

УДК 621.311.4

**Б.С. Стогний**, акад. НАН України, **А.В. Кириленко**, акад. НАН України, **М.Ф. Сопель**, канд. техн. наук, **С.Е. Танкевич**, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Система моніторингу стану обладнання тягових підстанцій переменного току залізничного транспорту**

*Представлены основные результаты выполнения научно-технического проекта в отделах моделирования электроэнергетических объектов и систем и автоматизации электрических систем за 2014 год. Цель проекта – разработка системы мониторинга состояния оборудования тяговых подстанций железнодорожного транспорта, которая предназначена для автоматизированного мониторинга и диагностирования состояния основного электротехнического оборудования и оценки режимов его работы. Библ. 5, рис. 3, таблица.*

**Ключевые слова:** електроенергетичне обладнання, тягова підстанція, аварійний режим, автоматизація, моніторинг, діагностика.

**B.S. Stognii, O.V. Kyrylenko, M.F. Sopel, S.Ye. Tankevych,**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Equipment condition monitoring system of AC traction substation for railway transport**

*The basic results of science project implementation during 2014 are presented. The project was carried by departments of electrical energy object and systems modeling and energy systems automation. The project was intended to develop equipment condition monitoring system of AC traction substation for railway transport. The system is intended for automated monitoring and diagnostics of the condition of main electrical equipment and assessment of its operation modes. References 5, figures 3, table.*

**Key words:** electrical power equipment, traction substation, emergency operation, automation, monitoring, diagnostics.

Надійшла 8.04.2015

Received 8.04.2015

## **№ 5. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

УДК 621.317

### **ЗАВАДОСТІЙКИЙ ПРЕЦИЗІЙНИЙ КАНАЛ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ІМПЕДАНСОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ**

**В.Г. Мельник**, канд. техн. наук, **О.В. Сліцький**, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
melnik@ied.org.ua

*Викладено результати досліджень, отримані у відділі електричних і магнітних вимірювань у 2014 р., у напрямку підвищення точності та завадостійкості імпедансометричних каналів. Втричі підвищено інформаційний ККД та зменшено нелінійність перетворення. Бібл. 5, рис. 9.*

**Ключові слова:** вимірювання, імпеданс, похибка, нелінійність, аналого-цифровий перетворювач.

**Вступ.** Канал перетворення інформативних сигналів з виходів вимірювального кола (або вторинного перетворювача сенсорів) імпедансометричних засобів є найважливішою частиною вимірювальної системи, що визначає її чутливість, розрізнявальну здатність, швидкодію і завадостійкість. Лінійність характеристики перетворення цього каналу в основному або значною мірою визначає досягнуту точність приладів. При розробці мережевих систем збору даних і управління, а також портативних приладів для оперативного контролю важливими вимогами є підвищення його завадостійкості, спрощення апаратури, зменшення енергоспоживання та вартості.

Як показує досвід практичних розробок, перспективним шляхом поліпшення зазначених характеристик таких каналів є застосування високочутливих інтегровальних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з ключовим синхронним детектором на вході. З використанням АЦП МАХ-132 зі сталою інтегрування, що змінюється при перетворенні (*multi-slope*), і невеликої кількості інших дешевих компонентів раніше були реалізовані прості, вектормірні канали для імпедансометричних засобів з чутливістю 2 мкВ, діапазоном вимірювання  $\pm 0,5$  В і відносною похибкою вимірювання в декадному діапазоні не гірше 0,05 %. Вони були застосовані в уніфікованих базових модулях МХР-3, на основі яких розроблено конкурентоспроможні високочутливі прилади різного призначення. Дослідження, виконані в ході цих розробок, показали наявність додаткових можливостей підвищення точності й чутливості імпедансометричних каналів з інтегровальними АЦП. Переваги застосування такого виду АЦП та деякі проблеми, що при цьому виникають, розглянуто в роботах [1, 2].

