

ЗАВАДОСТІЙКИЙ СИГНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА БАЗІ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА

© Зенон Готра¹, Роман Голяка¹, Олександра Готра², Ігор Гельжинський³, Тетяна Марусенкова¹, 2010

¹Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра електронних приладів,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

²Львівський національний медичний університет ім. Д. Галицького, кафедра медичної інформатики,
вул. Пекарська, 69, 79010, Львів, Україна

³Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра техногенно-екологічної безпеки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглянуто принципи побудови сигнальних перетворювачів на базі синхронного детектора, що характеризуються високою завадостійкістю та відповідають вимогам до сучасної низьковольтної електроніки. Висвітлено принцип роботи синхронного детектора, математичний опис та результати модельного дослідження вузлів його схеми. На прикладі результатів експериментальних досліджень продемонстровано ефективність придушення завад.

Рассмотрены принципы построения сигнальных преобразователей на основе синхронного детектора, которые характеризуются высокой помехоустойчивостью и соответствуют требованиям современной низковольтной электроники. Представлены принцип работы синхронного детектора, математическое описание и результаты модельного исследования узлов его схемы. На примере результатов экспериментальных исследований продемонстрирована эффективность подавления помех.

The work considers design principles of signal transducers based on the synchronized detector which have high noise-immunity and meet requirements of modern low-voltage electronics. There are presented the principle of operation of the synchronized detector, the mathematical formulation and the results of its circuit nodes modeling. The experimental investigation results given in this work show the noise suppression effectiveness.

Вступ. Створення високопрецизійної вимірювальної та сенсорної техніки ставить задачу подальшого підвищення параметрів сигнальних перетворювачів [1]. Крім традиційних для сучасних мікропроцесорних пристроїв задач аналого-цифрового перетворення, цифрового фільтрування, компресії тощо, значну актуальність мають сигнальні перетворювачі попереднього аналогового оброблення сигналу. Саме від їхньої якості залежать такі параметри, як завадостійкість, рівень шумів та динамічний діапазон [2, 3].

Відповідно до тенденції розвитку електронної апаратури важливими вимогами до сигнальних перетворювачів є можливість функціонування з низьковольтними однополярними джерелами живлення (3 В і нижче), rail-to-rail режим роботи, мікропотужне споживання, висока завадостійкість тощо [4].

Одним з найефективніших способів забезпечення високої завадостійкості є синхронне детектування сигналу. Таке детектування сигналу дає змогу істотно

зменшити рівень електромагнітних завад, зокрема, зумовлених мережею енергоживлення 50 Гц, випромінюванням радіопристроїв, синфазними завадами, що виникають в довгих лініях зв'язку. Основними областями застосування завадостійких сигнальних перетворювачів на принципі синхронного детектування є: системи моніторингу магнітного поля в екстремальних умовах експлуатації [5], вібраційні магнітометри, тензометричні перетворювачі, системи просторового моніторингу на основі електромагнітних перетворювачів, інтелектуальні сенсори з функцією in-situ самокалібрування тощо.

Мета роботи. Virішено проблему розроблення сигнального перетворювача, що відповідає вимогам сучасної електроніки – однополярного низьковольтного живлення, rail-to-rail режиму роботи, низького енергоспоживання, а також забезпечує високий рівень придушення електромагнітних завад. Завадостійкість

перетворювача базується на синхронному детектуванні сигналу. Для реалізації сигнального перетворювача передбачається використання новітньої елементної бази – мікропотужних rail-to-rail операційних підсилювачів [6], CMOS двонаправлених низькоомних аналогових ключів [7] з цифровим керуванням та мікроконвертерів [8], що інтегрують високоякісні аналого-цифрові перетворювачі та мікропроцесори подальшого цифрового перетворення сигналу.

