

СЕЛЕКЦІЯ СИГНАЛУ СТИЛУСА ЄМНІСНОЇ СЕНСОРНОЇ ПАНЕЛІ НА ОСНОВІ КВАДРАТУРНОГО ДЕТЕКТОРА

Розглядаються задачі селекції сигналів в ємнісних сенсорних матрицях з активним несинхронізованим стилусом. Запропоновані підходи сигнального перетворення, новизною яких є одночасне вимірювання та селекція двох сигналів - перший з яких формується дотиком пальця до ємнісної панелі і вимірюється в режимі детектування дотику, а другий - несинхронізованим стилусом і вимірюється в режимі стилусу. Для вирішення проблеми синхронного детектування сигналу несинхронізованого стилуса використовується квадратурна демодуляція сигналу. Показано, що для забезпечення високої селективності сигналів ємнісної панелі зі стилусом необхідно, щоб відношення частоти f_{FT} вимірювання ємності матриці до частоти f_{ST} випромінювання стилуса було кратним двом. Розглянуті можливі варіанти вибору частот та послідовності комутації сигналів. Сигнальний перетворювач ємнісної сенсорної панелі зі стилусом реалізовано на основі PSoC.

Ключові слова: ємнісний сенсор, стилус, селекція сигналів.

KREMIN VIKTOR

Western Ukrainian National University

CAPACITIVE TOUCH PANEL STYLING SIGNAL SELECTION BASED ON QUADRATURE DETECTOR

The problems of selection signals in a capacitive sensor panel with an active free running stylus are considered. The novelty of proposed signal processing approaches is possibility of two signals simultaneous measurement and selection. The author of this article proposed methods and developed algorithmic and structural solutions for devices for interacting with capacitive touch panels with active styluses. The main ones are: a method of dual-mode signal selection based on quadrature demodulation. The novelty of the proposed method of signal conversion of an active unsynchronized stylus is the simultaneous measurement and selection of two signals. The first signal is formed by touching the capacitive panel with a finger and is measured in the Finger Detection mode. Analysis of the frequency response of the above-mentioned elementary and quadrature detectors shows that signal converters based on them provide a high level of selectivity with respect to even harmonics $2f_0$, $4f_0$, $6f_0$... It is shown that a significant problem in detecting an unsynchronized stylus signal is the lack of information about the phase of its signal, which limits the possibility of using synchronous detection methods. To solve this problem, synchronous detection approaches with quadrature demodulation of the stylus signal are used. For this, two components of the detected signal SA and SB are formed, the phases of the detection pulses of which CA and CB are mutually shifted by 90. Possible options for choosing frequencies are considered, in particular, it is assumed that the frequency f_{FT} of measuring the matrix capacitance is twice as large or twice as small as the frequency f_{ST} of the stylus radiation. Parallel and serial options for switching the signal polarity are presented. The signal converter is implemented on a programmable PsoC SoC (Cypress Semiconductor)

Keywords: capacitance sensor, stylus, signal selection.

Вступ

В даний час широке застосування знаходять двокоординатні ємнісні сенсорні панелі, найбільш поширеними представниками яких є тачпади (TouchPad) та сенсорні дисплеї (TouchScreen) [1, 2]. Інформативною величиною таких панелей є зміна електричної ємності нанесених на діелектричну підкладку електродів, які формують двокоординатну матрицю з рядків та стовпчиків.

Подальший розвиток ємнісних панелей, здебільшого, в планшетних комп'ютерах та смартфонах, забезпечується інтегруванням цих панелей з стилусами (Stylus, Stylus pen) – пристроями у формі олівця, які відповідним чином взаємодіючи з панеллю забезпечують підвищення просторової роздільної здатності та розширення функціональних можливостей (рис. 1, а). Розрізняють пасивні та активні стилуси. Пасивний стилус обумовлює зміну ємності, яка аналогічно до дотику пальця чи інших струмопровідних об'єктів, вимірюється з допомогою електродів матриці. Натомість, основою функціонування активних стилусів є випромінювання електромагнітного сигналу, за параметрами якого та порядковим номером електродів матриці, на яких цей сигнал є максимальним, визначають просторове положення стилуса [4 - 6].

Сигнальні перетворювачі ємнісних панелей характеризується широким різноманіттям компонентів та реалізацій вимірювального перетворення. На даний час сформувалося поняття «front-end» – інтерфейсної частини пристрою, яка забезпечує формування та подальше перетворення інформативного сигналу. Домінуючу роль в 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 – PSoC® (Programmable System-on-Chip) [7].

Дана стаття присвячена проблемі розвитку сигнальних перетворювачів ємнісних панелей з активним стилусом.

Функціонування ємнісних сенсорних панелей з активними стилусами

В залежності від інформативної величини в ємнісних сенсорних панелях традиційно розрізняють S-Cap (Self-Capacitance) та M-Cap (Mutual-Capacitance) методи вимірювання. Інформативною величиною первинного перетворення S-Cap методу є зміна значень власних ємностей між активними електродами та об'єктом взаємодії, який утворює пасивний електрод. В M-Cap методі інформативною величиною первинного перетворення є зміна значень взаємних ємностей між передаючими T_x та приймаючими R_x електродами. Ємнісну матрицю створюють сформовані на здебільшого скляній підкладці перехресно розміщені оптично

прозорі електроди (рис. 1. б) з окислів індію та олова (ITO – Indium Tin Oxide).

