

АКТИВНЕ ЕКРАНУВАННЯ В ЄМНІСНИХ СЕНСОРАХ НАБЛИЖЕННЯ

© Кремень В.Т., 2015

Вступ

Ємнісні сенсори є одними з найбільш актуальних класів сучасних мікроелектронних пристроїв вимірювання та керування. Застосування цих сенсорів є надзвичайно широким. Це, зокрема – сенсори та матриці тиску, сенсори натягу та крутячого моменту, сенсори кута повороту та нахилу, сенсори просторового наближення, сенсори дотику та поверхневої деформації, сенсори потоку, акселерометри, конденсаторні мікрофони, сканери відбитків пальців, сенсори рідин та вологості, віскозиметри, хімічні та біохімічні сенсори, електродні сканери та ємнісні томографи, ємнісні ультразвукові CMUT томографи, ємнісні сенсори керування, сенсорні дисплеї тощо [1-3].

Сигнальні перетворювачі ємнісних сенсорів характеризується значним різноманіттям компонентів та реалізацій вимірювального перетворення ємності [4]. На даний час сформувалося поняття «front-end» – інтерфейсної частини пристрою, яка забезпечує формування та подальше перетворення інформативного сигналу [5]. Розвиток цих «front-end» перетворювачів йде по шляху підвищення завадостійкості, мультирежимності, мінімізації напруг живлення та енергоспоживання. Має місце постійний прогрес в розвитку елементної бази сигнальних перетворювачів, зокрема, операційних підсилювачів, ключів, аналого-цифрових перетворювачів [6].

В даній статті розглянуті питання підвищення ефективності функціонування ємнісних сенсорів просторового наближення, які знаходять використання в системах дистанційної активації певних процесів, зокрема, переходів між режимами повної функціональності та енергоощадності. Особливу актуальність дистанційна активація має місце в задачах вмикання енергоємних джерел світла.

Висвітлені далі матеріали є результатами подальшого розвитку базових схем сигнальних перетворювачів, на які автором статті отримані відповідні патенти США [7-9].

Сигнальне перетворення в ємнісних сенсорах наближення

За інформативними сигналами сигнальні перетворювачі ємнісних сенсорів можна розділити на два типи: S-Cap (Self-Capacitance) та M-Cap (Mutual-Capacitance). Інформативно величиною первинного перетворення перетворювачів S-Cap типу є зміна власної ємності між чутливим активним електродом структури сенсора та об'єктом взаємодії, який утворює пасивний електрод. Взаємодія сигнальних перетворювачів з пасивним електродом в таких сенсорах є неможлива, а його потенціал вважається незмінним. В перетворювачах M-Cap типу інформативно величиною первинного перетворення є зміна взаємної ємності між передаючим та приймаючим електродами вимірюваного конденсатора. Для цього на передаючому електроді парою протифазних ключів формують імпульси напруги активації процесів заряду/розряду, а струм цих процесів вимірюють на приймаючому електроді.

В ємнісних сенсорах наближення використовують перетворювачі S-Cap типу. Типово об'єктом взаємодії є долоня, палець людини чи стилус. Приклад спрощеної схеми

сигнального перетворювача ємнісного сенсора S-Сар типу на наведено на Рис. 1. Схема використовує принцип інтегрування струму, функцію якого виконує операційний підсилювач ОА, в коло зворотного зв'язку якого ввімкнено інтегруючий конденсатор C_{INT} . Резистор R_{FB} є допоміжним і стабілізує схему за постійним струмом. Ключ S_Z розряджає інтегруючий конденсатор C_{INT} на початку вимірювального перетворення. Конденсатор C_P представляє паразитну ємність об'єктів оточуючого середовища.

Вимірювальне перетворення здійснюється двофазними циклами. У першій фазі Ph_1 ключ S_1 , приєднуючи вимірювальний конденсатор C_X до джерела напруги V_S , заряджає його, а ключ S_2 є розімкненим. У другій фазі Ph_2 ключ S_1 розмикається, в ключ S_2 приєднує заряджений конденсатор C_X до інвертуючого входу ОА.

