

З.Ю. Готра^{1,2}, Р.Л. Голяка¹, М.Р. Гладун¹, В.Є. Єрашок¹, І.І. Гельжинський¹¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних приладів² Жешувська політехніка,
кафедра електронних систем і телекомунікації

КОНТРОЛЕР ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ

© Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Гладун М.Р., Єрашок В.Є., Гельжинський І.І., 2006

Нові методи вимірювального перетворення та нове покоління спеціалізованих твердотільних інтегральних схем (ІС), які були розроблені в останні роки, зумовили кардинальні зміни в сенсорній техніці на основі ємнісних первинних перетворювачів. Наведено результати розроблення контролера ємнісних сенсорів на основі безпосереднього перетворення ємності с сенсора у цифровий код. Контролер реалізовано на сигма-дельта модуляторі “ємність – цифровий код”, який є основою анонсованих в 2005 році серії спеціалізованих інтегральних схем AD77XX (Analog Devices, США). За своїми функціональними параметрами – висока точність вимірювання та завадостійкість, термокомпенсація функції перетворення, універсальний шинний цифровий інтерфейс, мінімальне енергоспоживання та габарити тощо, розроблений контролер відповідає вимогам інтелектуальних сенсорних пристроїв.

New methods of measurement conversion and new generation of specialized solid-state integrated circuits (IC), that were designed during last few years, cause huge changes in measurement equipment based on capacitance primary transducers. We present the result of design of special capacitance sensor controller which is based on direct conversion of capacitance to digital code. The controller is realized on the Σ - Δ capacitance-to-digital modulator, which is the base for announced in 2005 specialized integrated circuits AD77XX (Analog Devices, USA). Granting controller operational parameters such as high accuracy and noise immunity, thermal compensation of transfer function, universal serial interface, low energy consumption and small dimensions we can state that designed controller meets the requirements to intelligent sensor devices.

Вступ та аналіз проблеми

Унікальною особливістю ємнісних сенсорів є їхня універсальність; а саме: можливість застосування ємнісних структур як первинних перетворювачів практично у всіх сферах сенсорної техніки, а також, їх висока надійність та дешевизна. Серед таких сфер – сенсори просторового положення об’єктів, сенсори рівня, сенсори дотику, сенсори тиску, сенсори вологості, хімічні сенсори тощо. Однак доволі складна схемна реалізація вторинних перетворювачів “ємність – нормалізований сигнал”, тенденція до зменшення величин вимірювальних ємностей [1] та вимоги сучасної електроніки до мінімізації потужності споживання, спричиняють певні проблеми під час розроблення ємнісних сенсорних пристроїв.

Зокрема простий розрахунок перехідного процесу заряду приросту ємності $\Delta C = 0,1$ пФ (0.1% від ємності сенсора $C = 100$ пФ) при омичному опорі кола заряду $R = 10$ МОм (максимально можливе значення з погляду реальних значень струмів просочування на друкованих платах чи роз’ємах), дає часову сталу $\tau = RC = 1$ мкс. Для безпосереднього вимірювання таких швидкоплинних процесів необхідно використати аналого-цифрові перетворювачі з смугою частот понад 1 МГц. Є очевидним, що таке вирішення проблеми не можна вважати доцільним, адже ціни широко-смугових аналого-цифрових перетворювачів є надто високими для їх використання в масових сенсорних пристроях.

Отже, під час розроблення сучасних ємнісних сенсорних пристроїв особливої актуальності набувають спеціалізовані вторинні перетворювачі [2], які відповідають вимогам високотехнологічної електроніки масового застосування.

Аналізуючи проблему вторинного перетворення сигналу сенсорів ємнісного типу, можна відзначити, принаймні, три основні методи вимірювання. Перший метод базується на вимірюванні імпедансу ємності на певній фіксованій частоті, або на декількох фіксованих частотах. Другий метод передбачає вимірювання часу заряду ємності при заданому струмі заряду, наприклад в найпростішому випадку – вимірювання часових параметрів $R_T C_X$ кола, де C_X – вимірювальна ємність первинного перетворювача, R_T – струмозадаючий резистор. Третій метод, який останнім часом набуває все поширенішого розповсюдження, базується на вимірюванні заряду, який нагромаджується на ємності при її періодичній комутації до джерела фіксованої напруги. Кожний з перерахованих методів може мати різноманітні модифікації, наприклад, можна відзначити компенсаційні, мостові чи компенсаційно-мостові вимірювання [2, 3]. У багатьох сучасних вимірювальних перетворювачах, і особливо з мікропроцесорним керуванням, інформаційним сигналом вторинного перетворювача ємнісного сенсора є тривалість періодичних імпульсів, щільність чи кількість імпульсів за одиницю часу [4, 5].

