

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ДО ВОДИ В ЄМНІСНИХ СЕНСОРАХ ДОТИКУ

© Кремень В. Т., 2015

Розглянуто метод підвищення завадостійкості ємнісних сенсорів дотику до конденсованої на поверхні чутливих електродів води. Запропоновано використовувати поєднання методу активного екранування для схеми вимірювання власної ємності, спеціальної конструкції сенсора із додатковим захисним електродом та додаткових алгоритмів обробки сигналів від сенсорів.

Ключові слова: ємнісний сенсор, сенсор дотику, сигнальний перетворювач, завадостійкість.

## WATER NOISE IMMUNITY IMPROVEMENT IN THE CAPACITIVE SENSOR PANELS

© Kremin V., 2015

This paper proposes sensing electrode condensed water resistance improvement for the capacitive sensors. It was suggested to use active shield method for the self-capacitance sensors, special sensor construction with using the guard sensor and additional sensor signal processing algorithms.

Key words: capacitance sensor, touch sensor, signal transducer, noise immunity.

### Вступ

Розглянуто проблему подальшого розвитку мікроелектронних сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорних пристроїв. Найпріоритетніші серед них ємнісні сенсори пристроїв керування – ємнісні кнопки, однокоординатні слайдери, двокоординатні 2D матриці (Touch Pad), сенсорні дисплеї (Touch Screen) тощо. Основна сфера використання цих ємнісних сенсорів – портативні пристрої – планшетні комп’ютери, ноутбуки, смартфони, зокрема пристрої керування банкоматами, інформаційними кіосками, побутовою технікою і фото- та відеоапаратурою [1].

Вже сформувалося поняття «front-end» – інтерфейсної частини пристрою, яка забезпечує формування та подальше перетворення інформативного сигналу [2]. Сигнальні перетворювачі ємнісних сенсорів характеризуються широким різноманіттям компонентів (елементної бази) та реалізацій вимірювального перетворення ємності [3].

Подальший розвиток ємнісних сенсорів нового покоління, вимогою до яких є розширення функціональних можливостей та підвищення точності функціонування, ставить задачу розроблення сигнальних перетворювачів з високою завадостійкістю та інтелектуалізацією процесу вимірювання [4]. Домінуючу роль у побудові сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорних пристроїв відіграють схеми на концепції «система на кристалі» (СНК, SoC, System-on-Chip, система на чипі), зокрема, програмовані системи на кристалі компанії Cypress Semiconductor – PSoC<sup>®</sup> (Programmable System-on-Chip) [5, 6].

У роботі розвинуто методи та засоби підвищення завадостійкості ємнісних сенсорів дотику до конденсованої на поверхні чутливих електродів води (вологи, дощу, забруднень). Актуальність проблеми зумовлена використанням ємнісних панелей, зокрема, смартфонів, інформаційних табло, банкоматів тощо, в різних атмосферних умовах. Очевидно, що внаслідок високої діелектричної проникності води ( $\epsilon = 81$ ) її вплив на інформативні сигнали ємнісних сенсорів значний. Для розв'язання поставлених задач використовуються методи активного екранування та інтелектуалізації. Основні рішення сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів дотику автор роботи захистив численними патентами США, зокрема [7–9].

### Структури ємнісних сенсорів з активним екрануванням

Метод активного екранування реалізується впливом на навколишнє середовище керованого електричного поля, яке формується екранувальними електродами ємнісного сенсора [10]. В першому наближенні потенціал екранувального електрода повторює напругу на електроді вимірюваного конденсатора в процесі його заряджання-розряджання. Приклад характерних структур активного екранування в ємнісних сенсорах з одиничними електродами та матрицею перехресних електродів рядків та стовпчиків наведені на рис. 1. В структурах з одиничними електродами, ємність яких є інформативною величиною сенсора дотику, чутливий електрод S оточено по периметру контуром AS активного екрана (рис. 1, а). У структурах з двокоординатними електродами, в яких формується матриця сигналів, за якою визначають координату об'єкта керування (пальця чи стилуса), під час вимірювання ємності електрода S рядка чи стовпчика матриці активним екраном слугують суміжні електроди AS (рис. 1, б). Для такої реалізації в систему вводять додаткові мультиплексори, за допомогою яких на незадіяні електроди подають імпульси AS активного екранування чи формують за їх допомогою допоміжні сигнали алгоритму інтелектуального (smart scanning) аналізу [11].