Перша зі згаданих можливостей пов'язана з тим, що при аналого-цифровому перетворенні будь-яким типом АЦП, тільки частина всього часу вимірювання використовується для перетворення енергії сигналу, що істотно відбивається на завадостійкості. В результаті інформаційний ККД вимірювального каналу істотно менший від одиниці. Для каналу з АЦП МАХ-132 він складає 1/3. В [1] запропоновано метод послідовно-паралельного виконання аналого-цифрового перетворення трьома АЦП такого типу, при якому інформаційний ККД каналу близький до 1, що дає можливість підвищити утричі швидкодію або удвічі розрізнявальну спроможність приладів. У роботі [2] розглянуто особливості характеристики перетворення *multi-slope* АЦП, досліджено їх специфічну диференціальну нелінійність, яка виникає внаслідок впливу завад, і показано принципову можливість її суттєвого зменшення.

Останнім часом було виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, у результаті яких розроблено імпедансометричний канал прецизійного класу для уніфікованого базового вимірювального модуля нового покоління МХР-4. Запропоновані в цій розробці нові методи вимірювання і способи зниження похибок *multi-slope* АЦП дають змогу досягти розрізнявальної спроможності в діапазоні значень вхідного сигналу  $\pm 0,5$  В. При цьому може бути забезпечена відносна похибка від нелінійності перетворення в декадному піддіапазоні змін вимірюваного параметра імітансу, яка не перевищує 0,01 %. Розглянемо наявні проблеми та розроблені методи їх вирішення.

**Структура та принцип роботи вимірювального каналу.** Імпедансометрична система, спрощена схема якої показана на рис. 1, включає вимірювальне коло МС, до якого підключені об'єкт вимірювання  $Z_x$  і генератор  $G$  тестового сигналу  $U_G$ . Генератор є цифроаналоговим перетворювачем, який змінює опорну напругу за квазісинусоїдальним законом, формуючи одночасно синфазний або квадратурний опорний сигнал  $U_0$ . Частота  $U_G$  визначається тактовою частотою  $f_t$ , яка задається мікроконтролером вимірювальної системи МРС. Канал перетворення вихідного інформативного сигналу МС виконує функції фільтрації, нормування та аналого-цифрового перетворення цього сигналу. На вході каналу є синхронний детектор  $SD$ , де інформативний сигнал перемножується з опорним сигналом форми "меандр"  $U_0$ . Вихідний сигнал  $SD$  є пульсуючою напругою  $U_x$ , постійна складова якої відповідає синфазній або квадратурній до  $U_G$  складовій вимірювального сигналу залежно від фази  $U_0$ . Вибір цієї фази визначає вимірюваний параметр  $Z_x$ .

Трьома аналого-цифровими перетворювачами  $ADC$  інтегровального типу виділяється і оцифровується постійна складова  $U_x$ . При цьому інтегрування пульсуючого  $U_x$  другим АЦП починається відразу після закінчення його інтегрування тривалістю 20 мс першим, а інтегрування третім АЦП здійснюється відразу по закінченні часу інтегрування другого. Оскільки час всього циклу вимірювання АЦП дещо перевищує три періоди інтегрування, то інтегрування пульсуючого вимірювального сигналу відбувається практично безперервно, а оцифрування отриманої постійної складової виконується паралельно трьома фрагментами по 20 мс за один цикл. Ці фрагменти зчитуються імпульсами вибірки  $CS1...3$  по внутрішньому інтерфейсу каналу ( $IF$ ) мікроконтролером МРС і передаються як результат вимірювання по зовнішньому інтерфейсу  $EIF$  в комп'ютер  $PC$ , де вони або усереднюються для підвищення роз-