Всі вище вказані методи постійно розвиваються, що обумовлюється підвищенням вимог до точності вимірювання, мінімізацією енергоспоживання, мініатюризацією сенсорних пристроїв тощо. Найвищим ступенем розвитку сучасної сенсорної техніки стали інтелектуальні сенсори, визначальними характеристиками яких є самодіагностика, термостабілізація, автоматичний вибір функції перетворення тощо [6]. Критеріями оптимального розв'язання задачі необхідно вважати: по-перше, мінімальні структурні затрати вторинного перетворювача, по-друге, його функціонування при низьковольтних однополярних джерелах живлення, і по-третє, узгодженість параметрів вторинного перетворювача з мікропроцесорною технікою.

У статті описані результати розроблення контролера ємнісних сенсорів на основі безпосереднього перетворення ємності сенсора у цифровий код. Контролер реалізовано на сигма-дельта модуляторі “ємність – цифровий код”, який є основою анонованих в 2005 році серії спеціалізованих інтегральних схем (IC) AD77XX, Analog Devices (США). За своїми функціональними параметрами – висока точність вимірювання та завадостійкість, термокомпенсація функції перетворення, універсальний шинний цифровий інтерфейс, мінімальне енергоспоживання та габарити тощо, розроблений контролер відповідає вимогам інтелектуальних сенсорних пристроїв.

Принцип вимірювального перетворення

В основі сигма-дельта модулятора “ємність – цифровий код” лежить вторинний перетворювач на інтеграторі заряду. З метою спрощення пояснення принципу вимірювального перетворення є доцільним спочатку розглянути та проаналізувати елементарну схему, яка реалізує інтегрування заряду вимірювальної ємності C_X . Така схема зображена на рис. 1.

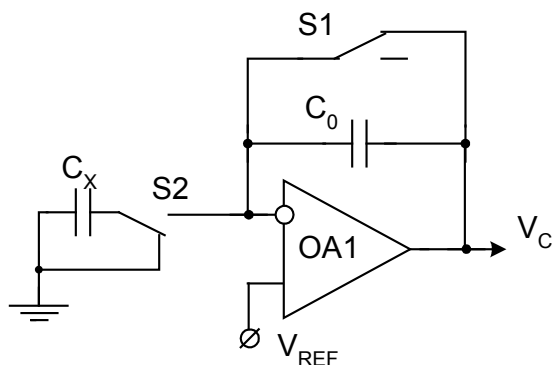


Рис. 1. Елементарна схема інтегратора заряду

Проблемою вимірювання малих ємностей є швидкоплинність процесу їх заряду, що не дає змоги використати безпосереднє аналого-цифрове перетворення сигналу. Цю проблему вирішують схемним рішенням, яке дає можливість виділити нагромаджений на вимірювальному конденсаторі C_X заряд Q та зберегти величину цього заряду у вигляді напруги V_{C0} на інтегруючому конденсаторі C_0 кола зворотного зв'язку операційного підсилювача. У початковому стані обидва конденсатори – вимірювальний C_X та інтегруючий C_0 , – є розрядженими. Цей стан забезпечується відповідним станом ключів $S1$ та $S2$ (як показано на рис. 1). Крім того, замкнений стан ключа $S1$ забезпечує функціонування операційного підсилювача $OA1$ в режимі повторювача напруги. Враховуючи, що на неінвертуючий вхід $OA1$ подано опорну напругу V_{REF} , на інвертуючому вході $OA1$ та на його виході формується те саме значення опорної напруги. Це значення напруги в першому наближенні можна вважати за нульовий рівень корисного сигналу ($C_X = 0$).