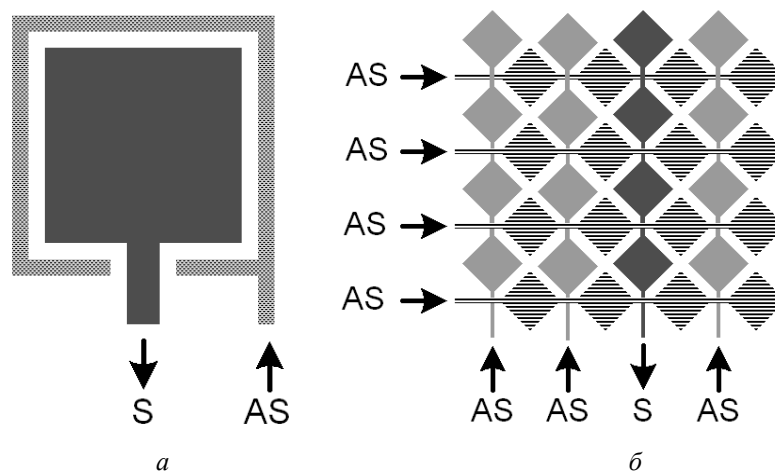


Рис. 1. Структури активного екранування в ємнісних структурах одиничних сенсорів (а) та матричних панелей (б)

Структура сенсора дотику з екранувальним електродом наведена на рис. 2. На діелектричній підкладці (друкованій платі) 1 сформовано основний електрод 2, який по периметру оточено екранувальним електродом 3. Структура вкрита діелектричним покриттям 4. Під час наближення чи дотику до основного електрода 2 пальця чи стилуса 5 виникає та змінюється ємність  $C_x$ , значення якої є інформативним сигналом сенсора дотику (рис. 2, а). Очевидно, що будь-які інші об'єкти на поверхні сенсора – типowo найпроблемнішою є конденсована волога чи краплі води – також спричиняють зміну сигналу.

У структурі сенсора з екранувальним електродом крапля води зумовлює виникнення та паразитну модуляцію двох ємностей:  $C_{wx}$  (основний електрод – крапля) та  $C_s$  (екранувальний електрод – крапля) (рис. 2, б). Синфазна з основним електродом зміна потенціалу екранувального електрода зумовлює інжекцію у вимірювальне коло додаткового заряду, який за відповідних умов дає змогу компенсувати спричинену краплею води нестабільність заряду корисного сигналу. Крім того, в структуру сенсора вводять ще один допоміжний електрод – Guard, мова про призначення якого піде далі.

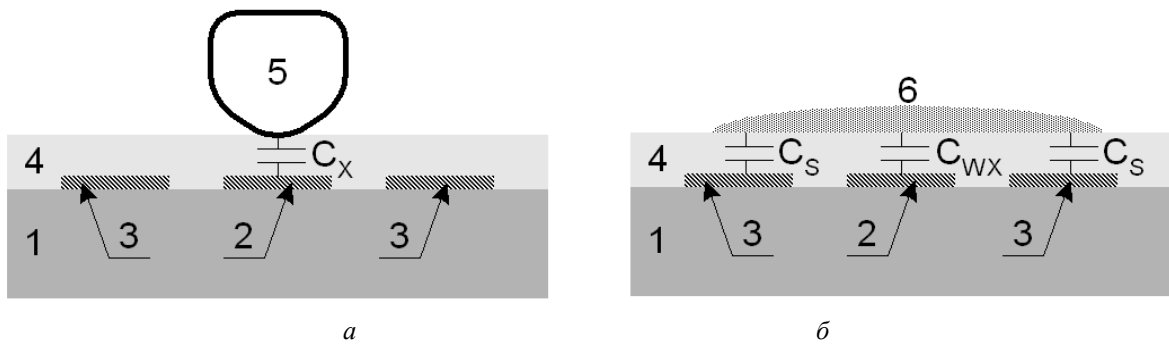


Рис. 2. Структура сенсора дотику з екранувальним електродом

### Апаратура та результати досліджень

Для експериментального дослідження ефекту компенсації паразитного впливу води виготовлена сенсорна панель (рис. 3) з трьома основними електродами  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  (2), які по периметру оточені екранувальним (3) та допоміжним (4) електродами.

Процес сигнального перетворення формується з використанням модулів з програмованим інтерфейсом API (Application Programming Interface), зокрема модуля CSD (CapSense® Sigma-Delta) (рис. 4) [12]. Електрична схема пристрою дослідження на PSoC CY8C21434 наведена на рис. 5. Пристрій дозволяє вимірювати сигнали з трьох основних сенсорів (Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3), одного допоміжного сенсора – Guard та керувати амплітудою імпульсів на екранувальному електроді Shield. Вимірювання проводяться в реальному часі та одночасно по всіх чотирьох каналах.

Умови експериментів з дослідження ефекту паразитного впливу води та компенсації цього ефекту показані на рис. 6, а їх типові результати – на рис. 7. Послідовний номер вимірювання позначено Sample #, а його результат у цифровому коді – Raw Counts.

