

УДК 621.317.39(075.8)

<sup>1</sup>І.А. Бороденко  
<sup>2</sup>Ю.В. Куц, д-р техн. наук  
<sup>3</sup>Д.П. Орнатський, канд. техн. наук

## ВІДНОВЛЮВАЛЬНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ АНАЛОГОВИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ПРОМИСЛОВИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Кафедра інформаційно-вимірювальних систем, НАУ  
 e-mail: <sup>1</sup>snucky@voliacable.com; <sup>2</sup>ivs@nau.edu.ua; <sup>3</sup>dornatsky@ukr.net

*Розглянуто проблему існуючих аналогових інтерфейсів промислових інформаційно-вимірювальних систем. Запропоновано систему передавання аналогових сигналів від набору датчиків до приймальної системи обробки результатів для промислового випробувального стенда. Виконано порівняння найбільш поширених відновлювальних фільтрів з фільтрами на основі ітераційних інтегруючих перетворювачів.*

### Вступ

На сьогодні у промислових системах за необхідності передавання аналогових даних від різних датчиків рекомендовано включати в канал передавання гальванічну розв'язку, що дозволяє [1]:

- проводити вимірювання малих струмів і напруг під значною напругою щодо землі;
  - виключити вплив паразитних зв'язків через загальну з іншими пристроями земляну шину й струмів витоків від інших пристроїв у чутливі вимірювальні ланцюги;
  - захистити людину й прилади від небезпечних впливів зовнішніх джерел напруг і струмів.
- Найпоширенішими є три види гальванічних розв'язок [2]:

- трансформаторна;
- ємнісна;
- оптична.

Усі вони використовуються для передавання як аналогових, так і дискретних сигналів.

Номенклатура виробів, що реалізують гальванічну розв'язку і випускаються серійно в даний час, пов'язана з накопиченим різними фірмами досвідом у певних видах технологій.

Фірма Analog Devices віддає перевагу схемам із трансформаторною ізоляцією (наприклад, AD215 або чотириканальні ADuM2400), фірма Hewlett-Packard – з оптоелектронною розв'язкою (наприклад, HCPL-7850), фірма Vug-Brown – з ємнісною розв'язкою (наприклад, двоканальна двонаправлена ISO150).

Узагальнена структура каналу з гальванічною ізоляцією включає вхідний пристрій, вихідний пристрій та ізольоване джерело живлення.

Конструктивно ізольовані канали виконують як модулі, що містять кілька інтегральних і дискретних компонентів.

Деякі пристрої мають вбудовані ізольовані джерела живлення, інші мають потребу в зовнішніх джерелах.

Звичайно до складу модулів належать монолітні інтегральні схеми або інші компоненти, що випускаються як самостійні вироби.

Останнім часом для зменшення вартості готового виробу їх виготовляють в інтегральному виконанні (у вигляді однієї мікросхеми).

Часто канали передавання інформації з гальванічною розв'язкою і без неї не відрізняються своїми параметрами за винятком параметрів ізоляції. Проте включення до складу каналу гальванічної ізоляції може суттєво впливати на параметри, і в першу чергу, на такі динамічні характеристики, як смуга пропускання та швидкість наростання сигналів. Розглянемо основні типи аналогових інтерфейсів вимірювальних систем.

### Пристрої з трансформаторним зв'язком

Трансформатор як елемент гальванічної розв'язки використовують давно.

На рис. 1 показано спрощену структуру одного з відомих підсилювачів із трансформаторною розв'язкою.

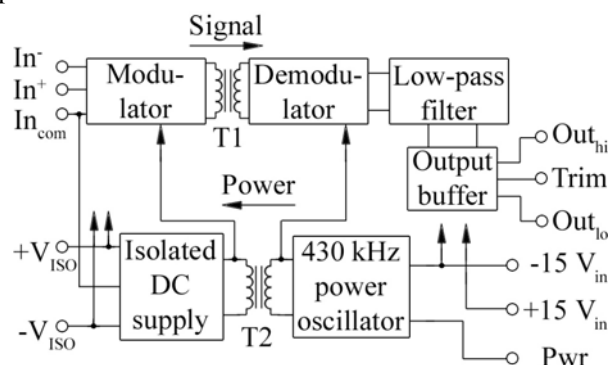


Рис. 1. Структура ізолюючого підсилювача AD215

Оскільки трансформатори не можуть передавати постійну складову напруги, то логічні сигнали, що передаються, повинні бути симетричними за площами позитивної й негативної напівхвиль. Смуга пропускання і швидкість передавання даних значною мірою залежить від властивостей трансформатора й режиму роботи.

