

О.О. Карпін, В.М. Сокіл, В.А. Ряжська \*

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних обчислювальних машин,  
\*кафедра обчислювальної математики і програмування

## АНАЛІЗ ЛІНІЙНОСТІ ТА РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СЕНСОРІВ СИЛИ

© Карпін О.О., Сокіл В.М., Ряжська В.А., 2010

Наведено результати аналізу лінійності та роздільної здатності наявних на ринку сенсорів сили провідних фірм-виробників (ІЕЕ, Interlink, Click Touch). Запропоновано схеми вимірювання сили на базі програмованої системи на кристалі (ПСнК) фірми Cypress. Наведено числові результати досліджень.

In this article the linearity and resolution analyzes of different force sensors presented on market (by IEE, Interlink, Click Touch, Algra) is represented. The different measuring schemes of such sensors with Cypress PSoC microcontrollers are designed and the tests results are shown.

**Постановка проблеми.** Сучасні тенденції побудови мобільних та інтелектуальних електронних приладів спрямовані на виділення нового продукту серед конкурентів шляхом розроблення та впровадження нових ідей та рішень. Одна з таких нових ідей пропонує використання сили дотику при взаємодії користувача та системи. Проте проблема ефективної реалізації цієї ідеї в мобільних електронних приладах залишається відкритою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** До 2007 року використання нових технологій у інтерфейсах користувача мобільних пристроїв було доволі обмеженим і мало лише дослідницький характер. Ці технології розвивалися у руслі побудови сенсорних кнопок, слайдерів та дисплеїв для детектування лише одного дотику. У 2007 році фірма Apple випустила мобільний телефон Apple iPhone, чим значно активізувала ринок мобільної техніки [1]. Провідні фірми-виробники мікроконтролерів, а саме Cypress, Analog Devices, Microchip, PE, Quantum, Omron, Freescale, Synaptics визначили напрямком мобільних технологій як один з найперспективніших [2–9].

**Постановка задачі.** У статті показано наявні на ринку сенсори сили та проаналізовано їх лінійність та роздільну здатність. Запропоновано схеми вимірювання сили на базі програмованої системи на кристалі (ПСнК) фірми Cypress. Наведено числові результати досліджень сенсорів провідних фірм виробників (ІЕЕ, Interlink, Click Touch).

### *Резистивні сенсори сили*

Резистивні сенсори сили (Resistive Force Sensors, FSR) представлено на ринку фірмами Interlink [10], IEE [11] та ClickTouch [12]. Типову конструкцію таких сенсорів сили (на прикладі фірм виробників Interlink та IEE) показано на рис. 1. Прикладена сила викликає деформацію верхнього шару сенсора. Це призводить до зміни механічного контакту (та опору відповідно) між напівпровідниковою основою та електродами.

Для однорідного поширення прикладеного зусилля крізь активну поверхню сенсора та забезпечення стійкого контакту між напівпровідниковою основою та електродами застосовується спеціальний шар для узгодження. Матеріал цього шару працює як пружина, отже, його деформація повинна бути непластичною. Залишкова деформація може спричинити зсув сигналу ненавантаженого сенсора,

ускладнюючи тим розрахунок визначення рівня сигналу. Тому матеріал шару для узгодження повинен мати лінійну (позбавлену пластичного гістерезису) залежність Деформації-Сили.