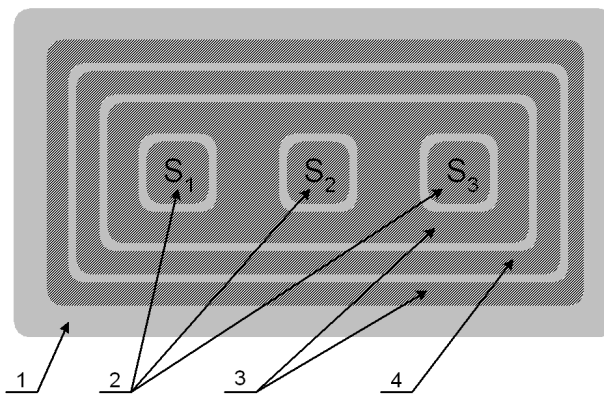


Рис. 3. Топологія сенсора дотику з допоміжними електродами захисту:  
1 – підкладка (друкована плата), 2 – основні електроди  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  
3 – екранувальні електроди (Shield), 4 – допоміжний електрод (Guard)

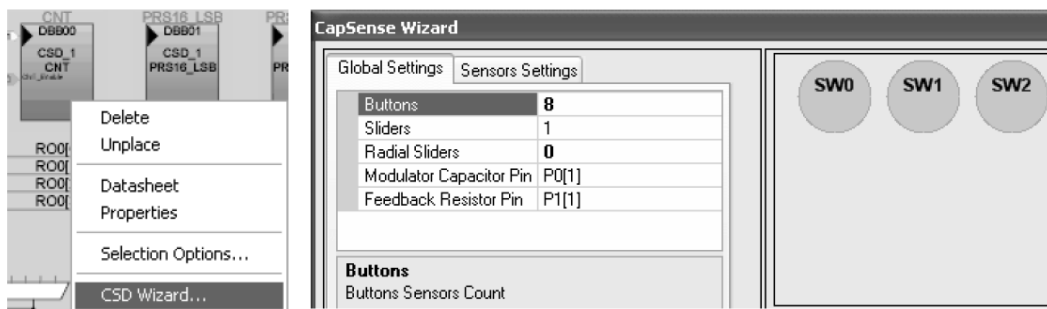


Рис. 4. Фрагмент API вікна CapSense CSD Wizard

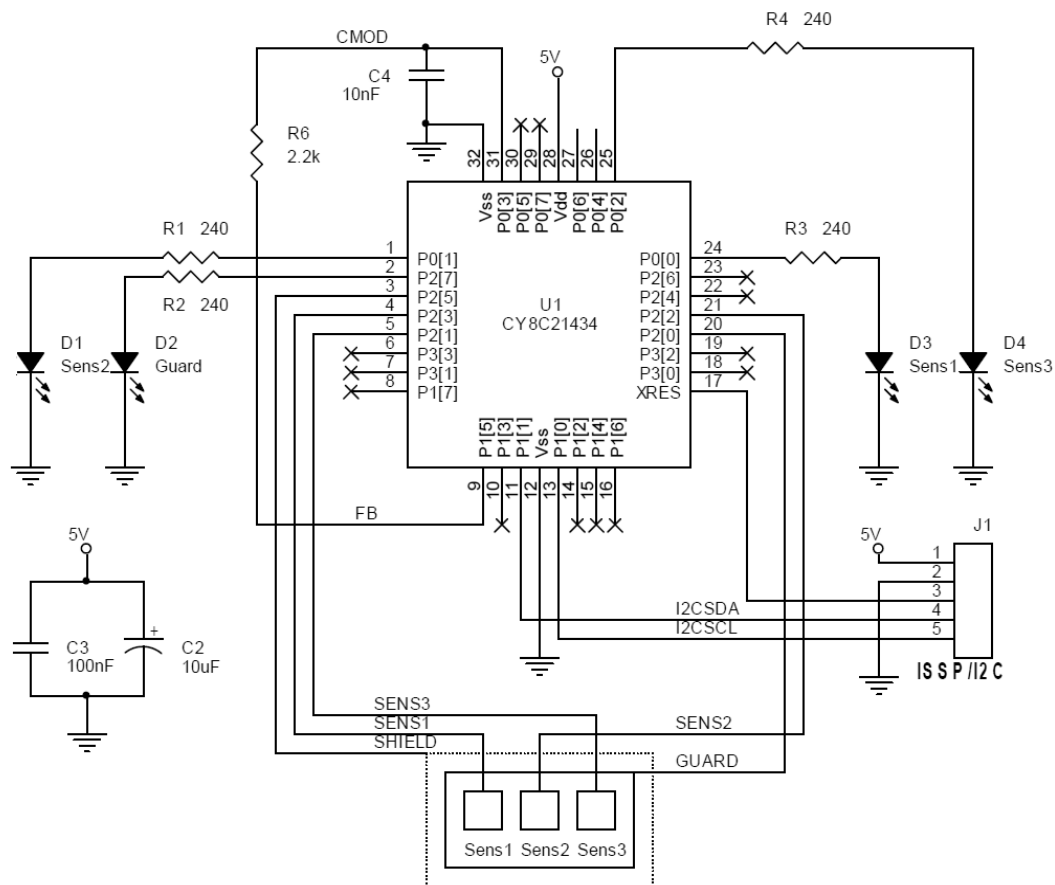


Рис. 5. Електрична схема пристрою дослідження на PSoC CY8C21434

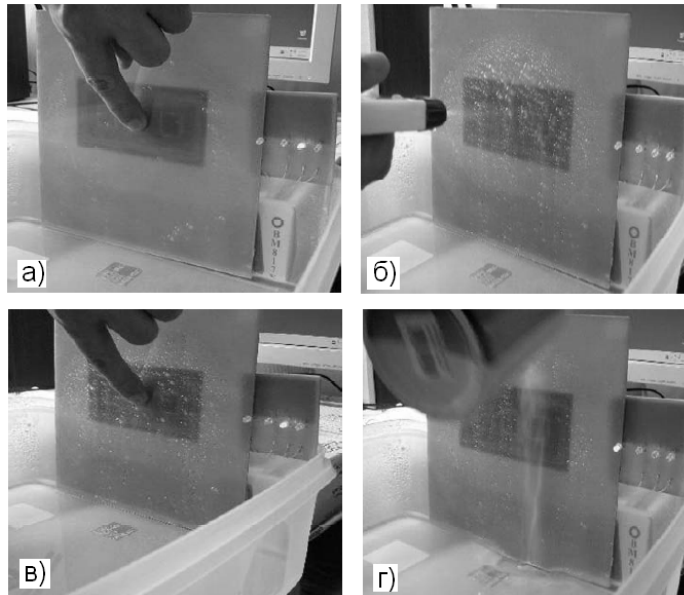


Рис. 6. Умови дослідження паразитного впливу води

Спершу вимірювалися сигнали під час послідовного дотикання (першим – Sensor 3, далі Sensor 2 та Sensor 1) до сухої сенсорної панелі (рис. 6, а). Можна бачити (рис. 7, а), що за відсутності на панелі води сигнали мають високу інформативну якість та є достатніми для надійного детектування дотику. Певна різниця постійного рівня сигналів сенсорів, що зумовлена різними значеннями паразитних ємностей сигнальних ліній електродів цих сенсорів, компенсується традиційними методиками попереднього калібрування.

Далі, на другому етапі дослідження, на поверхню сенсорної панелі з пульверизатора розприскували воду (рис. 6, б). Результати вимірювання нестабільності сигналів сенсорів у таких умовах (без дотику пальця) наведені на рис. 7, б. Можна бачити доволі значні за амплітудою паразитні імпульси та суттєве (у декілька разів) зростання початкового рівня сигналів. Очевидно, що безпосереднє використання результатів таких вимірювань недопустиме.

