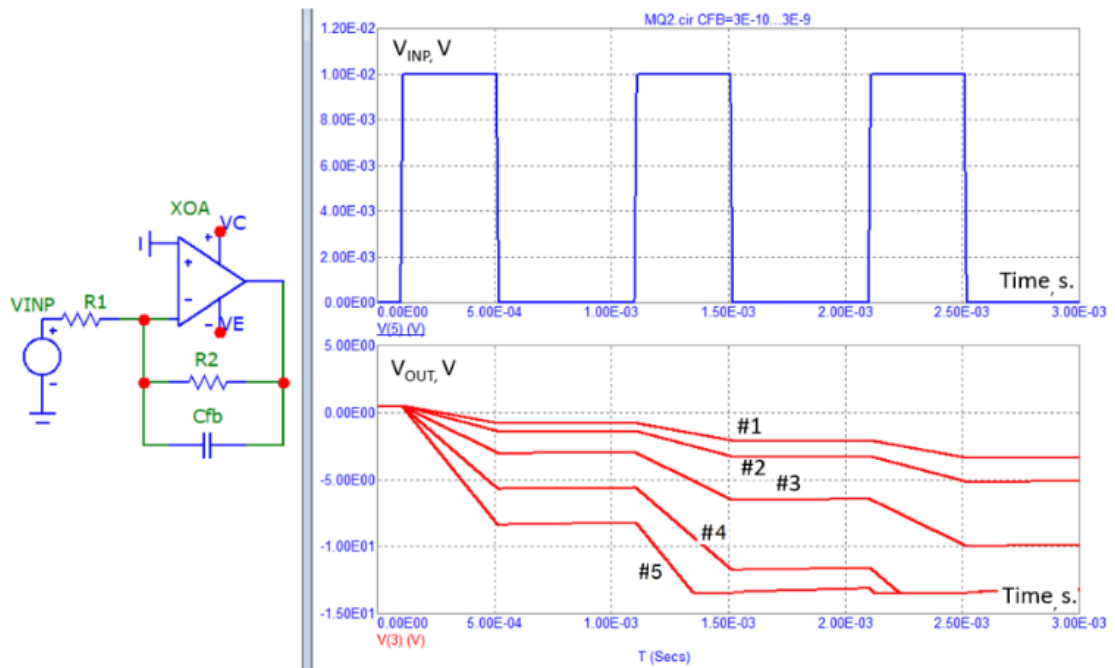


Рис. 15. Результати досліджень для $R1 = 1 \times 10^3$ Ом, $R2 = 1 \times 10^8$ Ом: $Cfb = 3 \times 10^{-10}$ F (#1), 5×10^{-10} F (#2), 1×10^{-9} F (#3), 2×10^{-9} F (#4), 3×10^{-9} F (#5)

На рис. 16 наведено результати параметричного аналізу двокаскадної архітектури зарядового підсилювача за різних значень ємності зворотного зв'язку: $Cfb = 3 \times 10^{-10}$ F (#1), 1×10^{-10} F (#2), 3×10^{-11} F (#3). Залежності демонструють вплив Cfb на амплітудно-часові характеристики вихідного сигналу. Рис. 17 ілюструє фотографію макетної плати, виготовленої для експериментальної відладки елементів системи AMES. На рис. 18 представлено осцилограми сигналів, отриманих під час експериментальних досліджень роботи вбудованої системи, які підтверджують ефективність запропонованої схеми у реальних умовах.