Перед початком вимірювання ключ $S1$ розмикають. Далі, після короткої затримки на перехідні процеси схеми (декілька мікросекунд), перемикають ключ $S2$, який під'єднує вимірювальний конденсатор до інвертуючого входу $OA1$. Враховуючи, що на цьому вході формується напруга, близька до опорної V_{REF} , а вхідний струм операційного підсилювача практично дорівнює нулю, можна записати

$$Q = \int I(t)dt = C_X V_{REF} = C_0 V_{C0}; \quad V_C = V_{C0} + V_{REF}.$$

Отже, вихідна напруга інтегратора становить

$$V_C = V_{REF} \left(\frac{C_X}{C_0} + 1 \right)$$

і залежить лише від опорної напруги V_{REF} та співвідношення між вимірювальною C_X та інтегруючою C_0 ємностями.

Приклад результатів моделювання перехідних процесів вихідної напруги операційного підсилювача інтегратора заряду показано на рис. 2. Детальну інформацію про принципи реалізації вторинних перетворювачів на основі інтеграторів заряду та поєднання цих інтеграторів з мікроконтролерами [7] наведено в роботах [8, 9].

Сигма-дельта перетворювач “ємність – цифровий код”

Принцип сигма-дельта перетворення вже багато років успішно застосовують в інтегральних схемах аналого-цифрового перетворення з високою роздільною здатністю. Популярність цього принципу перетворення зумовила його поширення і на вторинні перетворювачі ємнісного типу, які формують цифровий код без традиційного попереднього формування аналогового сигналу. Як це вище було відзначено, в 2005 році лідер ринку інтегральних схем для високоякісних вимірювальних та сенсорних пристроїв – компанія Analog Devices (США) анонсувала нову серію спеціалізованих інтегральних схем AD77XX на принципі сигма-дельта модулятора “ємність – цифровий код”.

Спрощена блок-схема сигма-дельта модулятора, в яку входять конденсатори C_{IN} і C_{REF} , інтегратор, компаратор, задаючий генератор (зокрема, для формування напруги актуації), джерело опорної напруги, ключі та цифровий фільтр, показана на рис. 3. Конденсатори C_{IN} і C_{REF} періодично перемикаються між входом сигналу і джерелом опорної напруги V_{IN} і V_{REF} , і вони “накачують” заряд інтегратора C_{INT} . Компаратор контролює рівень сигналу на виході інтегратора і управляє фазою перемикання вхідного ключа, замикаючи петлю зворотного зв'язку і, отже, компенсуючи заряди, що протікають через сигнальне (V_{IN}) і опорне (V_{REF}) кола. Однобітовий потік нулів і одиниць на виході компаратора змінюється відповідно до величини заряду, необхідного для балансування кола. Цей заряд пропорційний напрузі і ємності. Щільність імпульсів (кількість одиничних імпульсів в однобітовому потоці) відповідає співвідношенню напруг на сигнальному вході (V_{IN}) і на вході опорної напруги (V_{REF}). Далі, цифровий фільтр обробляє цей однобітовий потік даних і формує результат перетворення в цифровому вигляді.