На третьому етапі (рис. 6, в) був задіяний метод активного екранування – на екранувальний електрод подавалися синфазні з основними електродами імпульси напруги заряду. Результати досліджень сигналів з використанням методу активного екранування наведено на рис. 7, в (без дотикання пальця) та рис. 7, г (з аналогічним до першого етапу дотиканням пальця). Отримані результати свідчать, що амплітуда паразитних імпульсів та додаткове зміщення постійного рівня сигналу істотно (в десятки разів) зменшилися. Так було підтверджено ефективність запропонованого методу активного екранування в умовах наявності на поверхні сенсорної панелі великої кількості водяних крапель.

Подальші дослідження, в яких на поверхню сенсора лилася вода (рис. 6, г), проводилися з метою виявлення можливості методу в екстремальних, нетипових для більшості практичних задач, умовах експлуатації. Результати дослідження сигналів у двох різних за інтенсивністю умовах зливу води наведені на рис. 7, д та рис. 7, е (в обох умовах використано метод активного екранування). Такі умови зливу води імітують попадання на поверхню сенсора інтенсивного дощу.

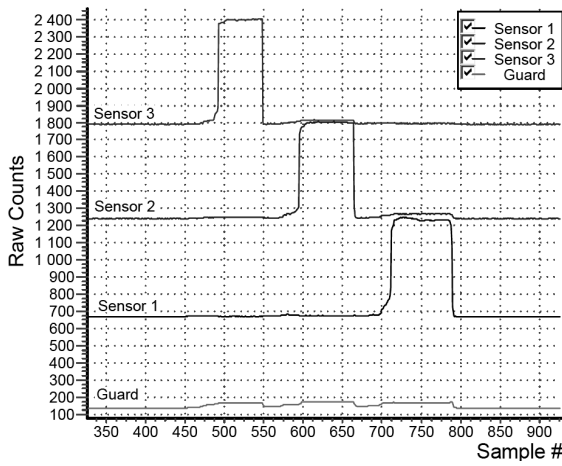
Можна бачити, що спостерігаються короточасні паразитні імпульси, причиною яких є флуктуація на поверхні панелі потоку води. Безпосереднє використання таких спотворених сигналів неможливе. Далі, для вирішення цієї проблеми, пропонується алгоритм інтелектуалізації процесу вимірювання, відповідно до якого вбудований програмний код ємнісного сенсора аналізує тривалість імпульсів. За результатом такого аналізу логічний блок сенсора вирізняє інформативний сигнал та блокує його детектування в інтервалах значної нестабільності.