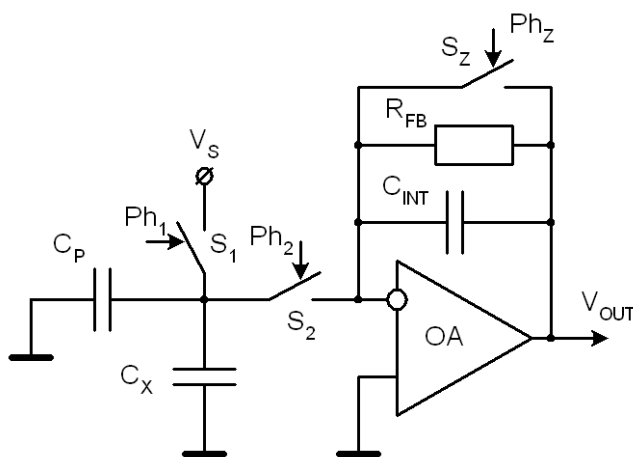


Рис. 1. Спрощена схема сигнального перетворювача S-Сар типу

Неінвертуючий вхід ОА є заземленим (нульовим), а отже в струмовому колі ТІА протікатиме струм розряду $I_{IN}(t) = V(C_X)C_X/t$. Цей струм передається у коло зворотного зв'язку ОА, заряджаючи інтегруючий конденсатор C_{INT} . Вимірювання здійснюється на протязі декількох циклів, а інформативною величиною перетворення є напруга $V_{OUT} = -NV_S C_X/C_{INT}$, де N – кількість циклів. Після завершення вимірювального перетворення та аналого-цифрового перетворення вихідної напруги V_{OUT} конденсатор C_{INT} розряджається ключем S_Z .

Можливі і інші схеми реалізації принципу інтегрування струму, зокрема на основі сигма-дельта модуляторів, які є основою аналого-цифрового перетворення в ємнісних сенсорах (детекторах) наближення, зокрема, CY3235 Proximity Detector Demonstration Kit (рис. 2,а) та CY8СKIT-024 (рис. 2,б) [10]. Чутливі електроди цих сенсорів можуть бути у виді гнучкого кабелю чи плоскої панелі.



Рис. 2. Сенсори наближення компанії Cypress Semiconductor

Аналіз проблеми та її рішення

Суттєвою проблемою сигнальних перетворювачів сенсорів наближення є значний вплив паразитної ємності C_p сторонніх об'єктів. Особливо такий вплив проявляється при наближенні до чутливих електродів заземлених металічних поверхонь, зокрема металічного корпусу пристрою. З точки зору сигнального перетворення вплив обох ємностей – інформативної C_x та паразитної C_p – є ідентичним і характеризується тими ж кількісними параметрами.

Для прикладу на рис. 3 показано експлуатаційні умови сенсора наближення, з допомогою якого керується освітлення камери мікрохвильової пічки (1). Сенсор повинен сприймати рух руки при її наближенні до поверхні дверцят (2), а проблема полягає в тому, що чутливий електрод сенсора знаходиться в безпосередній близькості до металічного корпусу (3). Бажаною зоною розміщенням чутливого електроду сенсора наближення є вузька щілина (4) між пластмасовою панеллю дверцят та їх металічним корпусом.