Принцип перетворення. Принцип синхронного детектування доволі широко застосовують в сучасній техніці завадостійкого сигнального перетворення. Для його реалізації формують змінний в часі задавальний сигнал $U_0(t)$, що модулює струм живлення, зокрема, сенсора Холла, тензометричного моста чи актуаторної антени, а вхідний сигнал $U_C(t)$ сигнального перетворювача, що формується на виході сенсорів, перемножують зі знакокореляційною функцією. В загальному випадку таке перетворення можна записати у вигляді $U_S(t) = U_C(t) \cdot A(t)$, де $U_S(t)$ – знакокореляційна функція; $U_C(t)$ – вхідний сигнал (суміш корисного сигналу та завад); $A(t)$ – знакова функція, яка набуває значення $A(t) = +1$ за додатного значення задаючого сигналу $U_0(t) > 0$ та $A(t) = -1$ за від'ємного значення задаючого сигналу $U_0(t) < 0$.

Принципово важливим є формування знакової функції $A(t)$ задаючим (модулюючим) сигналом $U_0(t)$, а не сигналом $U_C(t)$, що приходить на вхід синхронного детектора. Наявність у вхідному сигналі завад є причиною нестабільності переходу сигналу через нульове значення, що приводить до спотворення знакової функції і, як наслідок, погіршує якість синхронного детектування.

Сигнал з виходу синхронного детектора подають на інтегратор або низькочастотний фільтр. Паразитна складова сигналу (завада), знак якої кожний півперіод модулюючого сигналу змінюється, на виході інтегратора прямує до нуля. На противагу цьому, корисна складова сигналу, знак якої є незмінним, накопичується. Процес накопичення залежить від типу інтегратора або фільтра низьких частот. Час накопичення в цьому разі визначається характеристичним часом встановлення фільтра. Здебільшого, саме цей час

визначає тривалість якісного виділення сигналу вимірювального перетворювача.

На рис. 1 наведено приклади застосування принципу синхронного детектування в ряді сенсорних пристроїв, зокрема, у пристроях вимірювання індукції магнітного поля на елементах Холла HG (а), перетворювачах мостового типу $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, R_{S4}$ (б), електромагнітних детекторах просторового руху на поєднанні актуаторної AA та сенсорної SA рамкових антен (в). Для всіх цих пристроїв використовується живлення сенсора чи актуатора джерелом змінної напруги (струму) SV, задаючий сигнал яких використовується для формування керуючих імпульсів синхронного детектора. Такий підхід дає змогу ефективно придушувати сторонні завади, частота та фаза яких не збігається з частотою та фазою задаючого сигналу.

Математичний аналіз. Приклад опису математичної моделі синхронного детектування та результатів її аналізу наведено на рис. 2. Прийнято такі позначення: U_a, f_a – амплітуда та частота корисного сигналу (фаза корисного сигналу вважається нульовою); U_b, f_b, t_z – амплітуда, частота та фаза гармонічної завади; U_z – постійна складова завади; $U_s(t)$ – знакокореляційна функція; $U_o(t)$ – модулюючий сигнал; $U_c(t)$ – вхідний сигнал; $A(t)$ – знакова функція; $O(t)$ – інтеграл модулюючого сигналу, значення якого використовується для нормування результату синхронного детектування; $S(t)$ – нормоване значення інтеграла знакокореляційної функції, яке є кількісною оцінкою якості синхронного детектування (у разі ідеального детектування це значення повинно дорівнювати амплітуді корисного сигналу $S(t) = U_a$).

Для прикладу прийнято: амплітуда корисного сигналу $U_a = 0.1$ (умовних одиниць, наприклад – mV), гармонічна завада частотою $f_b = 50$ Hz та амплітудою $U_b = 3$, постійна складова завади $U_z = 2$ (сумарний рівень завади $U_b + U_z$ в 50 разів перевищує корисний сигнал U_a). Як впливає з виконаного аналізу, за час інтегрування 20 ms синхронний перетворювач зменшує заваду до рівня $100 \times (S(t) - U_a) / U_a = 2\%$, тобто, у 2500 разів.