### **Інтелектуалізація вимірювання**

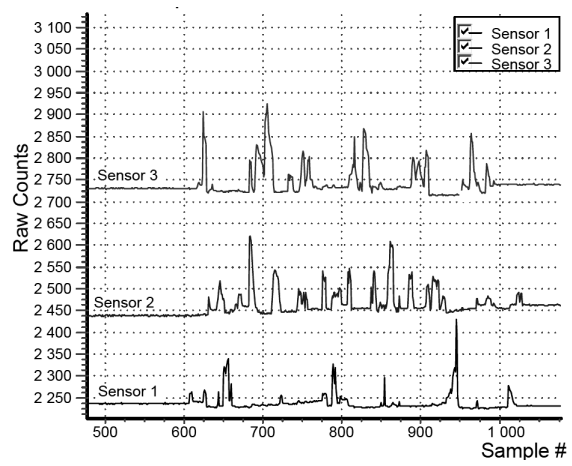
Інтелектуалізація процесу вимірювання вирішує проблему підвищення завадостійкості сенсорів дотику в екстремальних умовах експлуатації (зокрема в мийках, душових кабінах, пральних машинах тощо). Проблема вирішується відповідно адаптованим алгоритмом режекції паразитного детектування у разі значних флуктуацій води на поверхні панелі. Таку режекцію здійснюють на структурно-програмному рівні PSoC. За одиничних «якісних» сигналів заданої тривалості, частоти та амплітуди, які встановлюються у процесі програмного налагодження, результат вимірювання вважається дійсним. В протилежному випадку, коли комбінація вказаних параметрів не відповідає заданим значенням якості, результат вимірювання анулюється. Приклади зумовлених флуктуацією води сигналів, які анулюються алгоритмом інтелектуального вимірювання, наведено на рис. 7, д та е.

В результаті аналізу результатів численних експериментальних досліджень, які проводилися в різноманітних умовах експлуатації, визначені типові комбінації «якісних» сигналів та завод. Було встановлено, що суттєве покращення алгоритму інтелектуального вимірювання можна забезпечити введенням у структуру сенсора допоміжного електрода – так званого «охоронного» Guard сенсора (рис. 3). Як і електрод активного екранування Shield, електрод Guard охоплює по периметру електроди основних сенсорів. Проте функцією Guard електрода є вимірювання «інтегральної картини» завод (флуктуацій води) на поверхні сенсорної панелі.

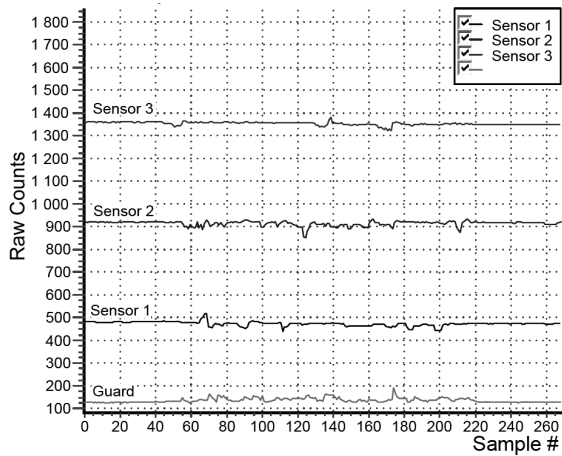
Алгоритм інтелектуального вимірювання передбачає використання порогових елементів з керованим рівнем спрацювання та лічильників (Counter), за допомогою яких визначають кількість імпульсів, їх тривалість та частоту слідування. Аналіз здійснюється як за сигналами допоміжного електрода Guard, так і за сигналами основних сенсорів. Приклади таких сигналів допоміжного сенсора наведено на рис. 8, а (Guard Counter Operational Diagram), а основного сенсора, в цьому випадку S, – на рис. 8, б (Sensor Counter Operational Diagram). За наявності значних флуктуацій та, відповідно, формування серій короточасних імпульсів допоміжним сенсором ( $S_{G\ OUT}$ ) чи обома сенсорами ( $S_{G\ OUT}$  та  $S_{1\ OUT}$ ) сигнальний тракт лічильника (Counter) допоміжного сенсора встановлює високий рівень логічного сигналу  $S_{GCN\ OUT} = 1$ . Останній блокує формування вихідних сигналів основних сенсорів.