Так, в ізолюючому підсилювачі AD210 фірми Analog Devices при коефіцієнті підсилення 1 смуга пропускання дорівнює 20 кГц.

Під час роботи з коефіцієнтом підсилення 100 смуга пропускання зменшується до 15 кГц [3]. Прокідна ємність каналу такого підсилювача становить близько 5 пФ.

### Пристрої з конденсаторним зв'язком

Давно й добре вивченим варіантом гальванічної ізоляції в каналах передавання імпульсів є зв'язок через конденсатор.

Безпосередньо використовувати таку розв'язку для передавання імпульсів можна тільки у випадку, коли швидкість зміни напруги між “землями” передавальної й приймальної частин у кілька разів нижче швидкості наростання фронтів переданих імпульсів.

Як приклад розглянемо ізолюючий підсилювач ISO120 фірми Burr-Brown (рис. 2).

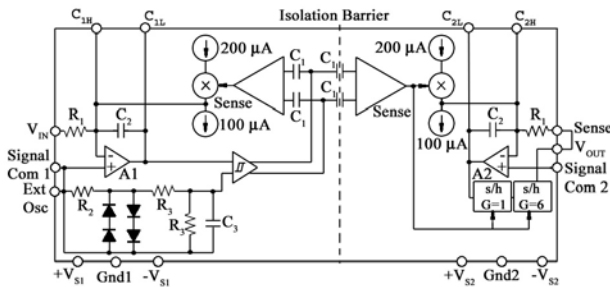


Рис. 2. Структура ізолюючого підсилювача ISO120

У схемі, показаній на рис. 2, для ізоляції використовують спеціальні високовольтні керамічні конденсатори ємністю близько 0,4 пФ, що блокують проходження відносно повільно змінюваних напруг між передавальною й приймальною частинами інтерфейсу.

Цей захист доповнюється диференціальним способом передавання сигналу через два однакових конденсатора.

Канал передавання захищений від збоїв, викликаних дією зовнішніх електростатичних полів, внутрішнім екраном. Через ці заходи зміни напруг між землями приймальної й передавальної частин можуть сягати 20 кВ/мкс [4]. Прокідна ємність пристрою в цілому не більше ніж 2 пФ.

### Пристрої з оптичним зв'язком

Одна зі світових лідерів в галузі оптоелектроніки фірма Hewlett-Packard має в номенклатурі своєї продукції безліч оптопар із різними характеристиками і створює свої вироби з гальванічною ізоляцією на основі цих оптопар. Для виробів розглянутої групи фірма Hewlett-Packard вибрала як метод перетворення  $\Sigma - \delta$ -модуляцію [5].

$\Sigma - \delta$ -модулятор HCPL-7850 (рис. 3) перетворює вхідний аналоговий сигнал в однобітовий потік цифрових даних, який передається через ізолюючий бар'єр оптопар без збоїв у діапазоні швидкостей зміни напруги на бар'єрі до 8 кВ/мкс. Пристрій живиться від одного зовнішнього ізольованого джерела напруги 5 В.

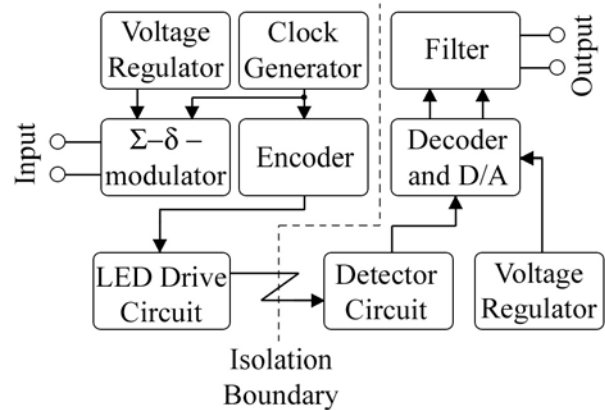


Рис. 3. Структура ізолюючого підсилювача HCPL-7850

Для перетворення вихідного сигналу модулятора у формат одного зі стандартних інтерфейсів застосовують додатковий пристрій.