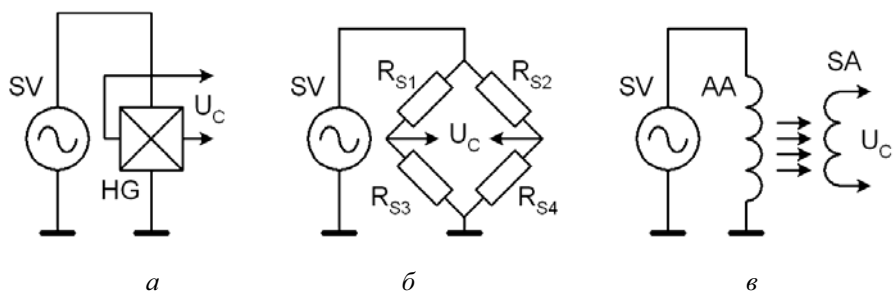


Рис. 1. Завадостійкі вимірювальні перетворювачі з синхронним детектуванням сигналу:

SV – джерело змінної напруги живлення; U_c – вихідна напруга вимірювального перетворювача; HG – перетворювач Холла; $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, R_{S4}$ – резистори мостової схеми; AA – котушка актюатора; SA – котушка сенсора

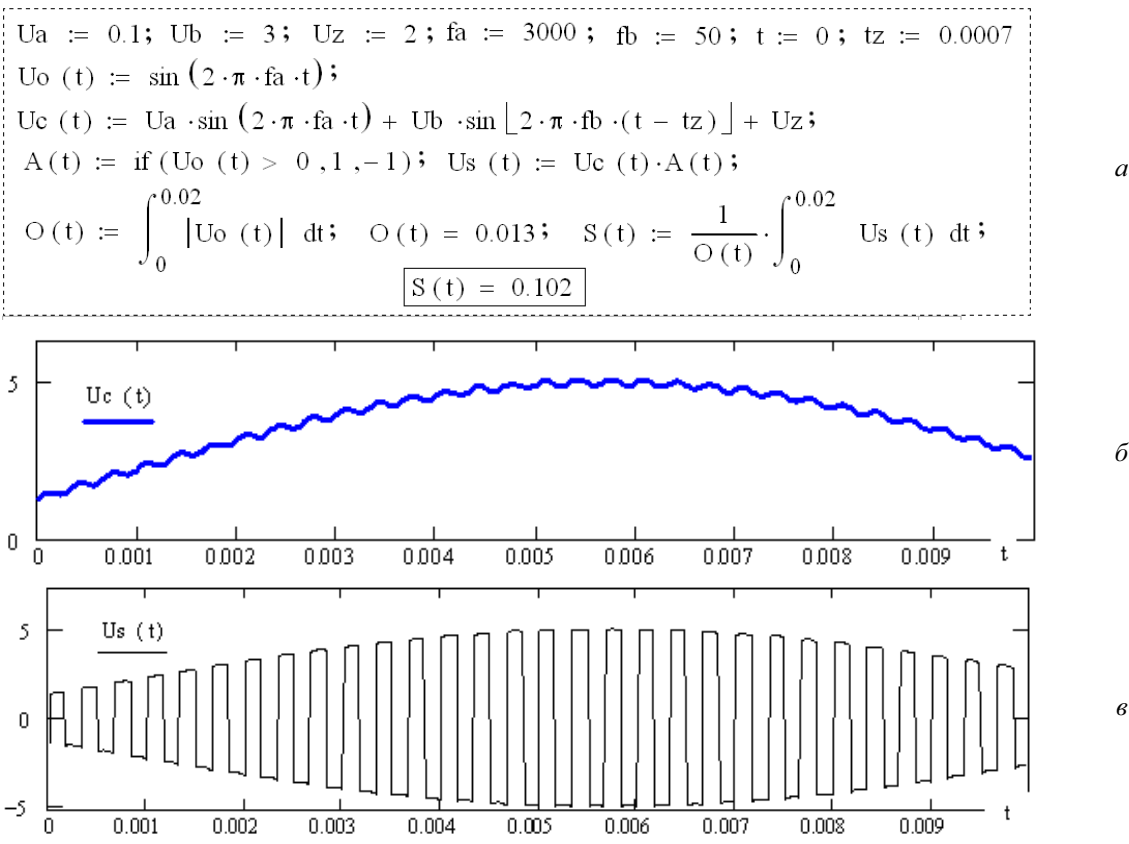


Рис. 2. Опис моделі синхронного детектування (а), форма $U_c(t)$ вхідного сигналу (б) та знакореляційної $U_s(t)$ функції (в)

Схемне рішення вимірювального перетворювача. Основою вимірювального перетворювача є синхронний детектор, що формує знакореляційну функцію і реалізується перемиканням кола зворотного зв'язку операційного підсилювача. Спрощена схема такого каскаду наведена на рис. 3. У додатному півперіоді ключ SW замикає вхідну напругу V_{IN} на неінвертуючий вхід операційного підсилювача ОА. У такому режимі ОА виконує функцію повторювача вхідної напруги: $V_{OUT} = V_{IN}$. У від'ємному півперіоді

ключ замикає неінвертуючий вхід ОА на землю, що переводить ОА в режим інвертора. При $R_1 = R_2$ величина вихідної напруги не змінюється, змінюється лише її знак $V_{OUT} = -V_{IN}$. Резистор R_2 необхідний лише для зменшення паразитного проходження сигналу через розімкнений ключ та прискорення перехідних процесів. Періодичне перемикання ключа SW здійснюється синхронізуючими імпульсами, що формуються компаруванням модулюючого сигналу з певним значенням опорної напруги.

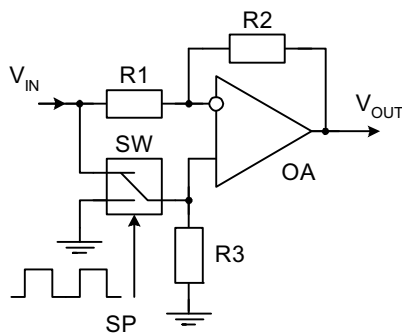


Рис. 3. Спрощена схема синхронного детектора