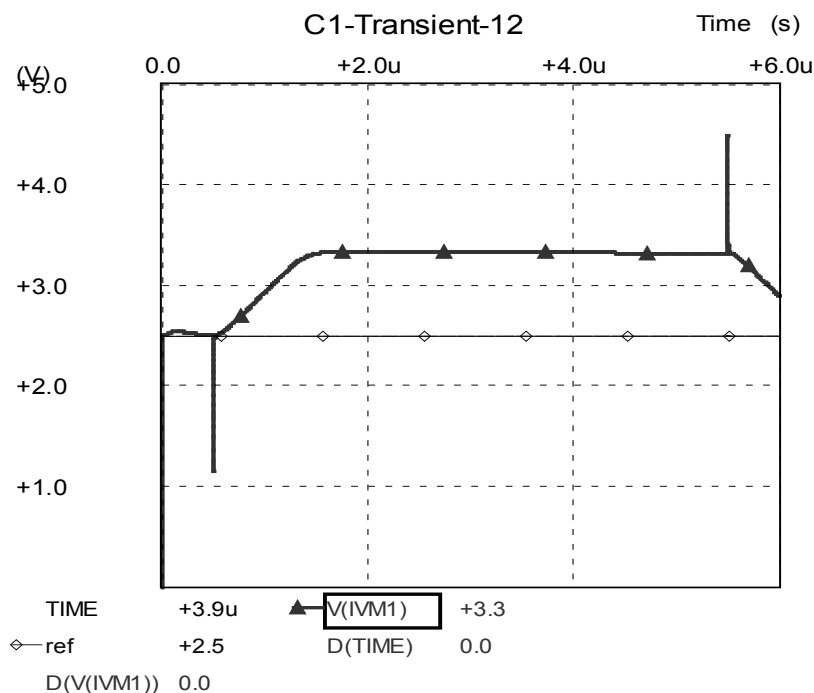


Рис. 2. Перехідні процеси вихідної напруги ОА при $C_X = 10 \text{ pF}$

У традиційних сигма-дельта аналого-цифрових перетворювачах відбувається перемикання конденсаторів фіксованої величини і за рахунок цього досягається зрівнювання заряду між змінним сигналом на аналоговому вході і постійним сигналом джерела опорної напруги. Враховуючи, що заряд пропорційний напрузі і ємності, то фіксує значення опорної напруги, видається можливим вимірювати ємність. Цей новий підхід дозволяє здійснити пряме під'єднання ємнісного сенсора до сигма-дельта перетворювача, що забезпечує такі переваги, як висока роздільна здатність, точність і лінійність.

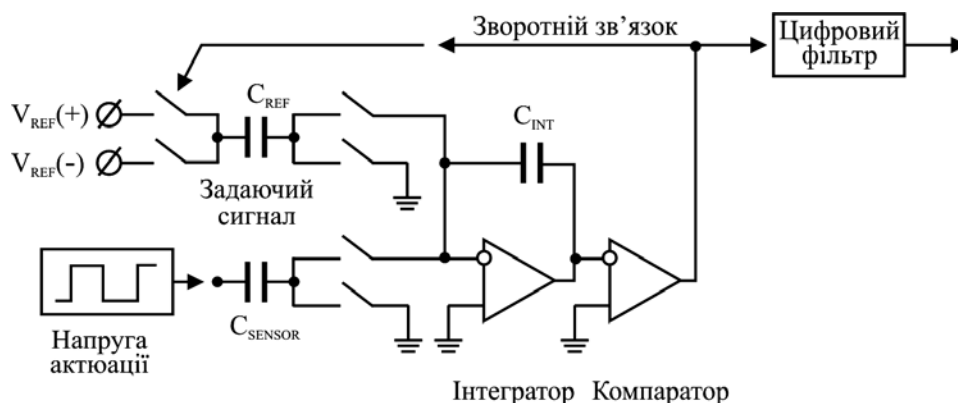


Рис. 3. Сигма-дельта перетворювач в схемі вимірювача ємності

ІС AD7745 має один вхідний канал, тоді як AD7746 має два канали. Кожний канал може бути сконфігурований для отримання звичайного (несиметричного) або диференційного сигналу. ІС мають вбудований сенсор температури з роздільною здатністю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ і точністю $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Вбудоване джерело опорної напруги і вбудований генератор тактових імпульсів усувають необхідність додаткового під'єднання інших зовнішніх компонент для вимірювання ємності. ІС AD7745/AD7746 мають ΓC -сумісний серійний інтерфейс і працюють з напругою живлення від 2,7 до 5,25 В.

Схема інтелектуального контролера та його параметри

Контролер, блок-схема якого показана на рис. 4, реалізовано на ІС AD7745. У склад ІС входять: CAP DAC – перетворювач цифрового коду у еквівалентну ємність; MUX – мультиплексор;

EXCITATION – генератор напруги актюації; Σ - Δ MODULATOR – сигма-дельта модулятор; CLOCK GENERATOR – задаючий генератор; TEMP SENSOR – сенсор температури; DIGITAL FILTER – цифровий фільтр; VOLTAGE REFERENCE – опорна напруга; CONTROL LOGIC CALIBRATION – вузол логічно-керуваного калібрування; HOST SYSTEM – мікроконтролер ведучої системи та I²C SERIAL INTERFACE – двонапрямлений послідовний інтерфейс, який передає дані по шині SDA та синхронізується по шині SCL. Зовнішній вигляд плати налагодження контролера EVAL–AD7745/46EB показано на рис. 5.