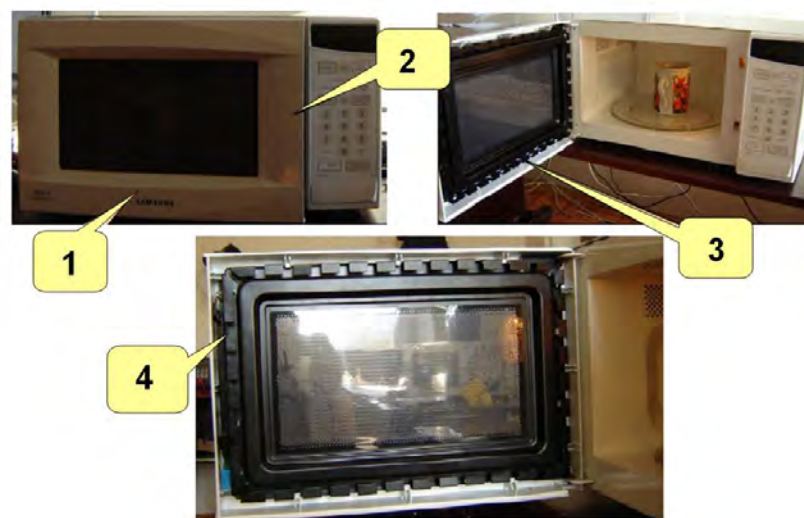


Рис. 3. Місцезнаходження сенсора наближення в мікрохвильовій пічці та сторонні об'єкти паразитної взаємодії

Як буде показано далі, розглянута проблема вирішується методом активного екранування [11]. Його суть полягає у використанні допоміжного екрануючого електроду, який розміщується між чутливим електродом та стороннім об'єктом, зокрема корпусом. На відміну від пасивного екранування, в якому допоміжний електрод заземляється, активне екранування передбачає модуляцію потенціалу екрануючого електроду. Для досягнення необхідного ефекту потенціал екрануючого електроду змінюється синхронно з потенціалом активного електроду, ємність C_x якого є інформативною величиною вимірювального перетворення.

З метою аналізу впливу металічних елементів панелей та контурів заземлення на електричне поле чутливого електроду ємнісного сенсора наближення проведено ряд модельних досліджень з використанням часткових диференціальних рівнянь PDEs (Partial Differential Equations). Моделювання здійснювалося в середовищі Comsol Multiphysics. Основою моделей є базові рівняння електростатики:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\varphi}, \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n q_i, \quad \Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}, \quad \sum_{i=1}^n q_i = \Phi_E \cdot \varepsilon_0,$$

де q_i – точкові заряди в заданому об’ємі інтегрування; φ - потенціали зарядів, ε_0 – абсолютна діелектрична проникність; S – площа рамки інтегрування електричного; Φ_E – потік електричного поля в площі S .

Приклади результатів моделювань просторового розподілу ліній електричного поля (Electric field lines) електроду сенсора (Sensor) при наближенні об’єкту (Object), зокрема руки, наведені на рис. 4,а. Можна бачити, що при введенні в середовище заземленої металічної поверхні (Ground) густина ліній поля, а відтак їх модуляція об’єктом керування, різко зменшуються (рис. 4,б).

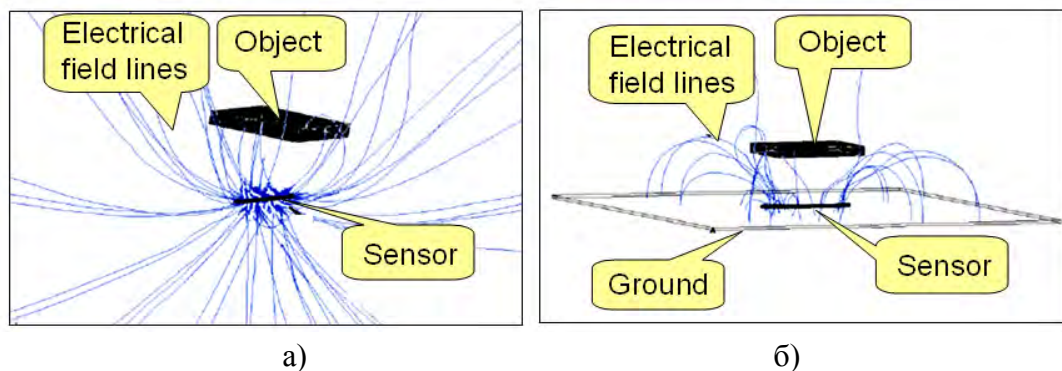


Рис. 4. Результати модельного дослідження розподілу електричного поля електроду без (а) та при (б) наявності заземленої металічної поверхні

Кількісно приклад результатів такого моделювання представлено в табл. 1, де C_A , C_S – ємності чутливого електроду, відповідно, при відсутності та присутності об’єкту керування (зокрема, руки), а $C_D = C_A - C_S$ – приріст ємності (інформативний сигнал сенсора наближення). Розглянуто три варіанти взаємодії. Перший варіант характеризує ємності без металічних об’єктів, другий - з металічними заземленим контуром (з нульовим потенціалом), а третій - з активним екрануючим електродом.