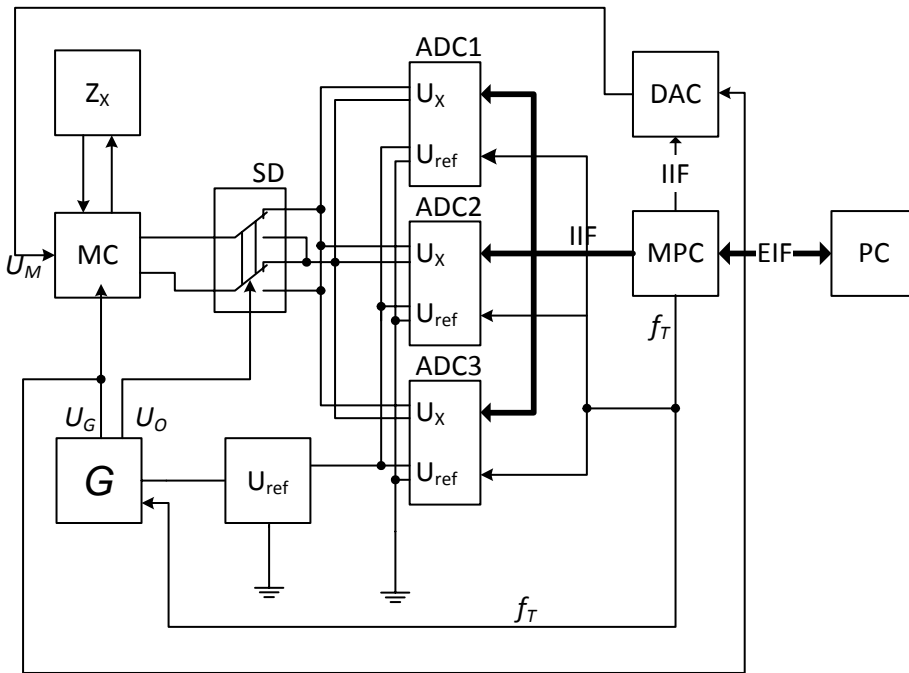


Рис. 1

чем, калібрований сигнал якого додається до інформативного сигналу, зміщуючи робочу точку на характеристиці перетворення АЦП на невелику, точно відому величину. Детально цей спосіб підвищення точності буде розглянуто далі.

**Особливості перетворення *multi-slope* АЦП.** Принцип дії АЦП подвійного інтегрування зі змінною швидкістю заряду (*runup*) та/або розряду (*rundown*) інтегруючого конденсатора відомий і використовується вже кілька десятиліть для вимірювання постійних напруг з високою розрізняювальною спроможністю і лінійністю перетворення [4, 5]. Можливий варіант побудови імпедансометричного каналу з таким АЦП запропонований (за участю одного з авторів цієї роботи) в [3]. На цей час фірмою *МАХІМ* випускається мікросхема АЦП такого типу (*МАХ-132*). В її технічних характеристиках вказуються межі зведеної відносної похибки від  $\pm 0,0015$  до  $\pm 0,006$  % від повного діапазону вимірювання  $\pm 512$  мВ. Результати досліджень, описані в роботі [2], показують, що такі коливання похибки пов'язані з тим, що при переміщенні робочої точки за діапазоном вимірювання періодично відбувається підвищення дисперсії відліків вимірюваного сигналу в зонах шириною 15...20 одиниць дискретності, які слідуєть з періодичністю 64 од. Типовий характер розкиду результатів перетворення на ділянці характеристики розміром близько 200 од. дискретності показано на рис. 2, а зміни усереднених результатів – на рис. 3. Діаграму отримано скануванням цієї ділянки шляхом зміщення робочої точки модуляційним ЦАП з дискретністю близько 1 од. відліку АЦП.