### Недоліки відомих способів гальванічної розв'язки

У всіх розглянутих видах гальванічних розв'язок вхідний сигнал піддається подвійному перетворенню: спочатку з аналогової форми в цифрову (частотна, широтна,  $\Sigma - \delta$ , кодоімпульсна модуляція), а після розв'язки відновлюється в аналогову форму. Додаткові перетворення призводять до появи шумової складової. Конструктивно ізолюючі підсилювачі випускають в одній інтегральній мікросхемі (монолітній або гібридній). Унаслідок цього аналогові й цифрові вузли розташовані дуже близько один до одного. Необхідність узгодження таких різних вузлів призводить до погіршення лінійності характеристик і зуження смуги пропускання пристрою.

Наприклад, деклароване відхилення коефіцієнта підсилення ізолюючого підсилювача HCPL-7850 становить 5% [5].

Для одержання ізольованої від землі системи напруг живлення використовують перетворювачі постійної напруги в постійну з проміжним перетворенням у змінну. З метою зменшення габаритів трансформаторів і вихідних фільтрів прагнуть використовувати якомога більш високі частоти внутрішнього генератора з формою сигналу, близькою до меандру. Слід враховувати, що імпульсні джерела живлення є також і джерелами широкосмугових радіозавад.

Менші завади створюють двотактні джерела з напругою, що має форму меандру. Тому в джерелах живлення, призначених для гальванічно ізованих каналів, як правило, використовується саме така форма хвилі.

Створювані джерелом живлення височастотні перешкоди можуть істотно знизити смугу пропускання всього пристрою.

Таким чином, необхідність додаткових заходів щодо зменшення впливу завад різної природи на роботу каналу передавання з гальванічною розв'язкою призводить до зростання складності й вартості готового продукту. Не останнім чинником під час розробки каналів з гальванічною розв'язкою є вартість самого ізолюючого підсилювача (у Києві за станом на 12 квітня 2005 р. ізолюючий підсилювач AD210BN від фірми Analog Devices коштував близько 460 грн.) [6].

**Мета** статті – розробка аналогового інтерфейсу багатоканальних інформаційно-вимірювальних систем з покращеними техніко-економічними показниками. Особлива увага приділяється відновленню аналогових сигналів після передавання.

#### Розв'язок

Основними вимогами до розроблюваного інтерфейсу є:

- наявність гальванічної розв'язки;
- підвищена точність передавання аналогових сигналів;
- понижена, відносно існуючих, вартість інтерфейсу;
- віддаленість між джерелом і споживачем сигналів до 200 м.

Оскільки більшість датчиків промислових інформаційно-вимірювальних систем формують низькочастотні сигнали, обмежимо частотний діапазон розроблюваного інтерфейсу інтервалом (0–500) Гц.

Спрощену структурну схему запропонованого аналогового інтерфейсу показано на рис. 4.



Рис. 4. Структурна схема аналогового інтерфейсу: ОР – оптичний розв'язок; Д – датчик; ПНЧ – перетворювач напруги в частоту; MUX – комутатор

Обробку результатів виконують за допомогою комп'ютера. Як гальванічну розв'язку при частотній модуляції пропонується використати оптопару.

Оскільки для розв'язку поставленого завдання достатньо швидкодії оптопари порядку сотень кілогерц, то дешеві оптопари інфрачервоного діапазону цілком придатні, надзвичайно прості й дешеві. Для реалізації досить двох стандартних КМОН логічних мікросхем серії 561 й вітчизняного оптрона АОТ128 або при зв'язку через оптичний кабель – пари світлодіод – фотодіод, використовуваної, наприклад, у дистанційних пультах керування телевізорами. Величина й стабільність коефіцієнта передавання струму несуттєві [1]. Для перетворення аналогового сигналу в дискретний використано  $\Sigma$ - $\delta$ -модулятор. Такий модулятор має високу роздільну здатність, низькі споживану потужність і вартість. Хоча такі модулятори працюють тільки з низькочастотними сигналами (до сотень кілогерц), але для поставленої задачі такої смуги пропускання цілком достатньо. У разі необхідності передавання сигналів на великі відстані доцільно використовувати частотно-імпульсну модуляцію (ЧІМ) з передаванням модульованого сигналу по бездротових мережах стільникового зв'язку. Цей тип модуляції має гарну перешкодозахищеність, а мережі стільникового зв'язку – велику поширеність.