Особливе значення має вибір ключа SW, що періодично перемикає неінвертуючий вхід операційного підсилювача. Вимогами до цього ключа є мінімальний опір у відкритому стані, відсутність спотворень сигналу та можливість функціонування з низьковольтними джерелами живлення. Цим вимогам повною мірою відповідають інтегральні схеми аналогових ключів типу ADG736 (Analog Devices, USA), коротка інформація про які наведена на рис. 4. Зокрема, ці аналогові ключі забезпечують нормальне функціону-

вання від низьковольтних однополярних джерел живлення 3 В, а опір їхніх ключів не перевищує 4 Ом.

Крім синхронного детектора, вимірювальний перетворювач містить підсилювач сигналу, вхідний пасивний та вихідний активний фільтри (рис. 5). Вхідний фільтр є елементарним RC колом (R1, C1 – за рисунком); підсилювач реалізовано на операційному підсилювачі OA1, синхронний детектор – на OA2, а вихідний фільтр – на OA3. Схема вихідного двополосного активного фільтра (R6, R7, C2, C3, OA3) оптимізована, з одного боку, забезпечуючи максимально швидкий час встановлення (релаксацію), а з іншого, – високий рівень фільтрації (придушення) частоти модуляції.

Приклад результатів моделювання, у ході якого виконано оптимізацію параметрів RC-кіл двополосного активного фільтра вимірювального перетворювача для частоти модуляції $f = 5 \text{ kHz}$, наведено на рис. 6. Результати моделювання демонструють, що за вибраних параметрів RC-кіл встановлення сигналу до 99 % його номінального значення займає час $t \approx 15 \text{ ms}$, а придушення частоти модуляції становить 60 dB.