Взаємодія активного стилуса з панеллю відбувається через наконечник (Tip) (рис. 1, в). Типово, в стилус входять: мікроконтролер (MCU), який формує відповідний протокол взаємодії, модулятор (Modulator) сигналу, драйвер (ST driver), джерело автономного живлення (Battery) та бустер (Booster), який підвищує напругу живлення. Крім того, в стилусах можуть передбачатися кнопки, які розширюють алгоритм їх функціонування (Function S), та інші елементи, зокрема, сенсор тиску. Просторове положення стилуса визначають за рівнем його сигналу, який вимірюється в процесі сканування електродів ємнісної панелі.

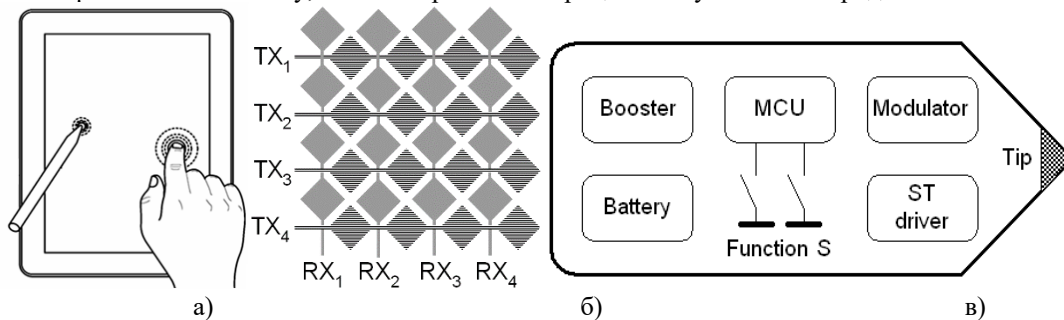


Рис. 1. Ємнісна сенсорна панель (а), матриця електродів (б) та блок-схема стилуса (в)

Автором даної статті запропоновані методи та розвинені алгоритмічно-структурні рішення пристроїв взаємодії ємнісних сенсорних панелей з активними стилусами. Основними серед яких є: метод двомодової селекції сигналів на основі квадратурної демодуляції.

Вказані пристрої базуються на двох методах взаємодії активного стилуса – без та з синхронізацією відносно сигнальних процесів в ємнісній матриці. В першому методі має місце однонаправлений потік сигналів E_T від стилуса до матриці. Натомість, в другому методі стилус приймає сигнали синхронізації та, у відповідності до часової діаграми функціонування, передає на електроди панелі інформаційні пакети даних E_T . В залежності від методу, вимірювальний перетворювач ємнісної панелі реалізує селекцію сигналів та відповідний протокол переходу між вимірюваннями ємностей панелі та взаємодією з стилусом. Перевагами першого методу взаємодії є спрощена конструкція стилуса та, відповідно, менші габарити, енергоспоживання та собівартість. Однак, цей метод пов'язаний з проблемою коректної селекції сигналу стилуса в сигнальному тракті ємнісної панелі. Саме рішення цієї проблеми присвячена дана стаття. Як буде показано далі, основою такого рішення є метод двомодової селекції сигналу на основі квадратурної демодуляції.

Структурна схема ємнісної панелі типу M-Cap APA (All-Point-Addressable) з несинхронізованим активним стилусом наведена на рис. 2. Сигнали на передаючих електродах (в даному прикладі – рядках TX₁, TX₂,...TX_M) та приймаючих електродах (в даному прикладі – стовпчиках RX₁, RX₂,...RX_N) по чергово комутуються мультиплексорами MUX₁ та MUX_{2A}. В результаті циклу вимірювань отримується матриця N×M сигналів, де N – кількість передаючих TX, а M – кількість приймаючих RX електродів. Вимірювальна система містить: TX driver – драйвер сигналів активації передаючих електродів; RX receiver – вимірювальний перетворювач сигналів вхідних електродів; ADC – аналого-цифровий перетворювач; Controller – контролер на основі CPU (Central Processing Unit); Decision unit – вузол прийняття рішень та цифрової обробки сигналів; Interface unit – інтерфейсний вузол та BUS – шина команд керування та даних. В залежності від функціональних можливостей та параметрів можливі різноманітні модифікації системи.

З метою поєднання функції активного стилуса з M-Cap та S-Cap методами вимірювання, в систему вводять додатковий мультиплексор (в даному варіанті MUX_{2B}), який дозволяє проводити послідовне сканування сигналів на передаючих електродах TX₁, TX₂,...TX_M. Вимірювання за M-Cap методом проводять при вимкненому мультиплексорі MUX_{2B}. Натомість, в S-Cap методі та при вимірюванні сигналів стилуса вимкненим є мультиплексор MUX₁. В результаті вимірювання отримують послідовність з N та M сигналів.