Для усунення впливу ширококугових перешкод від імпульсного джерела живлення, пропонується використати гальванічно розв'язані DC/DC конвертори з амплітудно-модульованим височастотним гармонійним сигналом.

Працездатність запропонованого інтерфейсу перевірялася на моделі аналогового інтерфейсу в середовищі Electronic WorkBench 5.12 (рис. 5).

У цій схемі як тестовий сигнал використовується вхідний сигнал прямокутної форми, який формується генератором напруги з параметрами 300 Гц, 7 В.

За допомогою  $\Sigma$ - $\delta$ -модулятора сигнал перетворюється в дискретну форму, зручну для передавання через оптопару (на рис. 5 не показано).

Однією з важливих операцій під час передавання аналогового сигналу в аналоговому інтерфейсі є його відновлення. Ця операція визначає як точність сигналу, так і швидкість інтерфейсу. Відновлення вихідної форми сигналу в моделі відбувається за допомогою ітераційного інтегруючого перетворювача (ІІП) другого порядку [7]. У таких ітераційних інтегруючих перетворювачах замість пристроїв “вибір/зберігання” пропонується використовувати ідентичні динамічні запам'ятовуючі пристрої в режимі поділу часу, завдяки чому не виникають апертурні похибки та зберігається максимальна швидкість ІІП.

Це дає змогу більш ефективно використовувати їх як відновлювальні схеми при придушенні завад або при відновленні аналогового сигналу при частотній або широтно-імпульсній модуляції.

Для побудови відновлювального фільтра другого порядку використовуємо дві однакові схеми ІПП першого порядку, але вихідний сигнал знімаємо з інтегруючого підсилювача, який входить до складу другого перетворювача (вихід «out2», рис. 5).

Для синхронізації роботи перетворювачів використовуємо тригер.

Також була розглянута можливість відновлення сигналу фільтрами низьких частот (ФНЧ) другого й четвертого порядків на основі операційних підсилювачів. Для забезпечення адекватності порівняння отриманих результатів ми встановили однакові сталі часу у всіх фільтрах (дорівнюють 0,1 мс). На рис. 6 показано, як змінюється форма відновлених сигналів при використанні різних фільтрів на різних частотах. ІПП дозволяють одержувати кращі результати на більш високих частотах, ніж при використанні звичайних аналогових відновлювальних фільтрів.

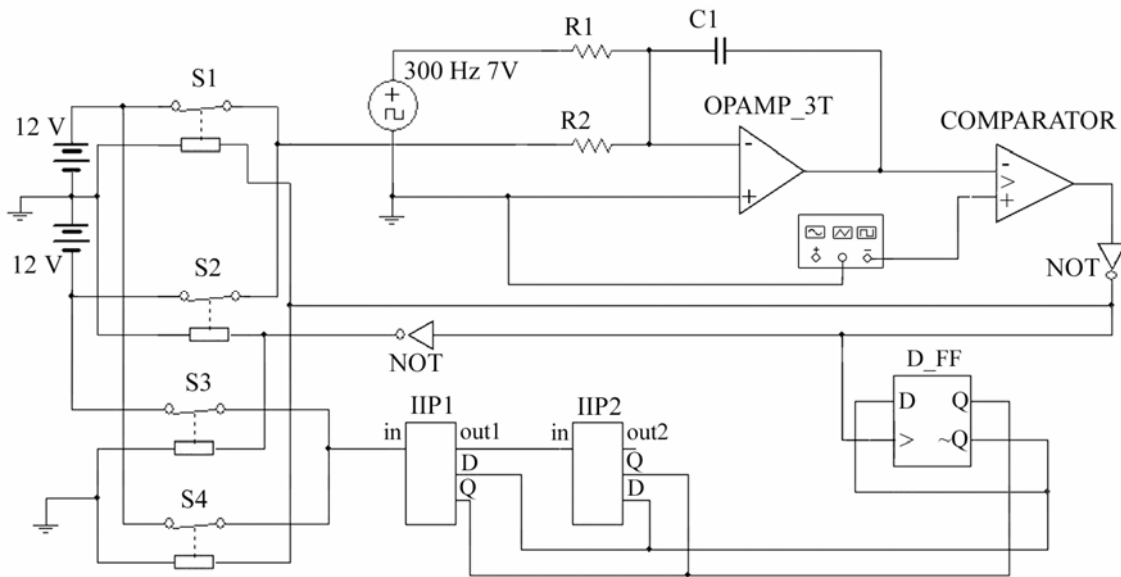


Рис. 5. Схема електрична принципова моделі аналогового інтерфейсу з  $\Sigma$ - $\delta$ -модулятором