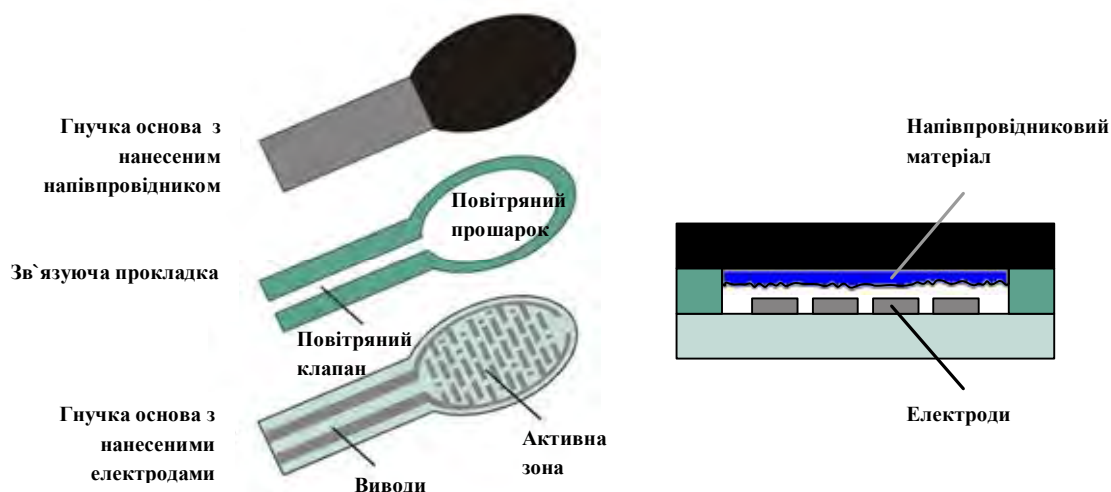


Рис. 1. Конструкція резистивних сенсорів сили фірм Interlink та IEE

Залежність прикладеної сили від опору для сенсорів фірм *Interlink* та *IEE* показано на рис. 2. Графік наведено в логарифмічному масштабі. Загалом у динамічному діапазоні малих навантажень опір сенсорів сили приблизно відповідає обернено пропорційній залежності:

$$R_f \sim \frac{1}{F}. \quad (1)$$

На рис. 3 показано залежність електропровідності від сили в діапазоні малих навантажень. Лінійність цієї залежності підтверджує вищенаведені твердження.

У динамічному діапазоні високих навантажень опір сенсорів сили змінюється від ступеневої залежності до певної точки насичення, коли збільшення навантаження спричиняє дуже малі (або повну відсутність) зменшення опору.

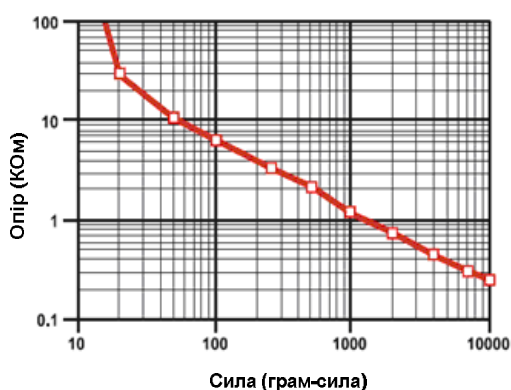


Рис. 2. Залежність Опору від Сили для сенсорів фірм Interlink та IEE

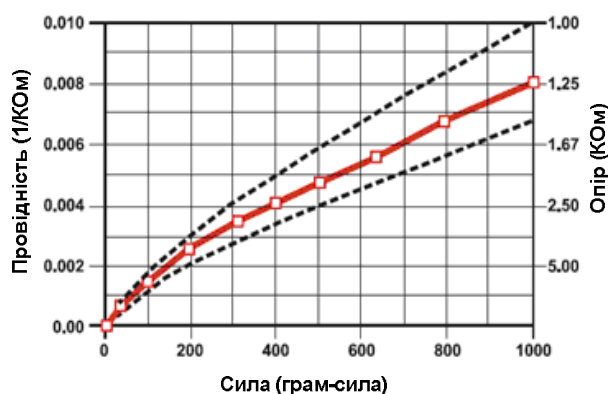


Рис.3. Залежність провідності від Сили для сенсорів фірм Interlink та IEE

Схему вимірювання сигналу на базі програмованої системи на кристалі (ПСнК) показано на рис. 4.