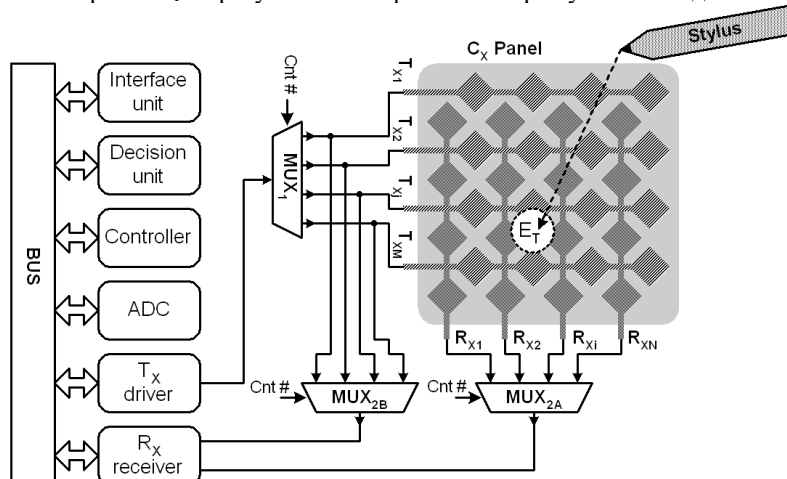


Рис. 2 Структура системи ємнісної панелі з несинхронізованим активним стилусом

Новизною запропонованого методу сигнального перетворення активного несинхронізованого стилуса є одночасне вимірювання та селекція двох сигналів. Перший сигнал формується дотиком пальця до емнісної панелі і вимірюється в режимі Детектування пальця. Другий сигнал формується несинхронізованим стилусом і вимірюється в режимі Stylus Mode. Для реалізації вказаного методу використані підходи синхронного детектування з квадратурною демодуляцією сигналу стилуса.

Селекція сигналу на основі квадратурної демодуляції

Основними вимогами до представленого далі двомодового сигнального перетворення двокоординатної емнісної панелі є:

- формування незалежних сигналів дотику пальця та стилуса;
- вузький спектр корисних сигналів в одному частотному діапазоні, зокрема, 240 кГц (Детектування пальця) та 120 кГц (Stylus Mode);
- високоефективне подавлення сторонніх сигналів та завад;
- реалізація пристрою на основі програмованої СнК – PsoC (Cypress Semiconductor).

Для виділення корисних сигналів та ефективного подавлення сторонніх електромагнітних завад використовуються підходи синхронного детектування. Типові приклади форм сигналів в синхронному детекторі показана на рис. 3, а (далі, для порівняння з іншими, такий детектор називається елементарним). Полярність сигналу (в даному випадку синусоїдальної форми S_{IN}) перемикається у відповідності до логічного рівня керуючих імпульсів C_D частотою f_0 . Інформативною величиною продетектованого таким чином сигналу є площа S_D , числове значення якої при гармонічній формі сигналу рівна ефективному значенню

$$S_E = A_S / \sqrt{2} \approx 0,707 A_S,$$

де A_S – амплітудне значення гармонічного сигналу.

Важливою передумовою якісного синхронного детектування є рівність частот та строге співпадіння фаз сигналу S_{IN} та керуючих імпульсів C_D . На практиці вихідна напруга S_{OUT} сигнального перетворювача на синхронному детекторі формують шляхом низькочастотного фільтрування чи інтегрування продетектованого сигналу

$$S_{OUT} = \int_0^{N \cdot T} K_S \cdot A_S \sin(2\pi f t),$$

де: N – кількість періодів інтегрування, T та f – відповідно, період та частота гармонічного сигналу, t – час, K_S – знак кореляційної функції ($K_S = 1$ при $C_D = 1$ та $K_S = -1$ при $C_D = 0$) частотою f_0 .

Неспівпадіння частот f чи фаз φ сигналу S_{IN} та керуючих імпульсів C_D призводить зменшення вихідної напруги детектора. Таке зменшення є ефективним засобом частотної селекції сигналів. Зокрема, як показано на рис. 3, б, при $f = 2f_0$ (частота сигналу f вдвічі більша за частоту f_0 керуючих імпульсів C_D) ефективне значення сигналу рівне нулю ($S_E = 0$), тобто має місце повне подавлення другої гармоніки сигналу.