Табл. 1.

Результати модельного дослідження модуляції ємності

Варіант модельного дослідження		C_A , пФ	C_S , пФ	C_D , пФ
.	Без металічних об’єктів	8,3	8,8	0,5
		6	9	3
.	З металічними заземленим контуром (з нульовим потенціалом)	22,	22,	0,0
		46	53	7
.	Аналогічно до п.2 з екрануючим електродом (з потенціалом активного електроду)	110	110	0,3
		,3	,6	

Як слідує з наведених даних при заданих граничних умовах наближення руки обумовлює приріст вимірюваної ємності $C_D = 0,53$ пФ, що може бути достатнім для якісної процедури детектування. Результат принципово змінюється при взаємодії з заземленим контуром – приріст сигналу зменшується до $C_D = 0,07$ пФ, що робить функціонування

сенсора непрактичним. Натомість, при введенні в модель екрануючого електроду, потенціал якого є рівним потенціалу активного електроду, в значній мірі відновлює приріст інформативного сигналу до $C_D = 0,3$ пФ. Необхідно відзначити, що таке відновлення не є ідеальним і, до того ж, внаслідок введення екрануючого електроду, абсолютне значення ємності C_A зростає. Тому для об'єктивного аналізу ефективності екрануючого електроду необхідно проводити детальні експериментальні дослідження реальних пристроїв. Мова про такі дослідження піде далі.

Реалізація методу активного екранування

Для реалізації методу активного екранування схема сигнального перетворювача (рис. 5) доповнюється додатковим колом синхронної модуляції потенціалу екрануючого електроду Shield. Така модуляція здійснюється ключами S_3 , S_4 , причому фаза ключа S_3 (Ph_1) співпадає з фазою ключа S_1 , а фаза S_4 (Ph_2) – з фазою S_2 . Паразитна ємність між чутливим електродом вимірюваної ємності C_X та екрануючим електродом Shield представлена конденсатором C_S . Оскільки, в процесі вимірювального перетворення потенціал екрануючого електроду Shield завжди співпадає з напругою на конденсаторі C_X , заряд C_S не відбувається, а отже впливом паразитних ємностей C_S та C_P можна знехтувати.

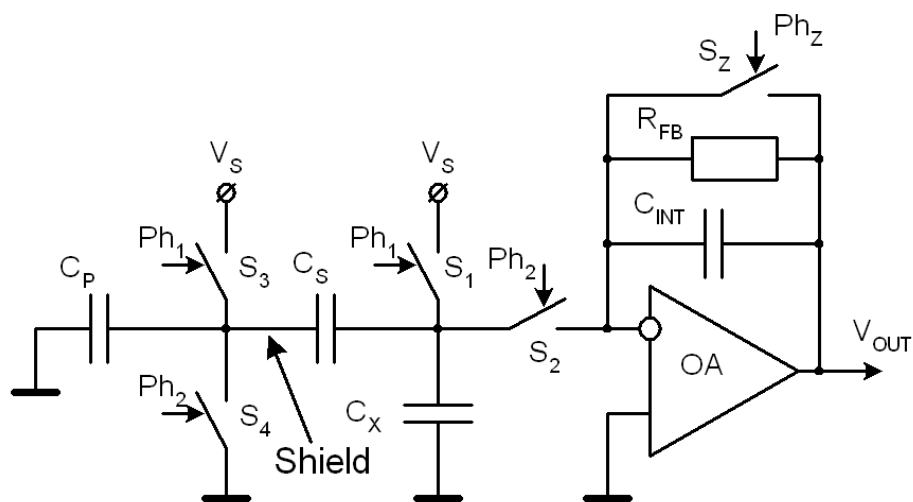


Рис. 5. Схема сигнального перетворювача з активним екрануванням

Експериментальні дослідження ефективності активного екранування проводилися з використанням модуля сигнального перетворювача вже згаданого сенсора CY3235 Proximity Detector Demonstration Kit наближення компанії Cypress Semiconductor (рис. 2,а). Модуль базується на апаратно-програмному компоненті CSD Cap Sensor (рис. 6). Вимірювальне перетворення здійснюється на основі сигма-дельта модулятора Sigma-delta modulator, який, крім вже розглянутих кіл комутування конденсаторів, містить компаратор CMP та тригер Latch (рис. 7). Компаратор здійснює порівняння напруги на інтегруючій ємності C_{INT} з опорною напругою V_{REF} .