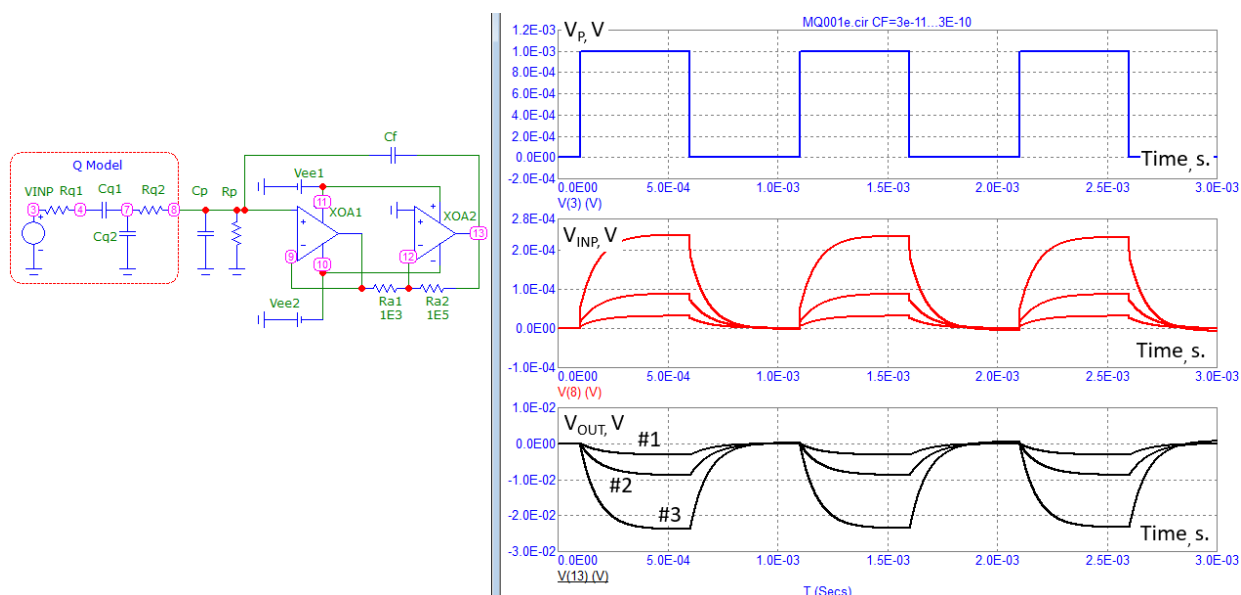


Рис. 16. Параметричний аналіз двокаскадного зарядового підсилювача для різних значень C_f : 3×10^{-10} F (#1), 1×10^{-10} F (#2), 3×10^{-11} F (#3)

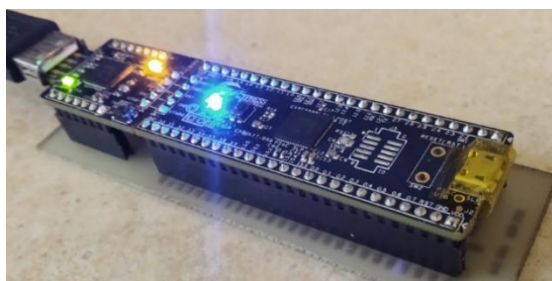


Рис. 17. Зовнішній вигляд (фотографія) дослідного зразка плати відладки системи AMES

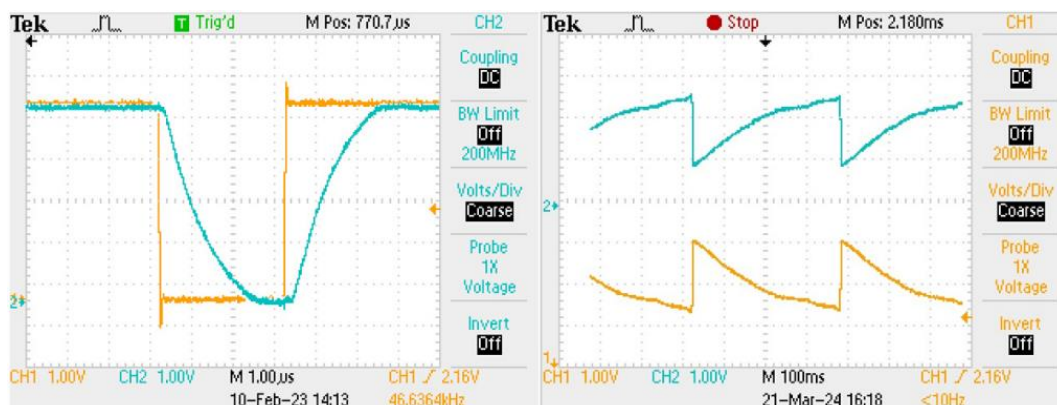


Рис. 18. Фрагменти експериментальних осцилограм, отриманих під час дослідження роботи системи AMES

Висновки

У статті представлено підхід до розроблення програмованої вбудованої системи дослідження параметрів адаптивної акустики AMES. Система базується на програмованій платформі PSoC 5 LP, що забезпечує високу інтеграцію цифрових та аналогових компонентів. Запропонований метод змішаного сигнального перетворення дає змогу значно покращити точність і завадостійкість вимірювань акустичних параметрів. Отримані результати підтверджують ефективність застосування розробленої системи для дослідження акустичних характеристик приміщень, що відкриває перспективи її подальшого вдосконалення та впровадження в сучасні системи адаптивної акустики.