Схема передбачає використання для кожного сенсора одного пасивного елемента (резистора  $R_m$ ). Сигнал, що надходить на внутрішній підсилювач, описується формулами:

$$V = \frac{V_0}{R_f + R_m} R_m = \frac{V_0}{1 + \frac{R_f}{R_m}}. \quad (2)$$

$$\text{If } \frac{R_f}{R_m} \gg 1: V = \frac{V_0 R_m}{R_f} \sim F. \quad (3)$$

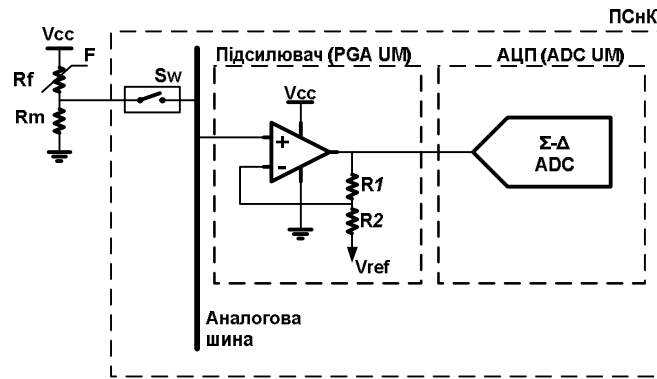


Рис. 4. Схема вимірювання напруги залежно від сили резистивних сенсорів сили

Залежності напруги від сили для запропонованої схеми з коефіцієнтом підсилення внутрішнього підсилювача, що дорівнює 1 та  $V_0 = V_{cc}$ , показано на рис. 5. Відповідно до формули (3) для менших значень  $R_m$  залежність стає більш лінійною. Проте,  $R_m$  одночасно працює і як обмежувач струму. Отже, значення  $R_m$  має обиратись відповідно до вимог лінійності, споживаної потужності та чутливості.

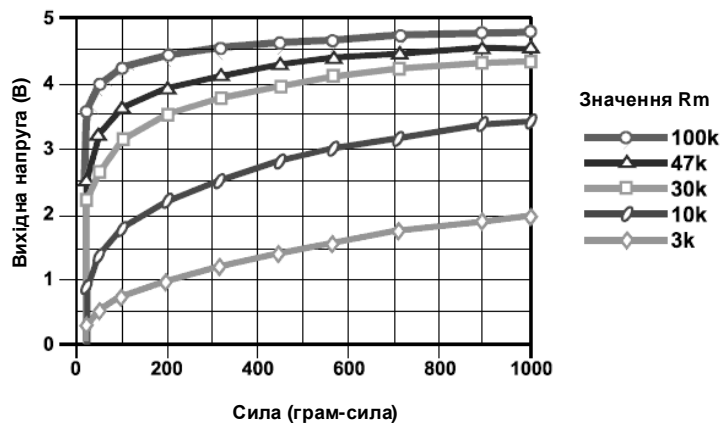


Рис. 5. Залежність напруги від сили для сенсорів фірм Interlink та IEE

Результати роботи запропонованого методу вимірювання з сенсорами сили ClickTouch, IEE та Interlink для рівномірно зростаючого навантаження показано на рис. 6 та 7. Для всіх типів сенсорів цей метод показує високу чутливість та малий час реакції. Роздільна здатність вимірювання прикладеного зусилля переважно залежить від розрядності АЦП. Аналіз результатів роботи дає змогу зробити такі висновки: сенсорами фірми ClickTouch виявляють наявність дотику, сенсори фірм IEE та Interlink придатні для визначення сили дотику.

Використання існуючої технології для роботи з ємнісними сенсорними дисплеями для вимірювання як взаємної ємності, так і прикладеної сили дає змогу значно спростити впровадження нової функціональності в мобільні пристрої. На рис. 8 показано під'єднання класичного резистивного сенсора сили до сигналів ліній передавача та приймача згідно з методом вимірювання взаємної ємності. На рис. 9 та 10 показано характеристики сенсорів сили ClickTouch, Interlink та IEE, отримані за допомогою такого методу.