Використана інтегральна схема PSoC CY8C21634 (рис. 8). Чутливий електрод (Proximity Sensor) через роз'єм J1 приєднано до виводу 25 порту P0[2], а активний екрануючий електрод (Shield electrode) через роз'єм J2 – до виводу 22 порту P2[4].

Встановлювалися наступні параметри специфікації модуля CSD: Finger Threshold = 45, Noise Threshold = 30, Baseline Update Threshold = 200, Hysteresis = 15, Debounce = 3, Negative Noise Threshold = 20, Low Baseline Reset = 50, Resolution = 15.

електроду (Sensor), активного екрануючого електроду (Shield) та інтегральної схеми (PSoC), а також, хороша відтворюваність параметрів сенсора наближення та висока технологічність його виготовлення.

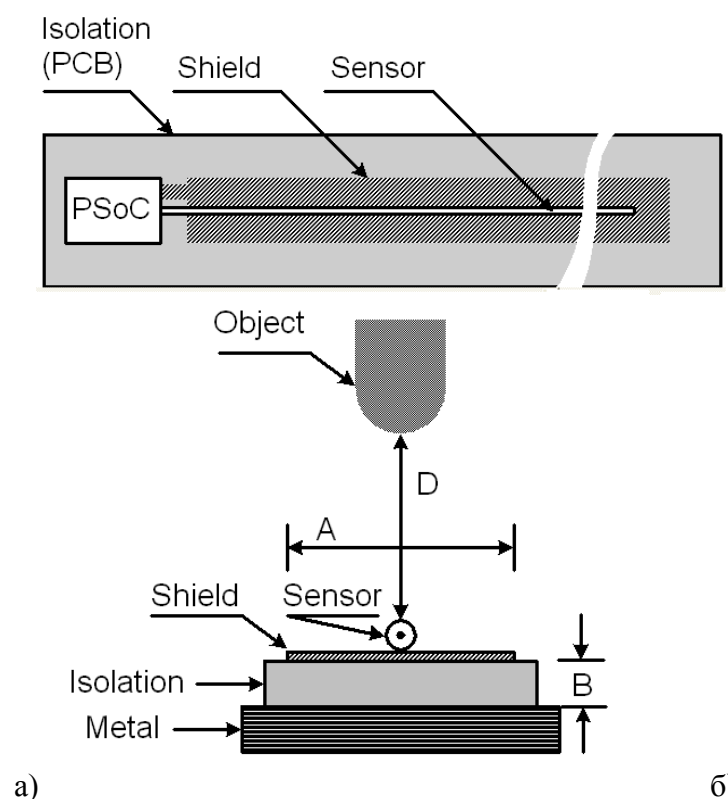


Рис. 9. Плата з чутливим електродом сенсора (а) та розміри об'єктів дослідження (б)

В наведених далі результатах експериментальних досліджень використані наступні позначення (рис. 9,б): А - ширина екрануючого електроду, В - відстань між екрануючим електродом та заземленою поверхнею та D - відстань до об'єкту (Object). Об'єктом, по відношенню до якого вимірювалася відстань детектування D, слугував палець людини (експериментатора).

Вимірювалася залежність відстані D якісного детектування пальця від ширини А екрануючого електроду та відстані В між екрануючим електродом та заземленою поверхнею. Критерієм якісного детектування в заданих умовах вимірювання є співвідношення сигнал-шум $SNR = 5$. Результати проведених досліджень наведені в табл. 2 (скорочення NM позначає експерименти при відсутності заземленої металічної поверхні, тобто максимально можливі параметри детектування).

Табл. 2.