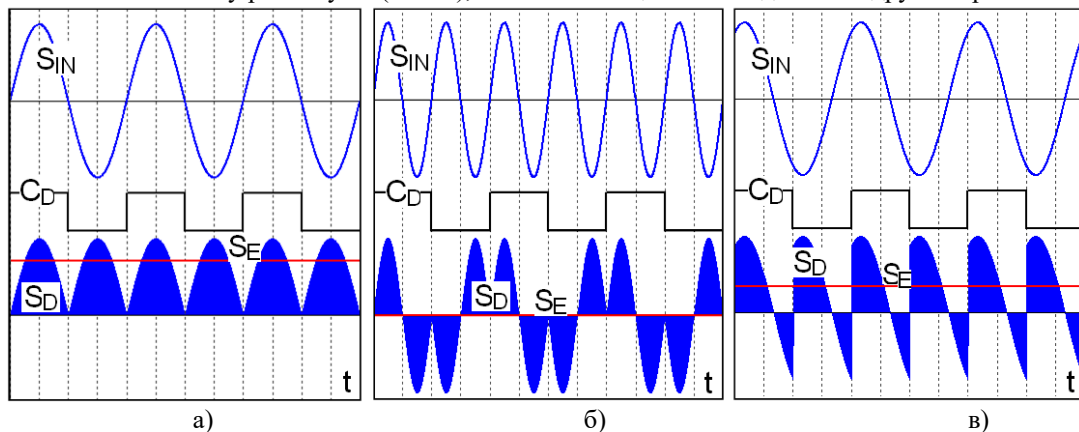


Рис. 3. Сигнали синхронного детектора при: $f = f_0, \varphi = 0^\circ$ (а); $f = 2f_0, \varphi = 0^\circ$ (б); $f = f_0, \varphi = 60^\circ$ (в)

Результати розрахунку амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) сигнального перетворювача на елементарному синхронному детекторі при десяти періодах інтегрування ($N = 10$) представлені на рис. 4, де: Normalized frequency f/f_0 – нормалізована частота, Signal a.u. – рівень сигналу в умовних одиницях. Можна бачити, що при відсутності фазової затримки між сигналом S_{IN} та керуючими імпульсами C_D ($\varphi = 0^\circ$) максимальний сигнал спостерігається на непарних гармоніках - $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0 \dots$. Натомість, рівень сигналу на всіх парних гармоніках ($2f_0, 4f_0, 6f_0 \dots$) прямує до нуля. Відтак, для реалізації високої селективності сигналів дотику пальця та стилуса відношення частоти f_{FT} вимірювання емностей матриці (Детектування пальця) до частоти f_{ST} випромінювання стилуса (Stylus Mode) повинно бути кратним двом, зокрема, $f_{FT} = 2 \cdot f_{ST}$ чи $f_{ST} = 2 \cdot f_{FT}$.

При цьому суттєвою проблемою детектування сигналу стилуса (як це вже відзначалося, в даній роботі вирішується задача побудови системи на несинхронізованому стилусі) залишається відсутність інформації про фазу його сигналу. Приклад форми сигналів в елементарному детекторі при невідповідності фази сигналу з фазою імпульсів керування, зокрема при зсуві фаз $\varphi = 60^\circ$, представлено на рис. 3, б, а приклади результатів розрахунку АЧХ при $\varphi = 80^\circ$ та $\varphi = -120^\circ$ - на рис. 4.

З метою вирішення цієї проблеми в запропонованому методі сигнального перетворення використано квадратурний детектор. Його алгоритмічно-структурною особливістю є формування двох складових продетектованого сигналу - S_A та S_B , фази імпульсів детектування яких C_A та C_B є взаємно зсунуті на 90° . Форми сигналів в такому квадратурному детекторі показані на рис. 5. Можна бачити, що ці S_A та S_B складові мають протилежну направленість: коли одна зростає – друга спадає, і навпаки. Вихідний сигнал S_{QD} квадратурного детектора формується подальшим математичним перетворенням цих складових

$$S_{QD} = \sqrt{S_A^2 + S_B^2}.$$

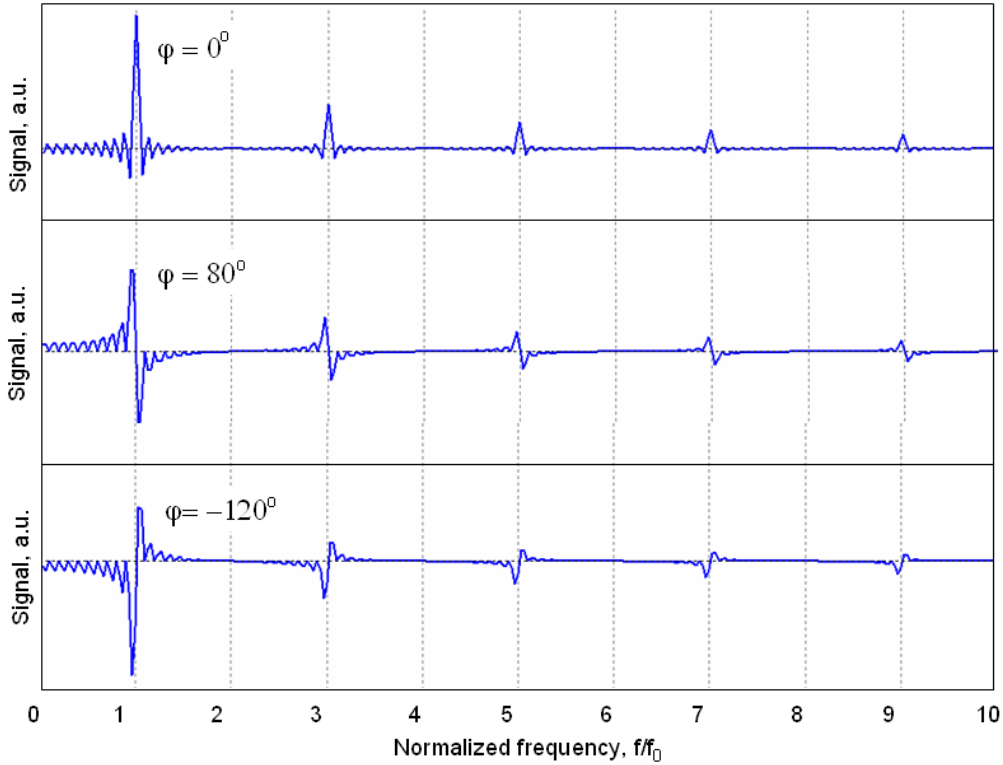


Рис. 4. АЧХ сигнального перетворювача на синхронному детекторі при різних затримках фази