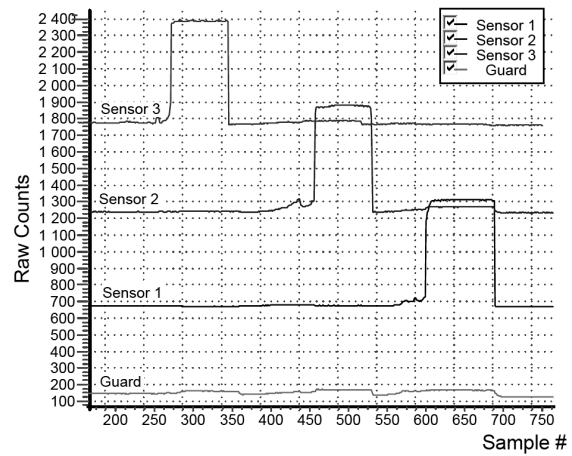
a



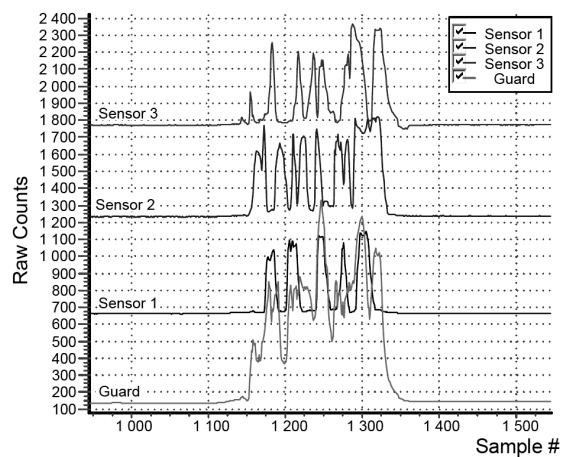
б



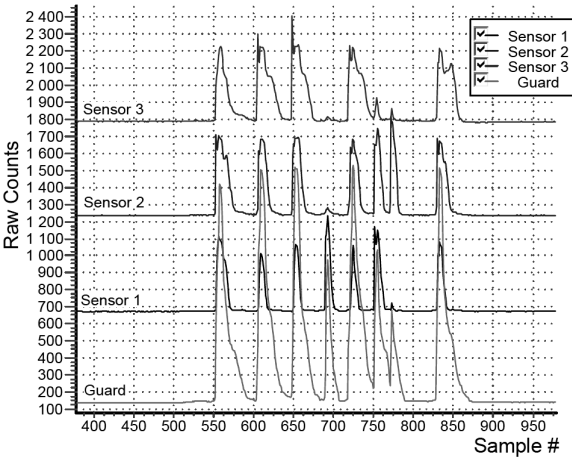
в



г



д



е

Рис. 7. Результати дослідження паразитного впливу води

У разі зменшення флуктуації впродовж певного контрольного відрізка часу  $t_{G\ DEL}$  на виході сигнального тракту лічильника допоміжного сенсора формується логічний нуль  $S_{GCN\ OUT} = 0$ . Далі, якщо упродовж іншого контрольного відрізка часу  $t_{S\ DEL}$  на виході сигнального тракту лічильника основного сенсора виникає імпульс із заданими параметрами, цей імпульс вважається «якісним» сигналом – вимірювальна система формує імпульс R, що сигналізує факт дотику та переводить процес вимірювання у початковий стан.

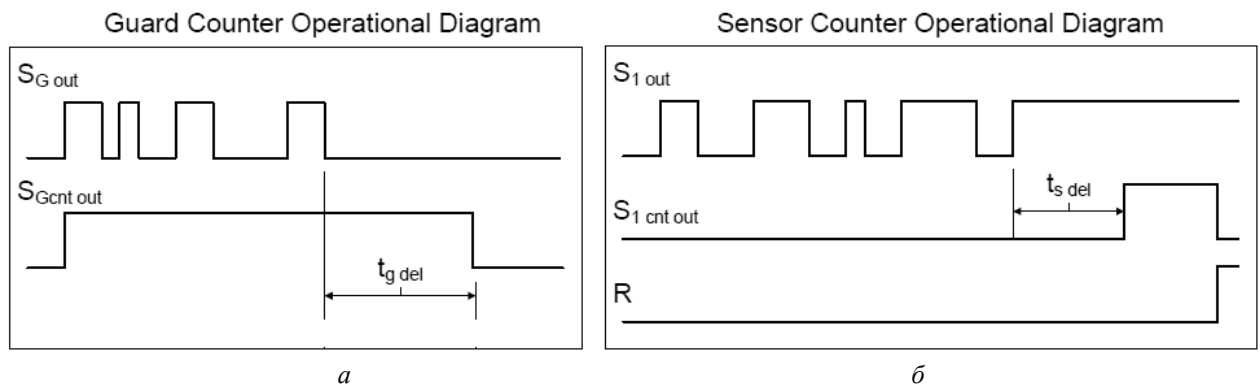


Рис. 8. Форма сигналів допоміжного (а) та основного (б) сенсорів

У разі реалізації розглянутого алгоритму вимірювання у PSoC необхідно враховувати наявність вільних ресурсів «на кристалі». Переважно використання основного процесора CPU та процедур часового аналізу імпульсів, що виконуються на програмному рівні, для такої реалізації неможливе – процесор разом з відповідними структурними блоками задіяний для реалізації процедур CDS API та інших пріоритетніших задач. Тому часовий аналіз імпульсів виконують за допомогою вузлів (Counter) логічних блоків – Post Processing Logic. Приклад такої реалізації наведено на рис. 9.