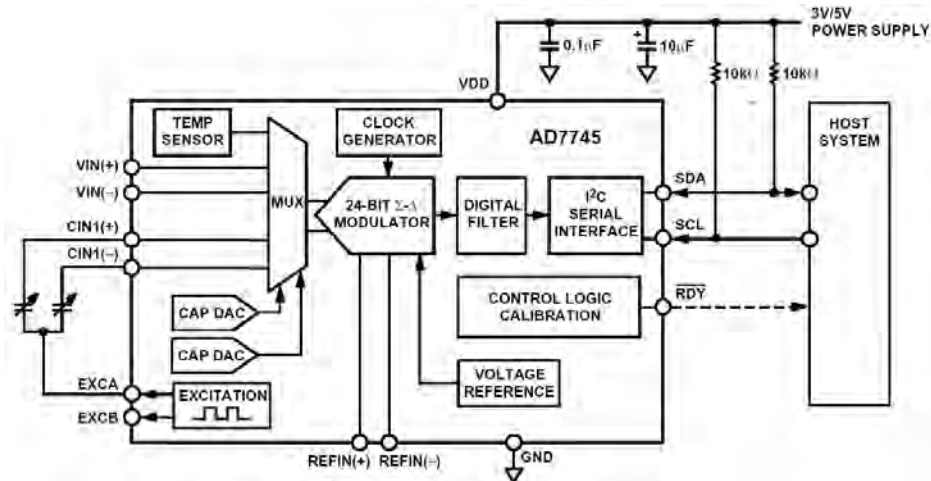


Рис. 4. Блок схема ІС контролера

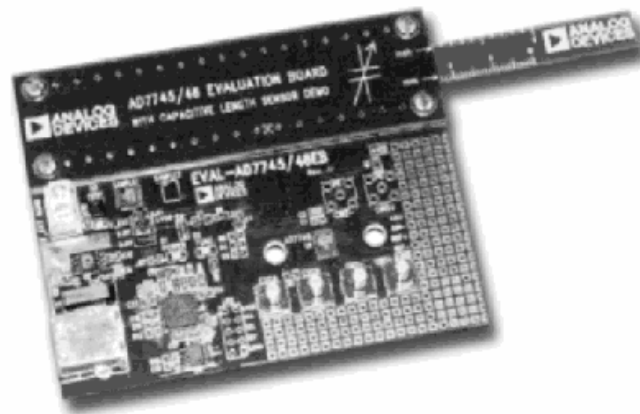


Рис. 5. Зовнішній вигляд плати налагодження EVAL–AD7745/46EB

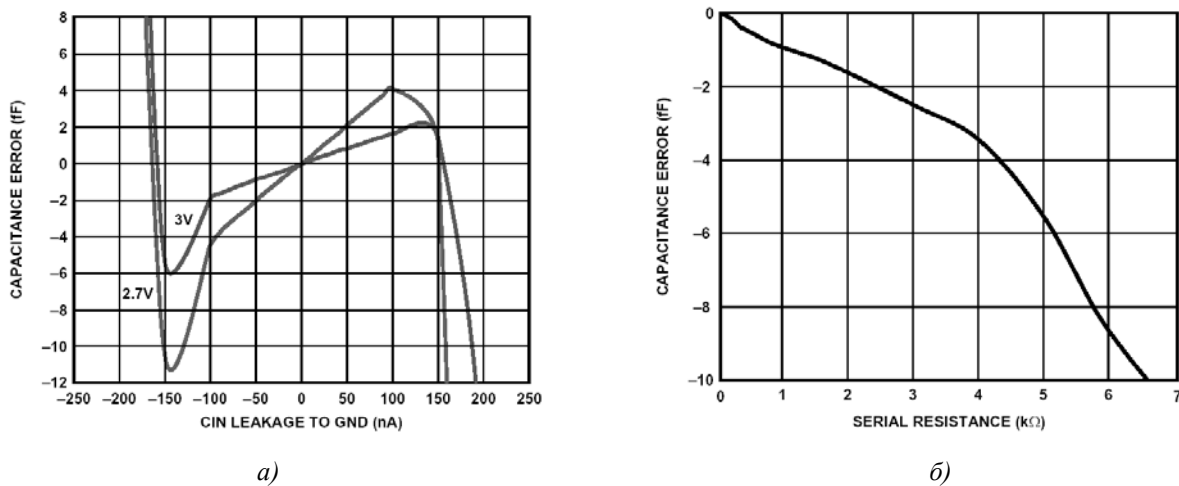


Рис. 6. Вплив добротності кола ємності на точність вимірювання

З метою налагодження I²C інтерфейсу та керування контролером було розроблено програмне забезпечення, основне робоче вікно якого показано на рис. 7. За допомогою лівої панелі робочого вікна проводиться керування ємнісним контролером, а на правій панелі в графічній формі візуалізуються результати вимірювання.