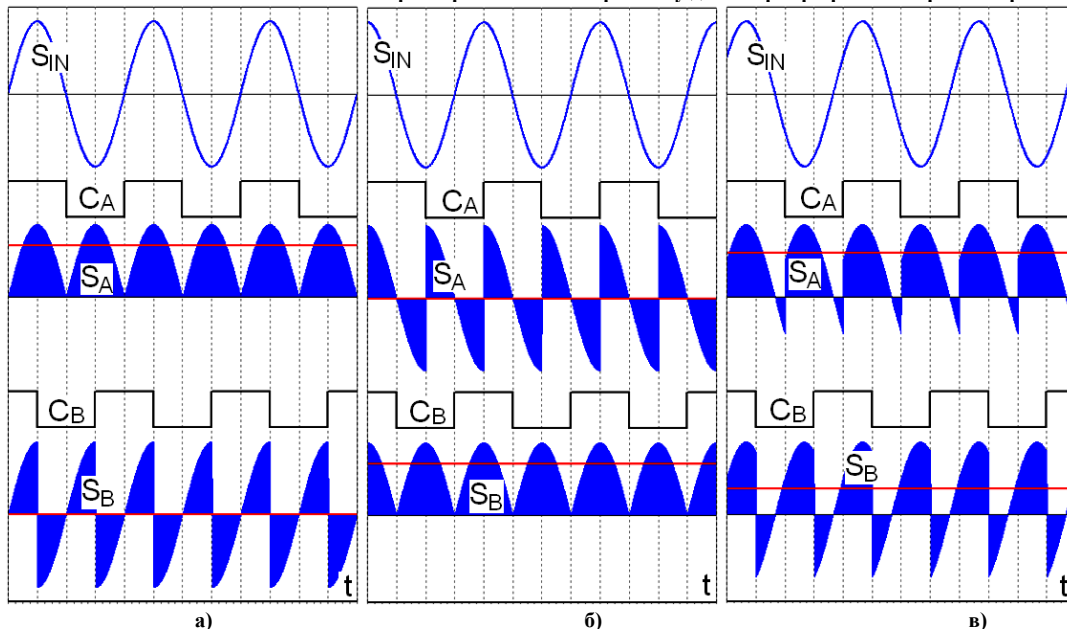


Рис. 5. Сигнали квадратурного синхронного детектора при: $\varphi = 0^\circ$ (а), $\varphi = 90^\circ$ (б), $\varphi = 30^\circ$ (в)

Враховуючи, що $\sin(2\pi ft + \phi + \pi/2) = \cos(2\pi ft + \phi)$, детектування сигналів при зсуві фази на 90° можна розглядати, як процес перетворення функцій синуса та косинуса. Відтак, фазова незалежність результату вищезгаданого перетворення обумовлена рівністю

$$S_{QD} = \sqrt{(A_S \sin(2\pi ft + \phi))^2 + (A_S \cos(2\pi ft + \phi))^2} = A_S \sqrt{\sin^2(2\pi ft + \phi) + \cos^2(2\pi ft + \phi)} = A_S.$$

На практиці математичні перетворення миттєвих значень сигналів можуть бути пов'язаними зі

значними структурно-процедурними затратами. Тому ці перетворення здійснюються над інтегрованими за декілька періодів N значеннями S_A та S_B . Приклади АЧХ каналів формування складових S_A та S_B та результуючого сигналу S_{QR} квадратурного детектора при кількості періодів інтегрування $N=10$ наведені на рис. 6. Розглянуто три варіанти фазового зсуву, а саме: $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ та $\varphi = -120^\circ$. Можна бачити, що на частоті $f/f_0 = 1$ (основна гармоніка) при $\varphi = 0^\circ$ результуючий сигнал S_{QR} визначає складова S_A : $S_A \rightarrow \text{Max}$, $S_B \rightarrow 0$. Натомість, при $\varphi = 90^\circ$ сигнал S_{QR} визначає складова S_B : $S_A \rightarrow 0$, $S_B \rightarrow \text{Max}$. Принципово важливим є те, що АЧХ результуючого сигналу S_{QR} квадратурного детектора не залежить від фазового зсуву φ , а відтак, представляється можливим детектування сигналу стилуса без прив'язки до його фази. Саме така можливість є визначальною при розробленні сигнальних перетворювачів ємнісних панелей з несинхронізованим стилусом.