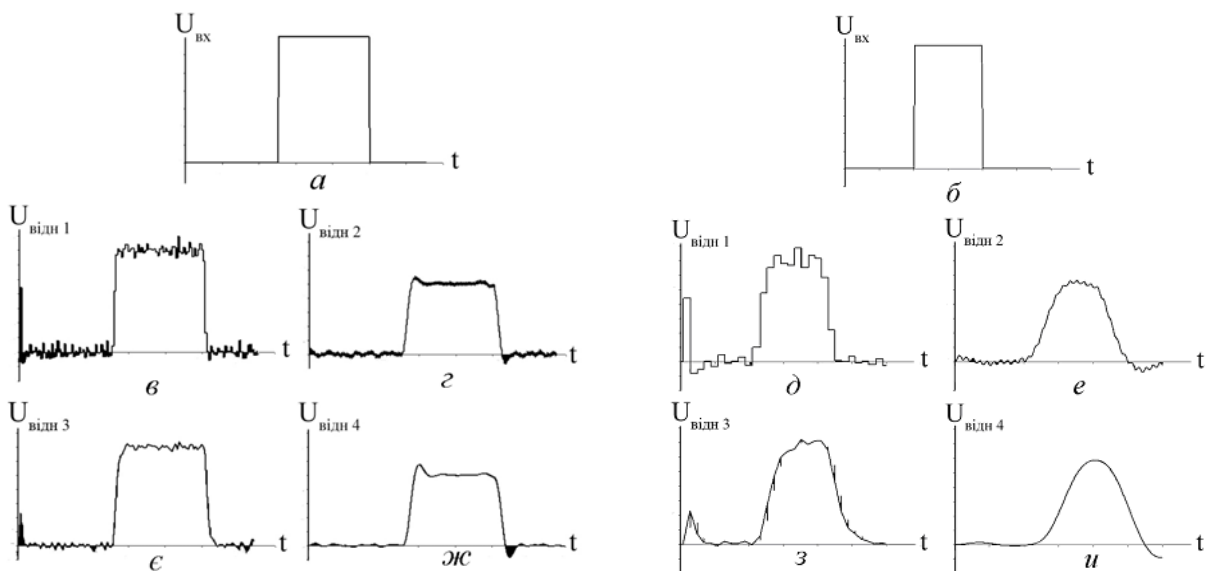


Рис. 6. Форма відновленого сигналу під час використання різних фільтрів на частотах 100 Гц *a, в, з, ж*) та 500 Гц (*б, д, е, з, u*):

*a, б* – вхідний сигнал; *в, д* – ІПП першого порядку; *з, е* – ФНЧ другого порядку; *ж, з* – ІПП другого порядку; *ж, u* – ФНЧ четвертого порядку

У випадку роботи на низьких частотах (до 100 Гц) найбільш актуальним є не передавання вхідного сигналу з мінімальним спотворенням (на цих частотах форма сигналу передається не спотвореною будь-якими фільтрами), а питання мінімізації динамічної похибки відновлення (рис. 7).