ANALOG DEVICES | 4 Ω CMOS Dual Switch

ADG736

FEATURES
 +1.8 V to +5.5 V Single Supply
 2.5 Ω (Typ) On Resistance
 Low On-Resistance Flatness
 -3 dB Bandwidth >200 MHz
 Rail-to-Rail Operation
 10-Lead μ SOIC Package
 Fast Switching Times
 t_{ON} 16 ns
 t_{OFF} 8 ns
 Typical Power Consumption
 TTL/CMOS Compatible

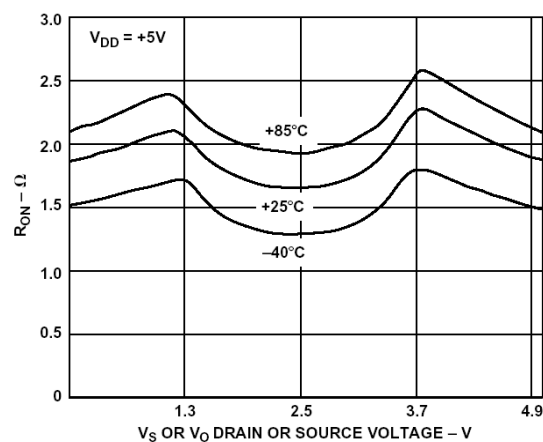


Рис. 4. Основні параметри мультимплексора ADG774 (а) та залежність опору R_{ON} його ключів від напруги керування V_S (б)