Результати експериментального дослідження відстані D від А та В

В, мм	Відстань детектування (D), см				
	A=5мм	A=10мм	A=20мм	A=30мм	A=40мм
0	10	10	10	10	10
5	13	17	16	14	15
10	17	20	18	17	20
15	22	22	21	20	25
NM	25	28	26	28	30

Аналіз отриманих результатів дозволяє, по-перше, підтвердити високу методу активного екранування, і, по-друге, виявити залежність дальності детектування від розмірів структури сенсора. Зокрема, при $A = 40$ мм, $B = 15$ мм відстань детектування

становить $D = 25$ см, що, по-перше, незначно відрізняється від умов при відсутності паразитного впливу заземленої металічної поверхні (NM: $D = 30$ см), і, по-друге, в 2,5 рази більше ніж при $A = 40$ мм, $B = 0$ мм (безпосередньому контакті екрануючого електроду з заземленою поверхнею).

І на завершення відзначимо ще одну виявлену закономірність. Умови експлуатації детектора наближення в мікрохвильовій пічці пов'язані зі значним рівнем електромагнітної завади, яка в даному випадку обумовлена енергією високочастотного випромінювання магнетрона пічки. Близькість плати детектора до магнетрона та камери пічки призводить до наведення високочастотних полів на всі елементи структури сенсорного пристрою, які при таких умовах можуть розглядатися як елементи з розподіленою структурою. Відтак, важливим є не лише заземлення, але і спосіб його реалізації. В табл. 3 наведені вибіркові результати порівняльного аналізу відстані детектування від способу заземлення.

Табл. 3.

Результати експериментального дослідження відстані D від режиму заземлення

Спосіб заземлення плати	B мм	A, мм	D, см
Безпосереднє заземлення	0	10	10
	5	20	16
Заземлення через індуктивність	0	10	15
	5	20	22

Отримані результати показують, що при заземленні плати через фільтруючий елемент, яким в даному випадку служить котушка індуктивності, можна досягти ще більш значної дальності детектування. Зокрема, при $A = 20$ мм, $B = 5$ мм заземлення плати детектора через індуктивність $L = 33$ мкГн збільшує відстань якісного детектування з $D = 16$ см до $D = 22$ см.

Таким чином, проведені дослідження покази ефективність запропонованих підходів реалізації методу активного екранування ємнісних сенсорів наближення в особливо екстремальних умовах експлуатації.

Приклад успішної реалізації такого сенсора, що встановлюється за панеллю дверцят (1) мікрохвильової пічки представлено на рис. 10. Сенсор (2) виконує функцію вмикання освітлення камери пічки при наближенні до неї руки. На платі (3) крім електродів (4) та сигнального перетворювача (5), розміщено реле (6) вмикання освітлювальної лампи.

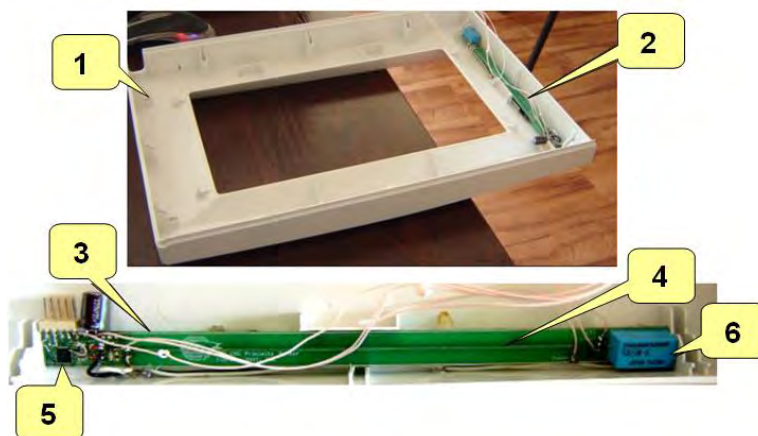


Рис. 10. Приклад розміщення сенсора наближення за панеллю дверцят пічки

Висновки

Проведено аналіз функціонування сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів наближення. Розкрита проблема паразитного впливу сторонніх об'єктів, зокрема, металічних елементів панелей та контурів заземлення, на чутливість цих сенсорів. З метою аналізу такого впливу проведено ряд модельних досліджень в середовищі Comsol Multiphysics з використанням часткових диференціальних рівнянь PDEs.