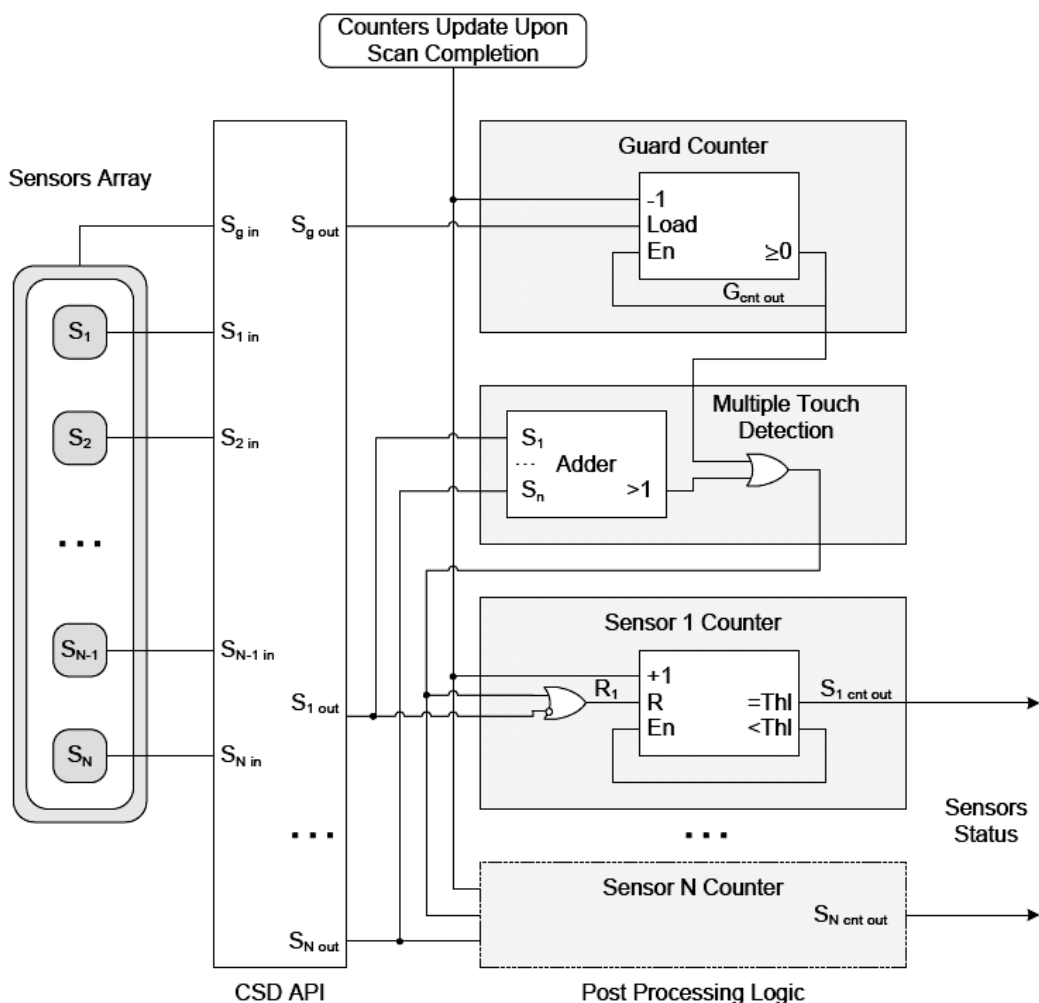


Рис. 9. Структурна реалізація алгоритму інтелектуального вимірювання

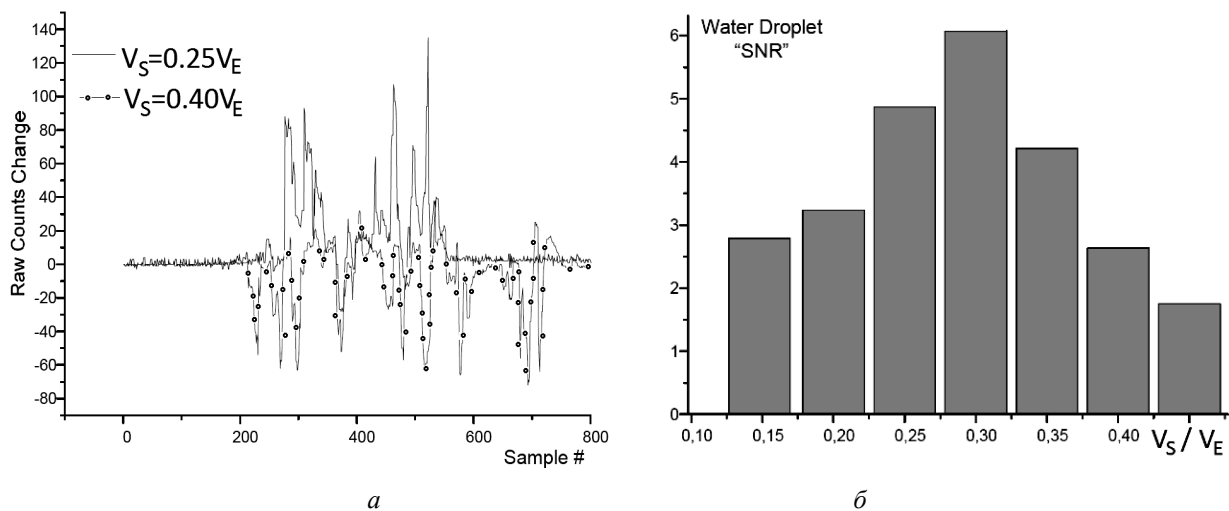


Рис. 10. Вплив амплітуди імпульсів напруги  $V_S$  на нестабільність сигналу (а) та відношення напруг  $V_S / V_E$  на співвідношення сигнал – шум SNR (б)