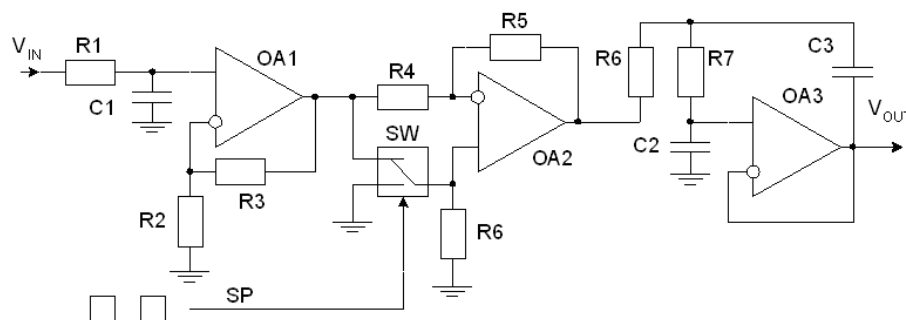


Рис. 5. Схема завадостійкого вимірювального перетворювача

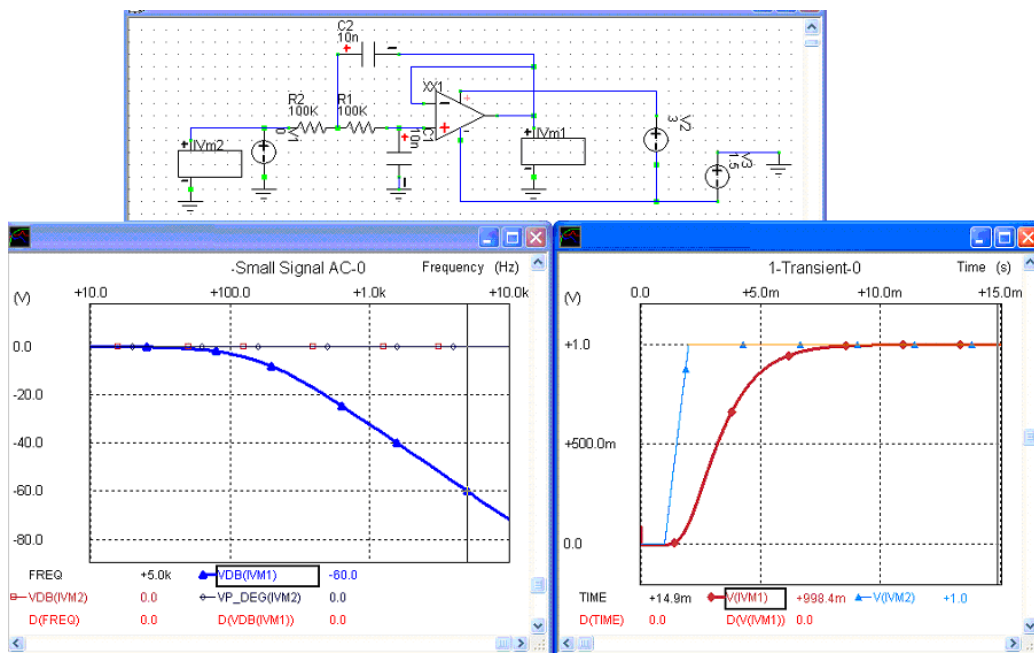


Рис. 6. Приклад результатів моделювання активного вихідного фільтра

Модуль сигнальних перетворювачів. Для створення багатоканальних вимірювальних систем зі швидкою зміною вхідного сигналу, зокрема, в real-time системах моніторингу площинного розподілу вібрацій на основі матриці тензоперетворювачів чи просторового руху на основі матриць електромагнітних рамкових антен, застосовують паралельне оброблення сигналів від декількох сенсорів. Для цього декілька вимірювальних перетворювачів поєднують у модуль з використанням інтегральних схем високого рівня інтеграції.

Зокрема, на рис. 7, 8 наведено приклад реалізації real-time модуля з чотирьох сигнальних перетворювачів на основі зчетверених операційних підсилювачів AD8544 (Analog Devices, USA). Останні характеризуються такими перевагами: rail-to-rail режим, як вхідних, так і вихідних кіл; мікропотужне споживання ($I < 45 \mu A$ на один операційний підсилювач); можливість роботи з однополярними низьковольтними джерелами живлення (від 2,7 В). Для реалізації вказаного сигнального перетворювача використано три інтегральні схеми (IC) AD8544, дві IC ADG736 та одна IC ADG704. Остання IC виконує функцію вихідного комутатора сигналів чотирьох сигнальних перетворювачів на одну вихідну лінію. Номінальна напруга живлення модуля – 3 В, струм споживання – не більше за 1 мА.

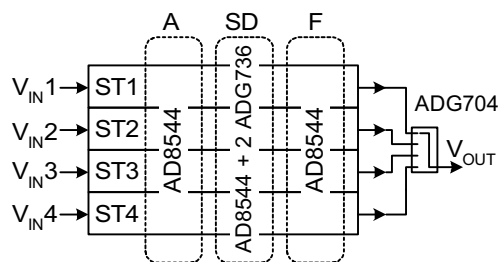


Рис. 7. Структурна реалізація модуля з чотирма сигнальними перетворювачами ST та вихідним комутатором ADG704 (A – підсилювачі, SD – синхронні детектори, F – фільтри)

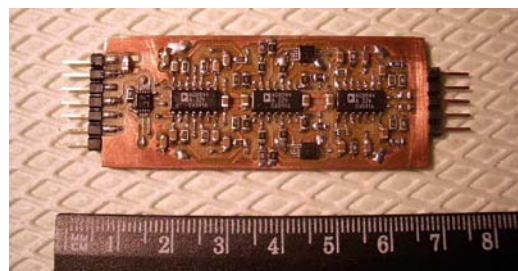


Рис. 8. Фотографія друкованої плати модуля з чотирьох сигнальних перетворювачів

Результати досліджень параметрів сигнальних перетворювачів. Макетні зразки сигнальних перетворювачів досліджували у сенсорних пристроях моніторингу просторового руху на основі електромагнітних рамкових антен. Для створення таких при-