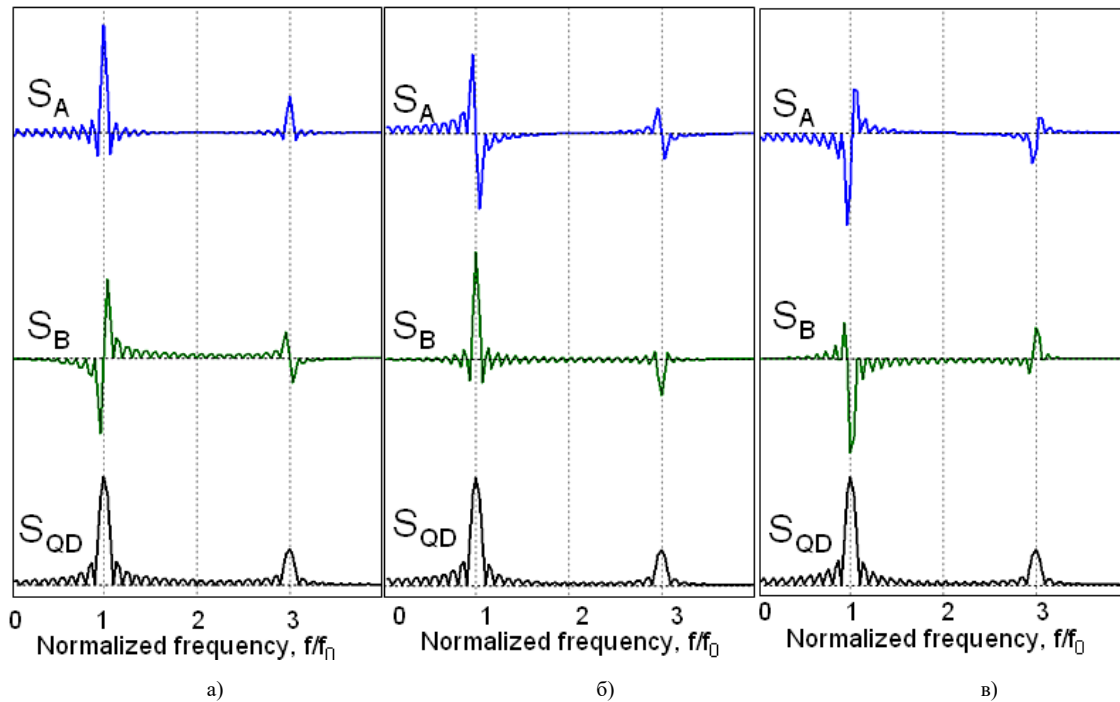


Рис. 6. АЧХ сигнального перетворювача на квадратурному синхронному детекторі при: $\varphi = 0^\circ$ (а), $\varphi = 90^\circ$ (б), $\varphi = -120^\circ$ (в)

Варіанти комутації полярності сигналів

Аналіз АЧХ вищерозглянутих елементарного та квадратурного детекторів показує, що сигнальні перетворювачі на їх основі забезпечують високий рівень селективності відносно парних гармонік - $2f_0$, $4f_0$, $6f_0$... Такий же рівень селективності характерний для нижчих відносно першої гармоніки частот, зокрема для частоти $f_0/2$. Відтак, як це вже відзначалося, задача селективності сигналів ємнісної панелі зі стилусом забезпечується кратністю двом відношення частоти f_{FT} вимірювання ємності матриці (Детектування пальця) до частоти f_{ST} випромінювання стилуса (Stylus Mode).

Полярність вхідного композиційного сигналу, який містить інформативний сигнал вимірювання ємностей матриці частотою f_{FT} та сигнал випромінювання стилуса частотою f_{ST} , перемикається комутаторами (модуляторами) - M_1 , M_{2A} та M_{2B} (рис. 7 та рис. 8) відповідних синхронних детекторів. Перемикання комутаторів здійснюється у відповідності до логічного рівня керуючих сигналів: при $C = 1$ сигнал залишається без змін (знак кореляційної функції «+»), а при $C = -1$ - сигнал інвертується (знак кореляційної функції «-»).

Комутатор M_1 формує інформативний сигнал Y_1 вимірювання ємностей матриці (Детектування дотику пальця). Керування цим комутатором здійснюється керуючим сигналом C_1 , частота f_{FT} і фаза φ_{FT} якого співпадають з відповідним частотою та фазою сигналу на передаючих електродах T_{X1} ємнісної матриці. Враховуючи, що фаза сигналу є відомою комутатор M_1 реалізує функцію елементарного синхронного детектора (сигнали - рис. 3, а). Комутатори M_{2A} та M_{2B} формують інформативні сигнали Y_{2A} та Y_{2B} , які служать основою відповідних складових S_A та S_B квадратурного детектора і використовуються в режимі вимірювання стилуса (Stylus Mode).

Можливі два варіанти вибору частот - частота f_{FT} вимірювання ємності матриці є вдвічі більшою чи вдвічі меншою за частоту f_{ST} випромінювання стилуса. Можливі, також, два варіанти комутації полярності сигналів - паралельний (рис. 7) та послідовний (рис. 8). Варіант паралельної комутації з логічної точки зору є найбільш простим. Однак, в ряді сигнальних перетворювачів ємнісної панелі зі стилусом, з практичної точки зору більш ефективно структурне рішення забезпечується послідовною комутацією. Таке рішення характерне для схем, в яких перший модулятор є структурною одиницею аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Тоді інформативний сигнал Y_1 отримують у виді частоти імпульсів (при перетворенні типу аналог-частота), їх тривалості (при перетворенні типу аналог-час) чи цифрового коду. Подальше комутація полярності такого сигналу вже здійснюється відповідними математичним перетворенням в цифровій формі.