### Оптимізація режимів вимірювання

З метою оптимізації режимів вимірювання розглянемо вплив на стабільність сигналу амплітуди імпульсів на екранувальному електроді  $V_S$ . Приклад дослідження такого впливу наведено на рис. 10. Досліджувалася нестабільність сигналу (Raw Counts Change) за двох значень:  $V_S = 0,25V_E$  та  $V_S = 0,4V_E$ , де  $V_E$  – напруга живлення вхідного вузла сигнального перетворювача. Спостерігається певна закономірність – у разі збільшення напруги  $V_S$  відбувається інверсія паразитних імпульсів. Так, якщо  $V_S = 0.25V_E$ , більшість викидів сигналу додатні, а за  $V_S = 0,4V_E$  – від’ємні. Цей факт пояснюється ефектом «перекомпенсації», що можна використати для оптимізації напруги – для кожної конструкції (топології) сенсорної панелі можна підібрати значення  $V_S$ , за якого ефект компенсації є найкращим.

Оптимізацію проводять за критерієм найвищого співвідношення сигнал – шум SNR (Signal to Noise Ratio). У такому разі під «шумом» розуміють зумовлені флуктуаціями води на поверхні сенсора викиди сигналу. Результати проведених досліджень, за якими можна виконати оптимізацію, наведені на рис. 8, б. Як бачимо, зі зростанням відношення  $V_S / V_E$  параметр якості сигналу SNR спочатку зростає, а далі знижується. Для досліджуваної панелі ємнісних сенсорів оптимальним значенням імпульсів напруги на екранувальному електроді є  $V_S = 0,3V_E$ .

Отже, процес програмного налагодження ємнісних сенсорів з активним екрануванням повинен передбачати експериментальні дослідження з адаптації алгоритму режекції паразитного детектування за значних флуктуацій води на поверхні панелі та оптимізації амплітуди імпульсів напруги екранувального електрода.

### Висновки

У роботі вирішена проблема підвищення завадостійкості ємнісних сенсорів дотику до конденсованої на поверхні чутливих електродів води. Для розв’язання поставлених задач використовуються методи активного екранування та інтелектуалізації.

Метод активного екранування реалізується впливом на навколишнє середовище керованого електричного поля, яке формується екранувальними електродами ємнісного сенсора. Для експериментального дослідження ефекту компенсації паразитного впливу води була виготовлена сенсорна панель та розроблено дослідний зразок пристрою на інтегральній схемі PSoC CY8C21434. Процес сигнального перетворення формується з використанням структурно-програмного модуля CSD API. Показано, що процес програмного налагодження та калібрування ємнісних сенсорів з активним екрануванням повинен передбачати експериментальні дослідження зі встановлення оптимального для конкретної конструкції сенсора значення напруги екранувального електрода.



Інтелектуалізація процесу вимірювання передбачає використання порогових елементів з керованим рівнем спрацювання та лічильників, за допомогою яких визначають кількість імпульсів, їх тривалість та частоту слідування. Аналіз здійснюється як за сигналами допоміжного сенсора Guard, так і за сигналами основних сенсорів.

1. *TrueTouch<sup>®</sup> Touchscreen Controllers*. Cypress Semiconductor Corporation. – 2014. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cypress.com/touch/?source=cy-eng-header>.
2. Salvatori S., Masarone N., Di Nucci G., Conte G. *Compact front-end electronics for low-level current sensor measurements* // *Electronics Letters*. – Vol. 42. – № 12. – 2006. – P. 682–684.
3. Wouter Bracke, Robert Puers, Chris Van Hoof. *Ultra low power capacitive sensor interfaces*. – Springer. – 2007. – 110 p.
4. Thilo Sauter, Herbert Nachtnebel, Nikolaus Kerö. *A Smart Capacitive Angle Sensor* // *IEEE transactions on industrial informatics*. – Vol. 1. – № 4. – 2005. – P. 250–258.
5. Ashby R. *Designer's Guide to the Cypress PSoC<sup>™</sup>*. Elsevier Inc. – 2005. – 273 p.
6. *TrueTouch<sup>®</sup> Touchscreen Controllers*. Cypress Semiconductor Corporation. – 2014. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cypress.com/touch/?source=cy-eng-header>.
7. Патент США № US8169238. H03C 3/00. *Capacitance to frequency converter*. Maharyta Andriy, Kremin Viktor. Видано 01.05.2012.
8. Патент США № US8547114. G01R 27/26. *Capacitance to code converter with sigma-delta modulator*. Kremin Viktor. Видано 01.10.2013.
9. Патент США № US8436263. G06F 3/041. *Noise resistant capacitive sensor*. Kremin Viktor. Видано 07.05.2013.
10. Victor Kremin, Ruslan Bachunskiy. *Waterproof Capacitance Sensing*. – Cypress AN2398. – 2006. – 11 p. – [www.cypress.com](http://www.cypress.com).
11. Заявка на патент США № US20120050216. G06F 3/045. *Smart scanning for a capacitive sense array*. Kremin Victor, Pirogov Oleksandr, Ryshtun Andriy. Опубліковано 1.03.2012.
12. *User Module Datasheet: CapSense<sup>®</sup> Sigma-Delta Datasheet CSD (CY8C21x34, CY8CLED04)* <http://www.cypress.com/?rID=3122>