строїв у просторі за допомогою декількох актюаторних антен формують часову послідовність імпульсів мікропотужного низькочастотного ($f = 5 \text{ kHz}$) електромагнітного випромінювання. Матриця сенсорних рамок антен приймає це випромінювання, причому амплітуда та полярність сигналів сенсорних антен слугує інформативною величиною просторового положення об'єкта, на якому розміщена матриця сенсорних антен. Вибір цього типу сенсорів як джерел вхідних сигналів досліджуваних сигнальних перетворювачів зумовлений тим, що їхній сигнал має значний рівень сторонніх електромагнітних завад радіочастотного (зокрема мобільні телефони та персональні комп'ютери) та низькочастотного (зокрема, електромережі 50 Гц) діапазонів. Так, рівень електромагнітних завад електромережі може в десятки разів перевищувати зумовлений актюаторними антенами корисний сигнал. Саме наявність значної електромагнітної завади дає змогу оцінити ефективність розроблених сигнальних перетворювачів.

У ході досліджень виконували вимірювання відтворюваності корисного (синфазного) сигналу,

сформованого актюаторними антенами за різних рівнів завад. Досліджувався сигнальний перетворювач з коефіцієнтом підсилення за напругою $K_V = 10000$. Подальше перетворення сигналу здійснювали 12-розрядним аналого-цифровим перетворювачем ADuC812, а отримані результати передавалися по USB-порту в персональний комп'ютер.

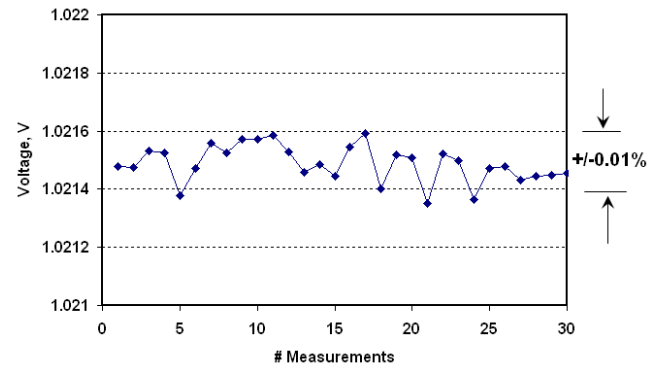
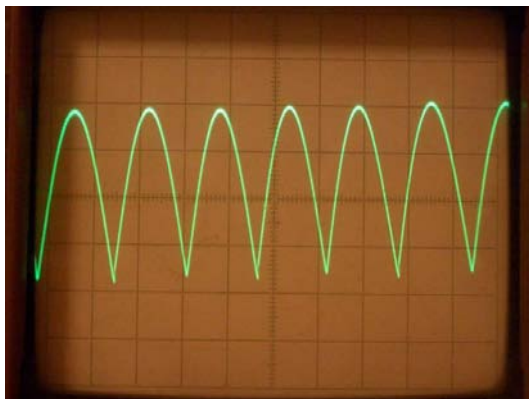
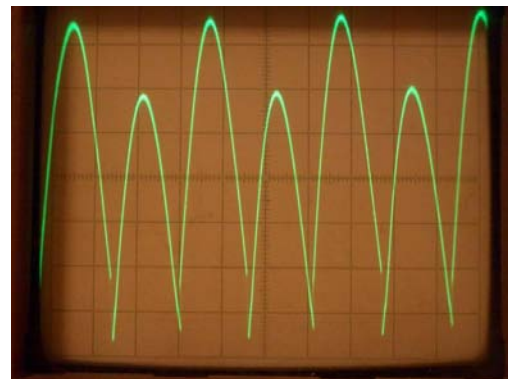


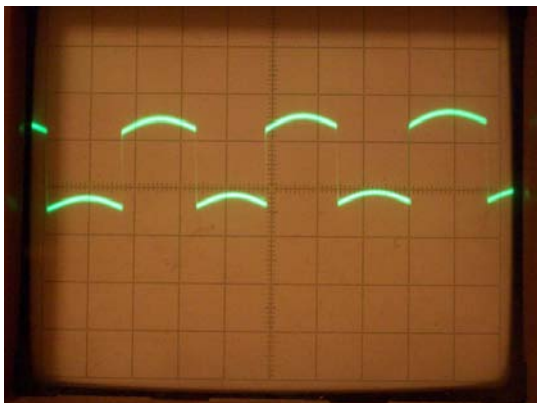
Рис. 9. Приклад результатів вимірювання відтворюваності вихідного сигналу