Показано, що проблема паразитного впливу сторонніх об'єктів вирішується методом активного екранування з використанням допоміжного екрануючого електроду, який розміщується між чутливим електродом та стороннім об'єктом, зокрема корпусом. На відміну від пасивного екранування, в якому допоміжний електрод заземляється, активне екранування передбачає модуляцію потенціалу екрануючого електроду. Для досягнення необхідного ефекту потенціал екрануючого електроду змінюється синхронно з потенціалом активного електроду вимірюваної ємності.

Експериментальні дослідження ефективності активного екранування проведено з використанням модуля сигнального перетворювача сенсора наближення CY3235 Proximity Detector Demonstration Kit компанії Cypress Semiconductor. Підтверджено високу ефективність методу активного екранування та встановлені залежності дальності детектування від розмірів структури сенсора. Зокрема, при ширині екрануючого електроду $A = 40$ мм та відстані між екрануючим електродом та заземленою поверхнею $B = 15$ мм дальність детектування становить $D = 25$ см. Показано, що в умовах значної електромагнітної завади доцільно використовувати заземлення плати через котушку індуктивності. Зокрема, при індуктивності $L = 33$ мкГн дальність якісного детектування збільшується з $D = 16$ см до $D = 22$ см.

Ефективність запропонованих рішень продемонстрована на прикладі сенсора наближення, який виконує функцію вмикання освітлення камери мікрохвильової пічки при наближенні до неї руки. Дальність завадостійкого якісного детектування при працюючій пічці становить 20 см, що є достатнім для виконання заданої функціональності ємнісного сенсора.

Література

1. Larry K. Baxter. *Capacitive sensors: design and application*. – IEEE Press. – 1997. – 300 p.
2. Ebrahim Ghafar-Zadeh, Mohamad Sawan. *CMOS Capacitive Sensors for Lab-on-Chip Applications. A Multidisciplinary Approach // Springer Science Business Media*. – 2010. – 150 p.
3. Ezzat G. Bakhoum, Marvin H. M. Cheng. *Novel Capacitive Pressure Sensor // Journal of microelectromechanical systems*. – Vol. 19. – No. 3. – 2010. – PP. 443-450.
4. Wouter Bracke, Robert Puers, Chris Van Hoof. *Ultra low power capacitive sensor interfaces*. – Springer. – 2007. – 110 p.
5. Salvatori, S.; Masarone, N.; Di Nucci, G.; Conte, G. *Compact front-end electronics for low-level current sensor measurements // Electronics Letters*. – Vol. 42. – No. 12. – 2006. – PP. 682 – 684.
6. J. Ramirez-Angulo, A. Torralba, R. G. Carvajal, J. Tombs. *Low-Voltage CMOS Operational Amplifiers with Wide Input-Output Swing Based on a Novel Scheme // IEEE transactions on circuits and systems: fundamental theory and application*. – Vol. 47. – No. 5. – 2000. – PP. 772-774.
7. Патент США № US8570053. G01R 27/26. *Capacitive field sensor with sigma-delta modulator*. Ryshtun Andriy, Kremin Victor. Видано 29.10.2013.
8. Патент США № US8614587. G01R 27/26. *Capacitance sensing circuits and methods*. Ogirko Roman, Maharyta Andriy, Kremin Viktor. Видано 24.12.2013.
9. Патент США № US8575947. *Receive demodulator for capacitive sensing*, Walsh Paul, Zhang Zheyao, Kremin Viktor. G01R 27/26. Видано 05.11.2013.
10. *Proximity Detector Demonstration Kit: CY3235, CY8CKIT-024*. Cypress Semiconductor Corporation. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cypress.com/>.
11. Victor Kremin, Andriy Ryshtun, Vasyl Mandzij. *Proximity Detection in the Presence of Metal Objects*. – Cypress AN42851. – 2008. – 10 P. - [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cypress.com/>.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 - 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.