Під час проведених тестувань параметрів розробленого ємнісного контролера, як це видно з наведеного графіка, спостерігається реальна роздільна здатність вимірювання не гірше 0,0005 пФ, що, принаймні, в 10 разів краще, ніж в існуючих в теперішній час комерційно доступних пристроях вимірювання ємності.

Висновки

Наведено результати розроблення контролера ємнісних сенсорів на основі безпосереднього перетворення ємності с сенсора у цифровий код. Контролер реалізовано на сигма-дельта модуляторі “ємність – цифровий код” AD7745, Analog Devices (США). За своїми функціональними параметрами – висока точність вимірювання (роздільна здатність вимірювання – не гірше 0,0005 пФ), термокомпенсація функції перетворення (інтегрований сенсор температури), універсальний I²C шинний цифровий інтерфейс, мінімальне енергоспоживання та габарити тощо, розроблений контролер відповідає вимогам інтелектуальних сенсорних пристроїв.

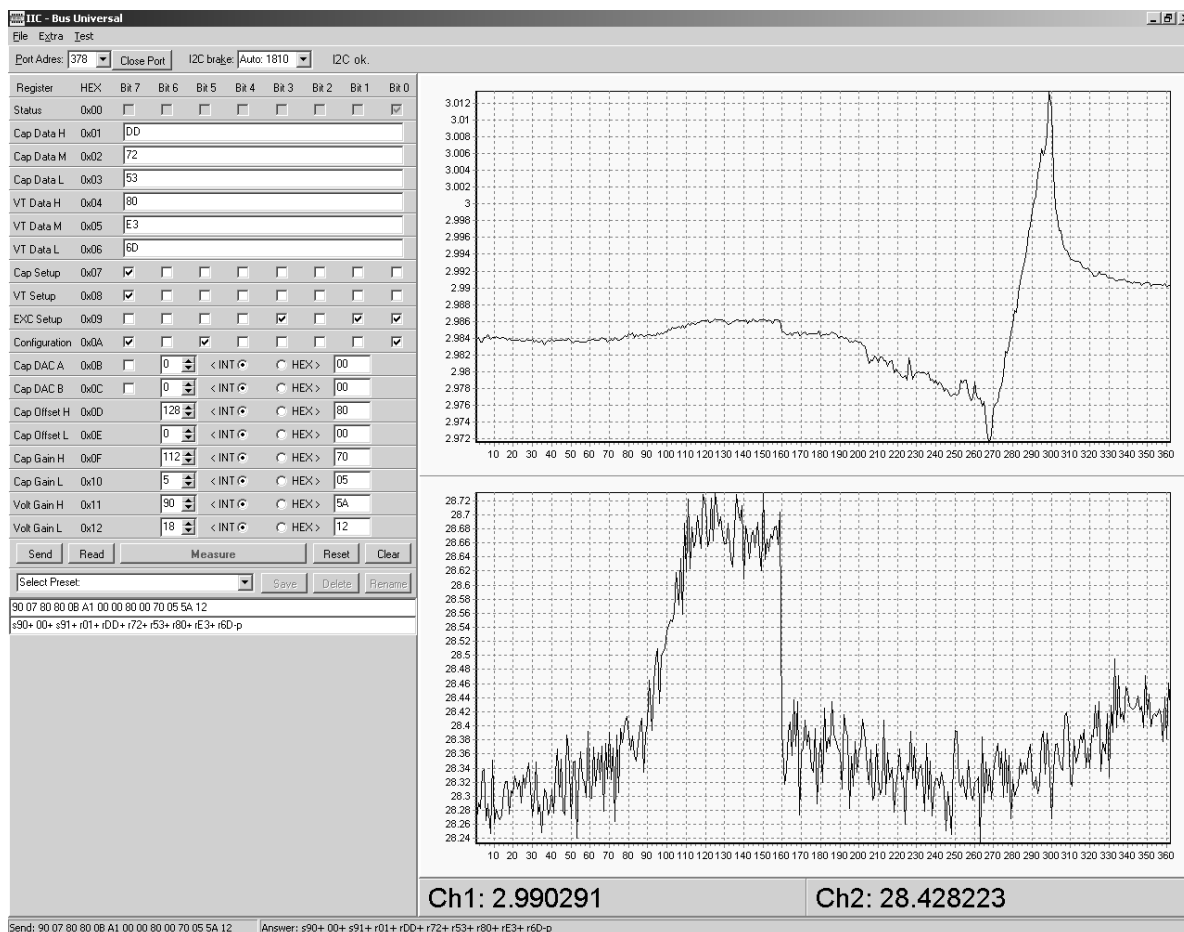


Рис. 7. Робоче вікно програмного забезпечення керування ємнісним контролером

1. Qiu Y., Azeredo Leme C., Franca J. E. CMOS Humidity sensor with calibrated voltage output. The 14 European Conference on Solid-State Transducers, Copenhagen, Denmark. August 27–30, 2000. – P. 75–78.
2. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. З.Готри, Р.Голяки, –Львів: Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1999. 364 с.
3. Осадчий Е.П., Арбузов В.П., Ларкин С.Е. Преобразователь емкости датчика в напряжение // Приборы и системы управления. –1995. –№1. С. 22–25.

4. Вудуард С. Прецизионный емкостной сенсор // *Электроника*. – 1993. – №3. – С. 74–75.
5. Гутников В.С, Соловьев А.Л, К.В. Рудаков, Ульянов В.А. Измерительная система для емкостных датчиков // *Приборы и системы управления*. – 1991. – №5. – С. 24–26.
6. Brignell J., While N. *Intelligent Sensor System*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. IOP Publishing. –1996.
7. MicroConverter[®], Multichannel 12-Bit ADC with Embedded Flash MCU. Analog Devices, Inc. 2001. <http://www.analog.com>.
8. Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Єрашок В.Е., Мельник О.М., Прошак Д. Контролер мікроелектронного інтелектуального сенсора вологості ємнісного типу // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. Елементи теорії та прилади твердотілої електроніки. –№512. –2004. –С. 61–70.
9. Голяка Р.Л., Мельник О.М., Гельжинський І.І. Компенсація паразитного впливу лінії передачі сигналу в мікроелектронних сенсорах ємнісного типу // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. Елементи теорії та прилади твердотілої електроніки. –№512. –2004. –С. 71–78.