Перелік використаних джерел

- [1] García, Lino & Minguez Olivares, Antonio. (2013). Adaptive Acoustic. In book: Advanced in Robotics. Modeling, Control and Applications (pp.101-132). Chapter: Adaptive Acoustic Publisher: iConcept DOI:10.13140/RG.2.1.4293.0720.
- [2] The Workplace of 2025: Trends Shaping Sustainability, Wellness, and Acoustics. Sound masking. Eindhoven University of Technology. 2025. https://www.softdb.com/blog/workplace_2025/
- [3] New Study Reveals Key Benefits of Adaptive Sound Masking for Workplaces. – Sound masking. Eindhoven University of Technology. 2024. <https://www.softdb.com/blog/study-adaptive-sound-masking/>
- [4] "Voice Activity Detection, Noise Estimation, and Adaptive Filters for Acoustic Signal Enhancement," in Techniques for Noise Robustness in Automatic Speech Recognition, Wiley, 2012, pp.51-85, doi: 10.1002/9781118392683.ch4.
- [5] Peter Vary; Rainer Martin, "Acoustic Echo Control," in Digital Speech Transmission and Enhancement, IEEE, 2024, pp.457-515, doi: 10.1002/9781119060970.ch14.
- [6] "Acoustic Model Training for Robust Speech Recognition," in Techniques for Noise Robustness in Automatic Speech Recognition, Wiley, 2012, pp.347-368, doi: 10.1002/9781118392683.ch13.
- [7] B. Yin, "Adaptive Beamforming for Constant Modulus Signal of Interest Based on Acoustic Vector Array," 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Macau, China, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPCC50002.2020.9259522.
- [8] N. Zou and A. Nehorai, "Circular Acoustic Vector-Sensor Array for Mode Beamforming," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, no. 8, pp. 3041-3052, Aug. 2009, doi: 10.1109/TSP.2009.2019174.
- [9] W. Zheng, P. Xu, S. He and R. Tang, "Analysis of Acoustic Impedance of Duct Wall Based on Finite Element and Adaptive Evolutionary Algorithm," 2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC), Dalian, China, 2017, pp. 645-649, doi: 10.1109/ICCTEC.2017.00145.
- [10] P. Ahgren, "Acoustic echo cancellation and doubletalk detection using estimated loudspeaker impulse responses," in IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 13, no. 6, pp. 1231-1237, Nov. 2005, doi: 10.1109/TSA.2005.851995.
- [11] S. Kono and Y. Kajikawa, "Improvement in transmission characteristics in acoustic OFDM with adaptive microphone array," 2012 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems, Tamsui, Taiwan, 2012, pp. 504-508, doi: 10.1109/ISPACS.2012.6473542.
- [12] Y. -h. Lyu, J. -y. Liu, S. -g. Gao, J. Song and M. -h. Lu, "Study on robust adaptive beamforming based on acoustic vector sensor array," OCEANS 2017 - Aberdeen, Aberdeen, UK, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084891.
- [13] H. Xu, N. Fu, L. Qiao, W. Yu and X. Peng, "Compressive Blind Mixing Matrix Estimation of Audio Signals," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 5, pp. 1253-1261, May 2014, doi: 10.1109/TIM.2013.2292359.
- [14] L. -Y. Song et al., "Non-regression approach for the behavioral model generator in mixed-signal system verification," 2017 IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/VLSI-SoC.2017.8203462.
- [15] A. A. Deshmukh, R. Shyam Gamad and D. K. Mishra, "Fault Detection Techniques for Analog/Mixed Signal SoC design," 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Bombay, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/I2CT45611.2019.9033900.
- [16] G. Jacquemod, Z. Wei, Y. Leduc, E. de Foucauld, J. Prouvee and B. Blampey, "New design of analog and mixed-signal cells using back-gate cross-coupled structure," 2019 IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Cuzco, Peru, 2019, pp. 21-26, doi: 10.1109/VLSI-SoC.2019.8920390.
- [17] H. Kim et al., "A configurable and low-power mixed signal SoC for portable ECG monitoring applications," 2011 Symposium on VLSI Circuits - Digest of Technical Papers, Kyoto, Japan, 2011, pp. 142-143.
- [18] D. H. Gawali and V. M. Wadhai, "Mixed signal SoC based Bio-Sensor Node for long term health monitoring," 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Pune, India, 2016, pp. 194-198, doi: 10.1109/WIECON-ECE.2016.8009116.
- [19] L. Szilagyi, J. Pliva, R. Henker and F. Ellinger, "A Mixed-Signal Offset-Compensation System for Multi-Gbit/s Optical Receiver Frontends," 2019 IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Cuzco, Peru, 2019, pp. 46-51, doi: 10.1109/VLSI-SoC.2019.8920361.
- [20] S. Abdennadher, "Flow for phase locked loop mixed signal simulation and characterization using behavioral modeling," Southwest Symposium on Mixed-Signal Design, 2003., Las Vegas, NV, USA, 2003, pp. 66-70, doi: 10.1109/SSMSD.2003.1190398.

Mykhaylo Melnyk¹, Roman Holyaka², Roman Vynarovych³, Pavlo Denysiuk⁴

¹ Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8593-8799

² Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: Roman.L.Holiaka@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-7720-0372

² Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: Roman.I.Vynarovych@lpnu.ua, ORCID 0009-0000-3462-977X

² Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: Pavlo.Y.Denysiuk@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-6544-0128

PROGRAMMABLE EMBEDDED SYSTEM FOR ADAPTIVE ACOUSTICS PARAMETER RESEARCH

Received: January 20, 2025 / Revised: January 28, 2025 / Accepted: March 03, 2025

© Melnyk M., Holyaka R., Vynarovych R., Denysiuk P., 2025

Abstract. This paper examines the structure and functional capabilities of the programmable embedded system for adaptive acoustics parameter research – AMES (Acoustic Measurement Embedded System). The core implementation platform is the PSoC 5 LP programmable system-on-chip, which provides extensive software control over acoustic parameter measurement processes. A mixed-signal conversion method based on selective charge amplification is proposed, enhancing noise immunity and measurement accuracy. The study analyzes modern approaches to adaptive acoustics and identifies key development trends in the context of automated design. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed system for studying the acoustic characteristics of enclosed spaces.

Keywords: adaptive acoustics, embedded systems, PSoC, mixed-signal conversion, automated design.