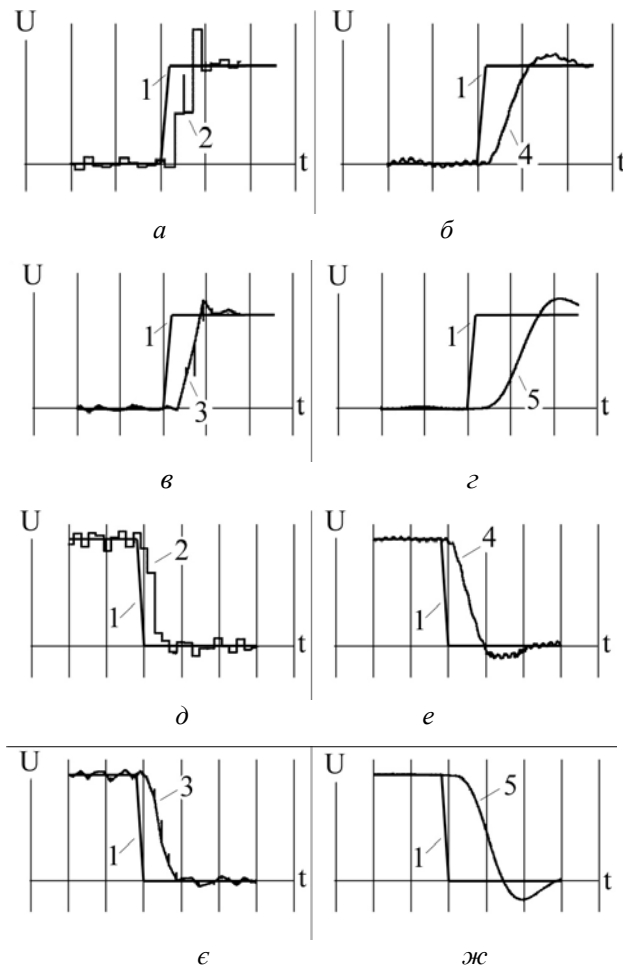


Рис. 7. Передній (а, б, в, г) і задній (д, е, є, ж) фронти сигналів (на частоті 50 Гц): 1 – вхідний сигнал; 2 – відновлений ІПІ першого порядку; 3 – відновлений ІПІ другого порядку; 4 – відновлений ФНЧ другого порядку; 5 – відновлений ФНЧ четвертого порядку

Як видно з результатів моделювання, ІПІ дають меншу затримку порівняно з іншими фільтрами. Передній фронт сигналу, відновленого фільтром ІПІ першого порядку, становить близько 50 мкс. У разі використання ФНЧ другого порядку маємо тривалість переднього фронту близько 80 мкс. Тобто динамічна похибка під час використання ІПІ менше, ніж при використанні аналогових відновлювальних фільтрів.

Результати моделювання роботи схеми з сигналами з ЧІМ показують, що застосовувати ФНЧ для відновлення таких сигналів недоцільно (рис. 8).

Використання ФНЧ з апроксимацією Баттерворта або Бесселя потребує додаткових засобів зменшення шумової гармонійної складової сигналу, що, в свою чергу, збільшить динамічну похибку. У проведеному модельному експерименті частота несучої становить близько 2 кГц, а девіація  $\pm 1$  кГц. Зі зменшенням частоти вхідного сигналу форма відновленого за допомогою ІПІ сигналу з ЧІМ наближається до вхідної. За частоти 70 Гц ІПІ першого порядку призводять до появи переднього фронту тривалістю близько 3 мс. За аналогічних умов при використанні ІПІ другого порядку отримуємо тривалість переднього фронту близько 6 мс.