УДК 534.6

А.О. Новікова

Херсонський національний технічний університет,
кафедра фізичної та біомедичної електроніки

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВЕЛИЧИНИ ПРИТИСНЕННЯ ОПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФІЇ ДО ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПОВЕРХНІ

© Новікова А.О., 2006

Визначено оптимальне значення притиснення оптичного перетворювача до поверхні шкіри для отримання інформативного показника фотоплетизмографії, яке дорівнює $0,5 \text{ кг/см}^2$. За такого навантаження не спостерігається фізичних змін у сосочковому шарі дерми і не порушується мікроциркуляція крові на ділянці контакту.

The optimal meaning of transducer pressing to a skin's surface for obtain informational photoplatizmografical index was determined, that equal 0.5 kg/sm^2 . In this lading a physical variations aren't observed in the nipple's layer of a derma and a blood microcirculation on the section of a contact isn't raised.

Оптичні методи набули поширеного розвитку в сучасній медицині [1]. Важливим у застосуванні оптичних методів діагностики, зокрема методу фотоплетизмографії, під час вимірювання гемодинамічних параметрів біологічного об'єкта є ступінь притискання фотоперетворювача до поверхні шкіри, що може впливати на тиск у судині. Невизначеність ступеня притискання може призводити до спотворень результатів вимірювань, що утруднює отримання інформативного показника фотоплетизмографії і, тим самим, знижує достовірність діагностики. Внаслідок недостатнього вивчення цього питання практично відсутні рекомендації щодо вибору притискового навантаження, що створює певну проблему під час застосування методу фотоплетизмографії. Тому для одержання інформативних фотоплетизмограм (ФПГ) виникає потреба досліджень щодо визначення оптимального навантаження на поверхню шкіри, що створює фотоперетворювач у місці вимірювання. У цій роботі пропонується один з можливих способів вирішення цієї проблеми.

Фотоперетворювач являє собою оптоелектронну пару, що складається з джерела світла видимого діапазону та фотоприймача (фотодіода) з регульованою системою притискання і закріплюється на руці. Світловий потік при проходженні через тканини пальця циклічно змінюється відповідно до пульсації крові і після відбиття потрапляє на фотодіод. Посилений підсилювачем сигнал від фотодіода записується самописцем. Швидкість руху стрічки самописця і величина каліб-