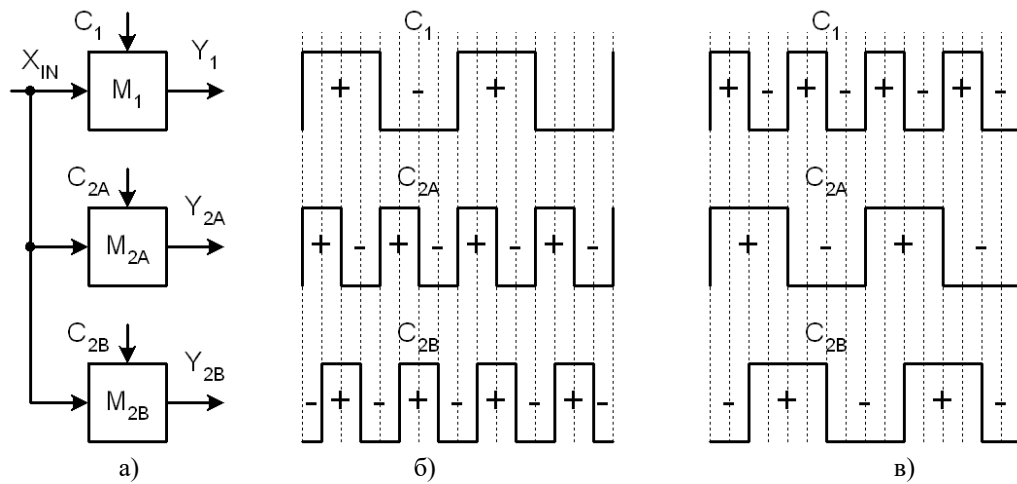


Рис. 7. Варіанти паралельної комутації сигналів

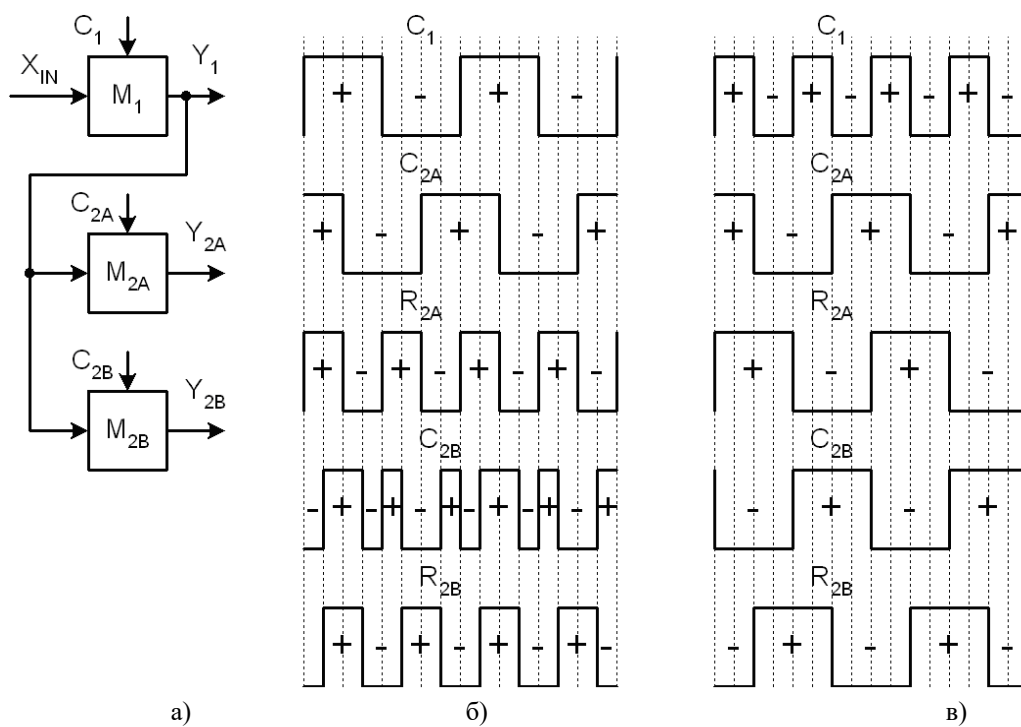


Рис. 8. Варіанти послідовної комутації сигналів

При паралельній комутації (рис. 7) керування здійснюється сигналами C_{2A} та C_{2B} , частота f_{ST} яких відповідає частоті випромінювання стилуса. Фази цих керуючих сигналів зміщені на 90° . Подальше сигнальне перетворення з сумуванням квадратів складових S_A та S_B дозволяє уникнути, як це вже відзначалося, небажаної залежності інформативного сигналу стилуса від фази його випромінювання. На противагу цьому, при послідовній комутації (рис. 8, а) результуюча полярність (на епорах позначена - R_{2A} та R_{2B}) інформативних сигналів Y_{2A} та Y_{2B} визначається комбінацією керуючих сигналів не лише комутаторів M_{2A} та M_{2B} , але і попереднього комутатора - M_1 . Таким чином, форма керуючих сигналів C_{2A} та C_{2B} при послідовній комутації є дещо іншою (рис. 8, б, в), зокрема, у варіанті $f_{ST} = 2f_{FT}$ реалізація послідовності результуючої полярності R_{2B} $[-1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1]$ забезпечується негармонічною послідовністю керуючого сигналу C_{2B} $[-1, +1, +1, -1, +1, -1, -1, +1]$. Натомість, в іншому варіанті $f_{FT} = 2f_{ST}$ послідовність результуючої полярності R_{2B} $[-1, -1, +1, +1, +1, +1, -1, -1]$ забезпечується гармонічною послідовністю C_{2B} $[-1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, -1, -1]$, що спрощує алгоритм керування детектором і не вимагає множення на дробовий коефіцієнт і може бути реалізована .

Реалізація прототипу сигнального перетворювача в PSoC

Реалізація пристрою на основі програмованої СнК – PSoC показано на рис.9.

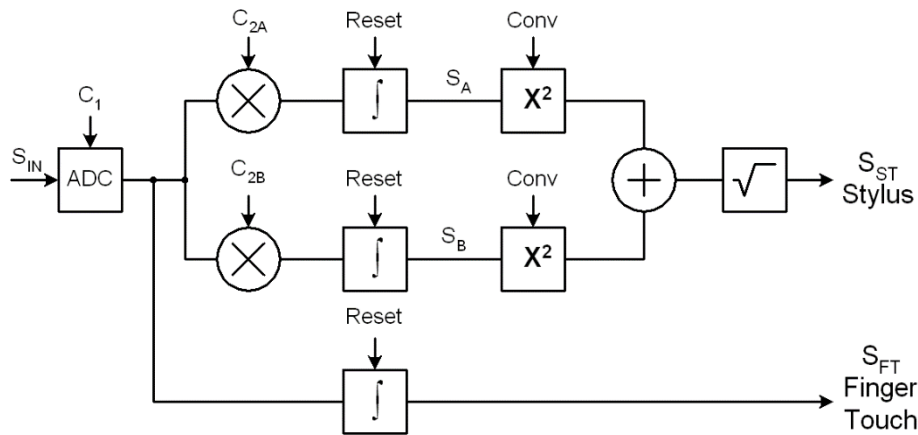


Рис. 9. Структура сигнального перетворювача двомодової селекції

Висновки

В роботі вирішується проблема селекції сигналу активного несинхронізованого стилуса ємнісної панелі. Запропоновані метод та алгоритмічно-структурні рішення сигнального перетворення, новизною яких є одночасне вимірювання та селекція двох сигналів - перший з яких формується дотиком пальця до ємнісної панелі і вимірюється в режимі Детектування пальця, а другий - несинхронізованим стилусом і вимірюється в режимі Stylus Mode.