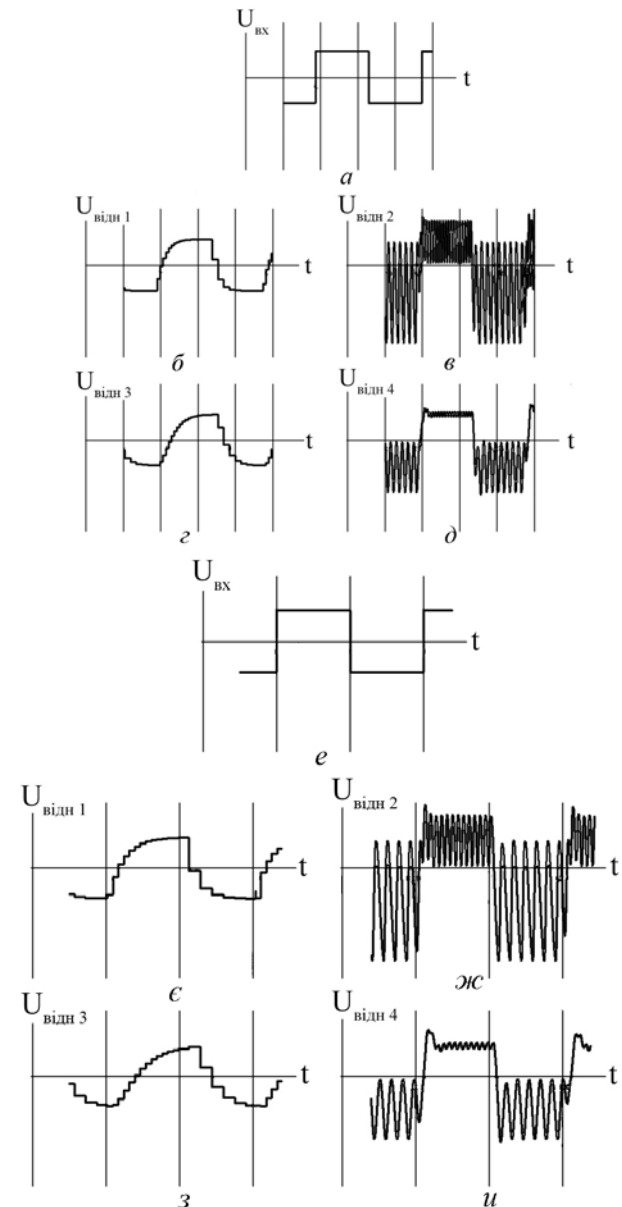


Рис. 8. Форма відновленого ЧІМ сигналу при використанні різних фільтрів на частотах 70 Гц (а, б, в, г, д) та 100 Гц (е, є, ж, з, и): а – вхідний сигнал; б – ІПІ першого порядку; в – ФНЧ другого порядку; г – ІПІ другого порядку; д – ФНЧ четвертого порядку

У свою чергу, на частоті 100 Гц тривалість переднього фронту збільшується до 5 і 7 мс при використанні ІІІ першого і другого порядків відповідно. Збільшення сталої часу ФНЧ поліпшить форму вихідного сигналу, але одночасно це призведе до збільшення динамічної похибки відновлення. Тому такий підхід використовувати недоцільно.

### Висновок

Запропонований аналоговий інтерфейс містить такі основні блоки:

- $\Sigma$ - $\delta$ -модулятор, який перетворить сигнал датчиків у дискретну послідовність імпульсів, або перетворювач частоти в напругу;
- оптопара, яка служить гальванічною розв'язкою, або система передавання даних по стільникових каналах зв'язку;
- відновлювальний фільтр на основі ІІІ, який дозволяє досягти високої точності та швидкодії. Інтерфейс із запропонованим відновлювальним фільтром має такі переваги:
- зменшення кількості точок вибірки під час використання  $\Sigma$ - $\delta$ -модулятора, тобто зменшення вимог до швидкодії інтерфейсу;
- задовільна гальванічна розв'язка;
- при використанні для відновлення сигналу ІІІ якість і точність відновлення краще, ніж при використанні ФНЧ.

У цілому можна зробити висновок про перспективність подібного вирішення й доцільності подальшої розробки аналогових інтерфейсів з відновлювальними фільтрами на основі ІІІ.

### Література

1. *Авербух В.* Каналы с гальванической изоляцией для передачи аналоговых сигналов // Электронные компоненты. – 1999. – №5. – С. 13–24.
2. *Авербух В.* Каналы с гальванической изоляцией для передачи аналоговых сигналов // Электронные компоненты. – 1999. – №4. – С. 25–30.
3. [http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/210891627ad215.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/210891627ad215.pdf)
4. <http://www-s.ti.com/sc/ds/iso120.pdf>
5. <http://www.home.agilent.com/USeng/nav/-536893648.536883994/pd.html>
6. <http://www.vdmais.kiev.ua/stock.asp>
7. *Орнатский Д.* Способ улучшения основных метрологических характеристик ИИС централизованного типа // Информационно-диагностические системы. Секция “Информационно-измерительные системы”: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. “Авиа-2002”, 23–25 апр. 2002 г. – К.: НАУ, 2002. – Т.1. – С.11.59–11.61.

Стаття надійшла до редакції 16.09.05.

И.А. Бороденко, Ю.В. Куц, Д.П. Орнатский

Восстанавливающий фильтр для аналоговых интерфейсов промышленных информационно-измерительных систем  
Рассмотрена проблема существующих аналоговых интерфейсов промышленных информационно-измерительных систем. Предложена система передачи аналоговых сигналов от набора датчиков к приёмной системе обработки результатов для промышленного испытательного стенда. Выполнено сравнение наиболее распространённых восстанавливающих фильтров с фильтрами на основе итерационных интегрирующих преобразователей.

I.A. Borodenko, Y.V. Kuts, D.P. Ornatsky

The restoring filter for analog interfaces of industrial information-measuring systems

Problems of existing analog interfaces of industrial information-measuring systems are considered. The system of transfer of analog signals from a set of gauges to reception system of processing of results for the industrial test bench is offered. The most widespread restoring filters are compared to filters on the basis of iterative integrating converters.