На рис. 9 та 10 видно, що в початковій фазі дотику пальцем рівень сигналу збільшується. Цей ефект пояснюється зростанням  $C_{sg}$  сенсора сили. Однак, протягом наступної фази дотику опір сенсора істотно зменшується. Тобто провідність  $R_{sg}$  шунтує  $C_{sg}$ , що й призводить до зменшення струму перенесення заряду та зменшення рівня сигналу.

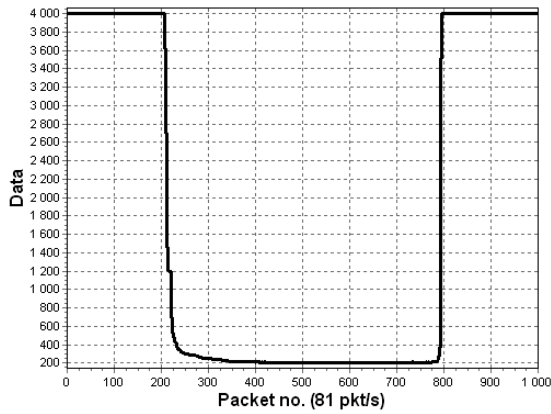


Рис. 6. Характеристика ClickTouch сенсорів сили (як резистора) для рівномірно зростаючого навантаження

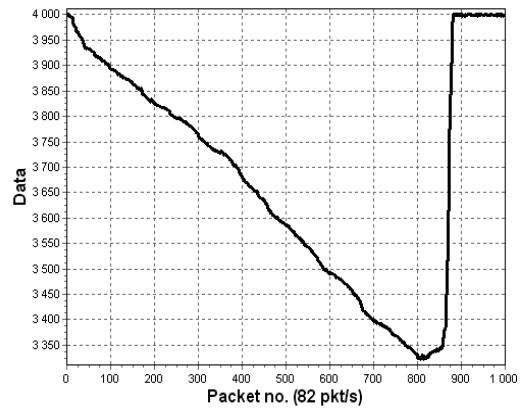


Рис. 7. Характеристика IEE та Interlink сенсорів сили (як резистора) для рівномірно зростаючого навантаження

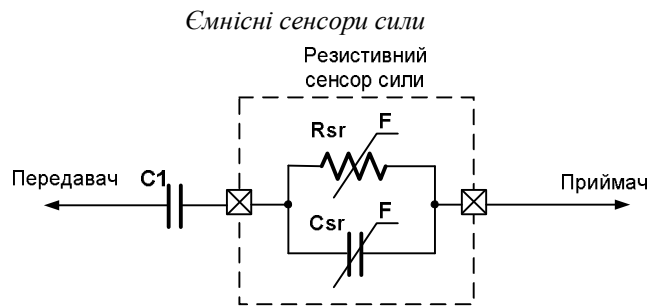


Рис. 8. Модель підключення сенсорів сили за методом вимірювання взаємної ємності ( $C1 = 10 \text{ pF}$ )

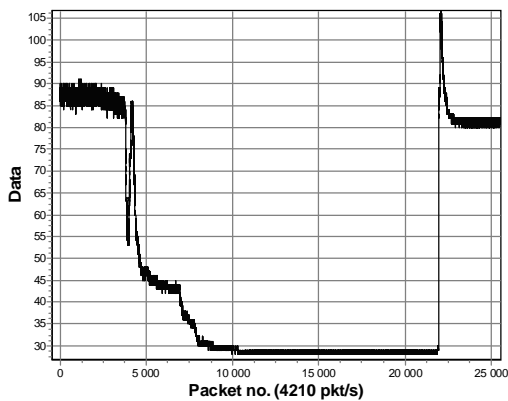


Рис. 9. Характеристика ClickTouch сенсорів сили (як конденсатора) для рівномірно зростаючого навантаження