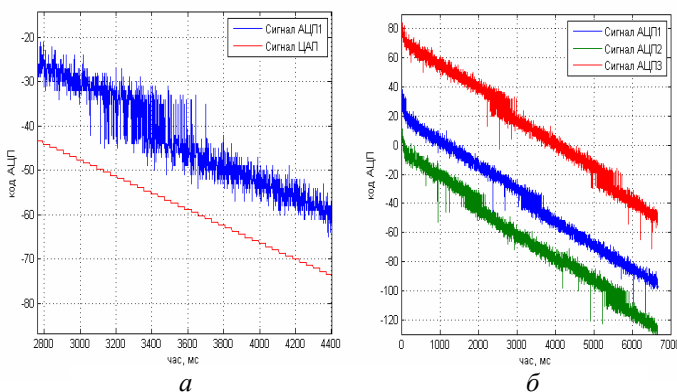


Рис. 2

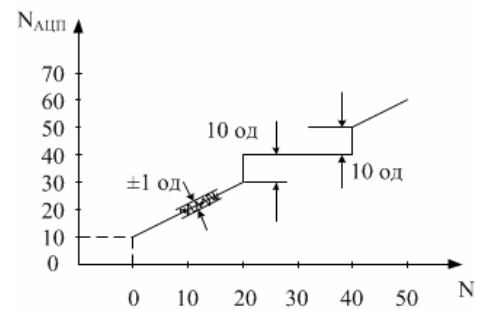


Рис. 3

різнювальної здатності, або використовуються як потік даних з потрійною частотою вибірки.

У розглянутому каналі забезпечується логометричний принцип вимірювання, оскільки опорні напруги генератора і АЦП визначаються одним джерелом. Для зменшення специфічної диференціальної нелінійності, яка має місце в *multi-slope* АЦП [2], у схему введено модулятор інформативного сигналу з виходу МС, що є помножувальним цифроаналоговим перетворювачем,

Розкид результатів у "стабільній" (лінійній) ділянці після відсіювання неправдоподібних одиничних викидів має випадковий шумоподібний характер з дисперсією до  $\pm 4$  од. У "нестабільній" (нелінійній) зоні спостерігаються стрибки результатів між двома малозмінними значеннями з різницею 20 од. Через відмінності зсуву нуля в трьох АЦП розробленого каналу, їх зони підвищеної дисперсії на його сумарній характеристиці перетворення можуть як накладатися одна на одну, так і розміщуватися відносно рівномірно (рис. 2 б). Доцільно коригувати нулі кожного з АЦП так, щоб отримати останній варіант. У цьому випадку усереднення результатів при обробці даних трьох АЦП дасть змогу зменшити відносну величину розглянутої диференціальної нелінійності.

**Модуляційний метод зменшення похибки від специфічної диференціальної нелінійності характеристики перетворення інтегруючого *multi-slope* АЦП.** У роботі [2] показано, що погіршення лінійності характеристики перетворення через вплив зон з підвищеною дисперсією результатів вимірювань можна істотно зменшити, виконуючи кілька вимірювань з невеликими каліброваними зсувами робочої точки за характеристикою перетворення та усереднюючи результати з урахуванням зсувів, при яких вони отримані. Запропоновано також інший шлях, який полягає в тому, щоб розпізнавати потрапляння робочої точки в зону підвищеної нелінійності й зміщувати її на лінійну ділянку характеристики перетворення, враховуючи зсув при обробці результатів.

У ході останніх досліджень цієї проблеми запропоновано новий модуляційний метод зменшення впливу специфічної диференціальної нелінійності на точність вимірювань. Його суть полягає в безперервній сходиноквій модуляції вимірювального сигналу в "+" і в "-" відносно робочої точки на однакові величини, дещо більші, ніж ширина зони підвищеної дисперсії. Деякі зі сходинок отриманого оцифрованого відгуку виявляються спотвореними стосовно форми модулюючого сигналу через нелінійність характеристики. Отримані відгуки кожного циклу модуляції класифікуються (розпізнаються) за цією ознакою. Таким чином, отримуємо масив даних для усереднення результатів перетворення, в якому відомі недостовірні дані. Вони можуть бути виключені з усереднення результатів або замінені даними, отриманими інтерполяцією (екстраполяцією) за результатами перетворень на суміжних сходинок модульованого сигналу.