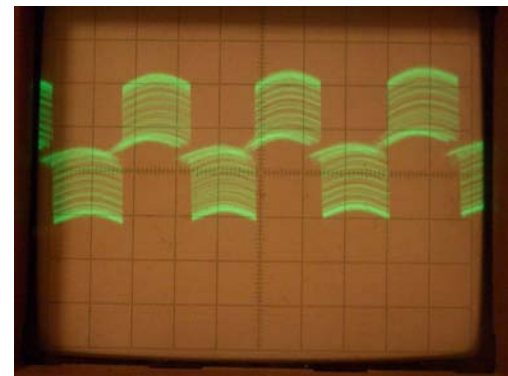
а



б



в



г

Рис. 10. Осцилограми вихідних сигналів синхронного детектора

Приклад результатів дослідження наведено на рис. 9. Можна бачити, що відтворюваність вимірюного сигналу характеризується розкидом в межах $\pm 0,01\%$, що при напрузі вихідного сигналу приблизно 1 В та вказаному коефіцієнті підсилення сигналу визначає реальну роздільну здатність близько 1 мкВ. Крім того, на осцилограмах, що наведені на рис. 10, демонструються форми вихідних сигналів синхронного детектора за різних рівнів завади: ідеальна форма вихідного сигналу без завад (а), великий сигнал при адитивній заваді (б), малий сигнал при адитивній заваді (в), малий сигнал при комбінованій заваді (г). У всіх наведених випадках, навіть при комбінованій заваді, що істотно перевищує рівень корисного сигналу, відзначається висока відтворюваність вимірюного сигналу, що свідчить про хороший рівень придушення завади та високу якість розробленого сигнального перетворювача.

Висновки. Сигнальні перетворювачі на принципі синхронного детектування, характеризуючись високою завадостійкістю, забезпечують істотне підвищення експлуатаційних параметрів сенсорних та вимірювальних пристроїв.

Розроблений сигнальний перетворювач відповідає вимогам до сучасної низьковольтної електроніки та реалізований на rail-to-rail елементній базі. У роботі описано принцип роботи синхронного детектора, математичний опис та результати модельного дослідження

вузлів його схеми, структурна та схемна реалізація сигнального перетворювача, приклади експериментальних досліджень макетного зразка перетворювача та області застосування завадостійких сигнальних перетворювачів на принципі синхронного детектування.

1. Schmalzel J.L., Rauth D.A. *Sensors and signal conditioning*. // *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*. 2005. – Vol. 8. № 2.– PP. 48 –53.
2. Nauta Bram. *Analog IC Design at the University of Twente* // *Solid-State Circuits Newsletter, IEEE*. 2007. – Vol. 12. № 1.– PP. 5–10.
3. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. Готри З., Голяки Р. – Львів: Вид. Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 364 с.
4. Kwong Joyce, Chandrakasan Anantha. *Advances in Ultra-Low-Voltage Design* // *Solid-State Circuits Newsletter, IEEE*. 2008. – Vol. 13. № 4.– PP. 20–27.
5. AD8551/52/54 – Zero-Drift Single-Supply Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifier. Data sheet. www.analog.com.
6. ADG736 – CMOS Low Voltage, 4 Ω , Dual SPDT Switch. Data sheet. www.analog.com.
7. ADuC812 – MicroConverter[®], Multichannel 12-Bit ADC with Embedded Flash MCU. Analog Devices, Inc. 2001. <http://www.analog.com>.
8. Bolshakova I., Holyaka R., Hristoforou E., Marusenkov A. *Performance of Hall-based devices for magnetic field diagnostics at fusion reactor*. *Sensor Letters*. American Scientific Publisher. – Vol. 5. Number 1. – 2007. PP. 283–288.