Показано, що суттєвою проблемою детектування сигналу несинхронізованого стилуса є відсутність інформації про фазу його сигналу, що обмежує можливість використання методів синхронного детектування. Для вирішення цієї проблеми використовуються підходи синхронного детектування з квадратурною демодуляцією сигналу стилуса. Для цього формуються дві складові продетектованого сигналу - S_A та S_B , фази імпульсів детектування яких C_A та C_B є взаємно зсунуті на 90° .

Розглянуті можливі варіанти вибору частот, зокрема, передбачається, що частота f_{FT} вимірювання ємності матриці є вдвічі більшою чи вдвічі меншою за частоту f_{ST} випромінювання стилуса. Представлені паралельний та послідовний варіанти комутації полярності сигналів. Реалізація сигнального перетворювача здійснена на програмованій СнК PsoC (Cypress Semiconductor)

Література

1. Vu Tam; A. Baid.; S. Gao. Capacitive Touch Communication: A Technique to Input Data through Devices' Touch Screen // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2014. - Vol. 13. - Issue 1. - PP. 4 – 19.
2. Ik-Seok Yang, Oh-Kyong Kwon. A touch controller using differential sensing method for on-cell capacitive touch screen panel systems // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2011. - Vol.57. - Issue 3. - PP. 1027 – 1032.
3. S.-I. Yoshida, M. Hamaguchi, T. Morishita. An 87×49 mutual capacitance touch sensing IC enabling 0.5 mm-diameter stylus signal detection at 240 Hz-reporting-rate with palm rejection // 2014 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC). – 2014. - PP. 217 – 220.
4. Su-Min Park, Kwangyong Lee, Ki-Uk Kyung. A new stylus for touchscreen devices // 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). – 2011. – PP. 491 – 492.
5. A. Arasan. HaptiStylus: A Novel Stylus Capable of Displaying Movement and Rotational Torque Effects // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2015. – Vol. PP, Issue. 99. – P. 1.
6. Robert Ashby. Designer's Guide to the Cypress PSoC™. Elsevier Inc. – 2005. – 273 p.
7. Заявка на патент США № US20130207938. Active stylus to host data transmitting method. Andriy Ryshtun, Jeffrey Boschee, Viktor Kremin. Опубліковано 15.08.2013.