Обробка модульованого інформативного сигналу відбувається в режимі реального часу і не збільшує загального часу накопичення даних, необхідного для достатнього подавлення шумових завад. Можливі варіанти відгуків при трисходиноквій модуляції показано на рис. 4. Далі наведено математичні вирази, що дають змогу класифікувати ці відгуки.

При експериментальних дослідженнях розробленого каналу модуляційний крок був обраний так, щоб відгук на нього становив 20 од. відліку АЦП. При цьому зводилась до мінімуму ймовірність спотворення двох сходинок у модуляційному циклі. На фрагменті "Н" діаграми показано "нормальний цикл", коли всі значення модульованого сигналу розміщуються між зонами підвищеної дисперсії. У цьому випадку величини відгуків на модуляційний крок ( $h_1$  і  $h_2$ ) приблизно однакові, а їх сума близька до 40 одиниць відліку АЦП ( $h_H$ ). На фрагментах діаграми 1–3 зображено випадки спотворення верхньої, нижньої або середньої сходинок. Характер специфічної диференціальної нелінійності допускає тільки такі варіанти.

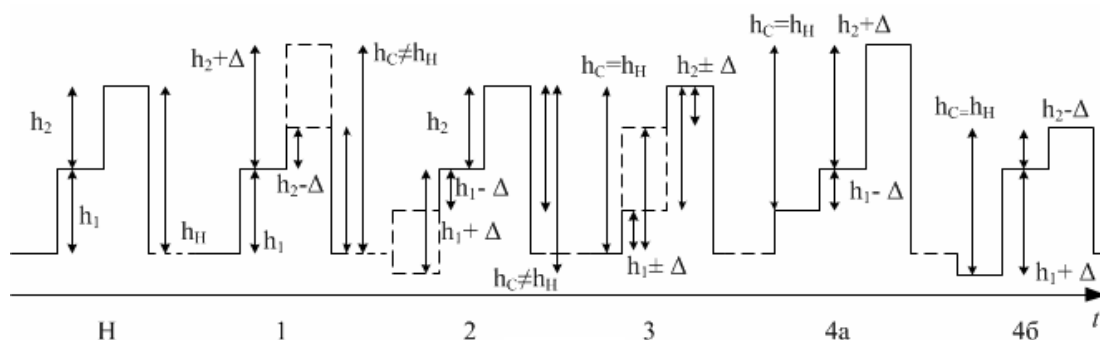


Рис. 4

Однак при підвищеному рівні завад можливі й інші комбінації висот сходинок. Два таких малоймовірних випадки, коли спотворені обидві крайні сходинки: одна в "+", інша в "-" показано на фрагментах 4а та 4б.

Завдання розпізнавання відгуків вирішується перевіркою виконання таких нерівностей:

$$H: |h_1 - h_2| < \Delta_n \text{ і } |h_1 + h_2 - 40| < \Delta_n;$$

$$1 \text{ або } 2: |h_1 - h_2| > \Delta_n \text{ і } |h_1 + h_2 - 40| > \Delta_n;$$