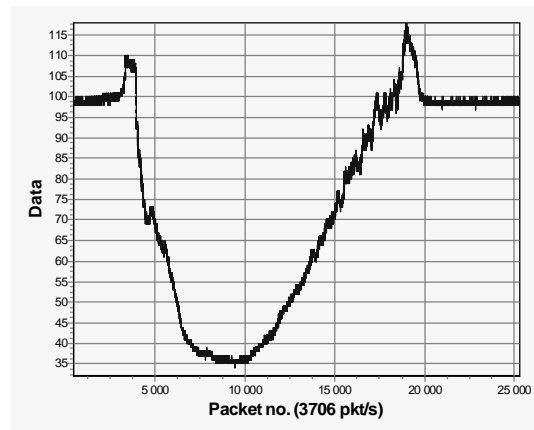


Рис. 10. Характеристика IEE та Interlink сенсорів сили (як конденсатора) для рівномірно зростаючого навантаження

Результати сенсорів фірми ClickTouch, отримані за допомогою двох різних методів вимірювання, показують, що через значну нелінійність характеристик ці сенсори працюють лише в ключовому режимі. А тому не відповідають вимогам до сенсорів, що можуть бути використані для вимірювання рівня навантаження.

Щодо технології побудови сенсорів IEE та Interlink, то їх лінійність є набагато кращою та вони дають змогу вимірювати відносний рівень навантаження з певною роздільною здатністю.

Також є можливість побудови класичних ємнісних сенсорів сили (рис. 11). Визначення сили дотику в таких сенсорах ґрунтується на вимірюванні взаємної ємності, що змінюється залежно від відстані електродів.

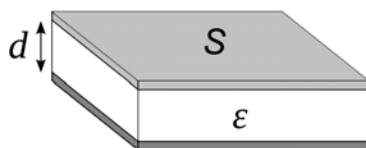


Рис. 11. Ємнісний сенсор сили

Ємність такого ємнісного сенсора сили описується формулою ємності плоского конденсатора. Ємність плоского конденсатора, яка складається з двох паралельних металічних пластин площиною  $S$  кожна, які розташовані на відстані  $d$  одна від однієї, в системі СІ виражається формулою (4):

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (4)$$

де  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища, яке заповнює простір між пластинами,  $\epsilon_0$  – електрична стала.

Залежність ємності від відстані для двох таких ємнісних сенсорів сили (розмірами 3 мм на 3 мм та 5 мм на 5 мм) показано на рис. 12.

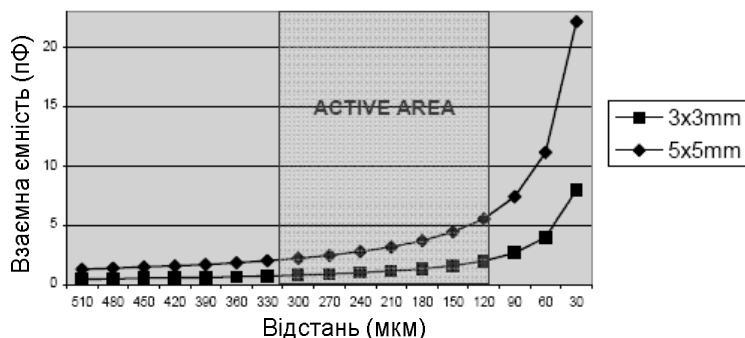


Рис. 12. Залежність ємності від відстані між електродами

Результати тестування такого ємнісного сенсора сили за допомогою методу вимірювання взаємної ємності CSX фірми Cypress [2] показано на рис. 13.

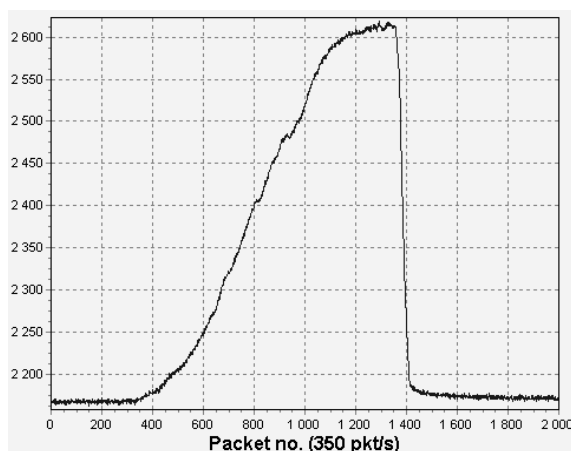


Рис. 13. Результати тестування ємнісного сенсора сили

З рис. 13 видно, що ємнісні сенсори сили мають лінійну залежність ємності від сили дотику та дають змогу вимірювати відносний рівень сили з певною роздільною здатністю. Тому для реалізації інтерфейсу користувача з використанням сили дотику можна використати резистивні сенсори сили фірм Interlink та IEE з вимірюванням опору та класичні ємнісні сенсори сили.

**Висновки.** Показано наявні на ринку сенсори сили та проведено аналіз їх лінійності та роздільної здатності. Запропоновано схеми вимірювання сили на базі програмованої системи на кристалі (ПСнК) фірми Cypress. Наведено числові результати досліджень сенсорів провідних фірм виробників (IEE, Interlink, Click Touch).

1. Apple website. <http://www.apple.com/iphone/>, 2010. 2. Cypress website. <http://www.cypress.com/capsense/>, 2010. 3. Analog Devices website. <http://www.analog.com>, 2010. 4. Introducing to mTouch Capacitive Touch Sensing. Microchip website. <http://techtrain.microchip.com>, 2010. 5. PE website. <http://www.pe-icdesign.de>, 2010. 6. QMatrix Technology White Paper, Quantum & Atmel, Quantum <http://data.qprox.com>, 2010. 7. Omron website, <http://www.omron.co.jp>, 2010. 8. Touch Panel System Using MC34940/MC33794 E-Field Sensors, Freescale Semiconductor, [www.freescale.com](http://www.freescale.com), 2010. 9. Synaptics website, <http://www.synaptics.com/technology>, 2010. 10. Interlink Electronics, Sensor Technologies, <http://www.interlinkelec.com>, 2010. 11. IEE, A Sense for Innovation, <http://www.iee.lu>, 2010. 12. ClickTouch, <http://www.clicktouch.be>, 2010.

УДК 681.31

М.М. Касянчук, Я.М. Николайчук, І.З. Якименко

Інститут проблемно-орієнтованих комп'ютерних систем КД ЦІЗІТ НАН України

## ТЕОРІЯ АЛГОРИТМІВ ПЕРЕТВОРЕНЬ КИТАЙСЬКОЇ ТЕОРЕМИ ПРО ЗАЛИШКИ В МАТРИЧНО-РОЗМЕЖОВАНОМУ БАЗИСІ РАДЕМАХЕРА-КРЕСТЕНСОНА

© Касянчук М.М., Николайчук Я.М., Якименко І.З., 2010

Описано принципово новий метод виконання перетворень при застосуванні Китайської теореми про залишки та пошуку оберненого елемента, уникаючи громіздких операцій ділення з остачею, факторизації та піднесення до степеня багаторозрядних чисел. Здійснено порівняльний аналіз обчислювальних складностей класичного та запропонованого алгоритмів.

The paper describes crucially new method due to performance of transformation under the implementation of Chinese reminder theorem and inverse elements finding, without the bulky operations of division with remainder, factorization and exponentiation of multibit numbers. The comparative analysis of computational complexity of classical and the proposed algorithms was performed.

**Вступ.** Перетворення Китайської теореми про залишки (КТЗ) [1] є фундаментальною основою вирішення широкого класу задач теорії чисел, а також прикладних задач інженерії та інформатики.

Незважаючи на свою простоту та древню історію, КТЗ продовжує представляти себе у новому світлі і відкривати нові перспективи свого застосування, особливо у математиці, інформатиці (машинна арифметика) [2], криптографії [3] тощо. Побудова непозиційної системи