$$1: |h_1 - 20| < \Delta_n \text{ і } |h_2 - 20| > \Delta_n;$$

$$2: |h_1 - 20| > \Delta_n \text{ і } |h_2 - 20| < \Delta_n;$$

$$3: |h_1 - h_2| > \Delta_n \text{ і } |h_1 + h_2 - 40| < \Delta_n;$$

$$4: |h_1 - h_2| > \Delta_n \text{ і } |h_1 + h_2 - 40| < \Delta_n.$$

Як бачимо, наведені критерії не дають можливості відрізнити між собою відгуки видів 3 і 4. Щоб їх диференціювати, необхідно використовувати наявну інформацію про дисперсії відліків АЦП для середньої сходинки. Для виду відгуку 3 ця дисперсія підвищена, тому середнє значення відліків за цикл береться по двох крайніх сходинках. Для відгуків виду 4 за середній результат циклу приймається значення сигналу на середній сходинці. В останньому випадку має місце невелике зростання випадкової похибки за рахунок зменшення числа усереднених результатів, що, однак, істотно менше похибки, яка викликається диференціальною нелінійністю. У випадках відгуків 1 і 2 середнє значення сигналу за цикл визначається усередненням даних на сходинках, між якими різниця близька до 20, і екстрапольованого середнього значення сигналу на спотвореній сходинці. Тут представлений найпростіший алгоритм розпізнавання. У реальній програмі він може бути більш складним, щоб врахувати різні можливі варіанти спотворення модуляційного відгуку під впливом завад або швидких змін інформативного сигналу. Такі результати можуть бути виключені як неправдоподібні або оброблені за більш "розумним" алгоритмом, наприклад, з метою поліпшення динамічних властивостей каналу.

Далі наведемо результати метрологічних досліджень розробленого імпедансометричного каналу, в якому використано спрощений модуляційний метод, де середній результат за модуляційний цикл визначався простим усередненням всіх відліків без розпізнавання недостовірних даних, що обмежило ступінь зниження впливу дисперсії на точність приблизно трикратною величиною.

**Визначення нелінійності характеристики перетворення вимірювального каналу в усьому робочому діапазоні.** Для оцінки потенційних можливостей підвищення точності розробленого вимірювального каналу були проведені дослідження лінійності його характеристики перетворення у всьому динамічному діапазоні вхідних сигналів (- 250 000 ... + 250 000 одиниць відліку).

В якості МС використовувалось компенсційно-мостове коло з порівнянням струмів, а в якості  $Z_x$  застосовувалися високостабільні резистори С2-29В. Для регулювання стану мостового кола до складу *DAC* (рис. 1) входило два цифроаналогових перетворювачі: малорозрядний модуляційний і високоточний 12-розрядний ЦАП, який дає змогу формувати високостабільний компенсційний сигнал у діапазоні від 0 до 250 тис. одиниць відліку АЦП цього каналу. Для досліджень керуючий код ЦАП був встановлений у стан 2047 (всі розряди крім старшого в стані 1). У цьому випадку робоча точка АЦП перебувала посередині додатної частини характеристики перетворення АЦП. При зміні стану (варіації) старшого розряду ЦАП з 0 в 1 робоча точка зміщувалася до кінця цієї частини характеристики (приблизно на 134 000 од.). Підключенням як  $Z_x$  резисторів з опором від 100 к до 7,5 к (18 значень) початкова точка варіації зміщувалася до 0 і далі до кінця від'ємної частини характеристики АЦП. Таким чином, було отримано 19 значень відгуків каналу на ідентичні варіації компенсційного сигналу моста на всьому протязі характеристики перетворення АЦП. Розміри відгуків, розрізняюча здатність ( $\pm 0,5$  од.) та часова стабільність відліків дали змогу визначити зміни нахилу характеристики АЦП (відношення приросту коду АЦП до приросту коду ЦАП:  $\Delta N_{\text{АЦП}}/\Delta N_{\text{ЦАП}}$ ) з похибкою не більше 0,001 %.

На рис. 5 зображено графік зміни відгуку каналу, отриманий у ході описаних вимірювань (крива 1). Ламаний вид цієї кривої свідчить як про наявність випадкової похибки, яка не перевищувала  $\pm 1$  од. відносно середньої величини відгуку 133 886 од., так і про неповне усунення специфічної диференціальної нелінійності. Складова випадкової похибки від впливу внутрішніх та зовнішніх завад при проведенні описаних досліджень не перевищувала  $\pm 0,5$  од. відліку ( $\pm 1$  ppm від повного діапазону вимірювання) при тривалості одного циклу вимірювання 1,5 с. Для порівняння зазначимо, що при використанні тільки одного АЦП у цьому каналі без модуляції інформативного сигналу і з усередненням даних за такий же час відповідна складова випадкової похибки становила  $\pm 1$  од. відліку, а в зонах підвищеної дисперсії – до 2 од.

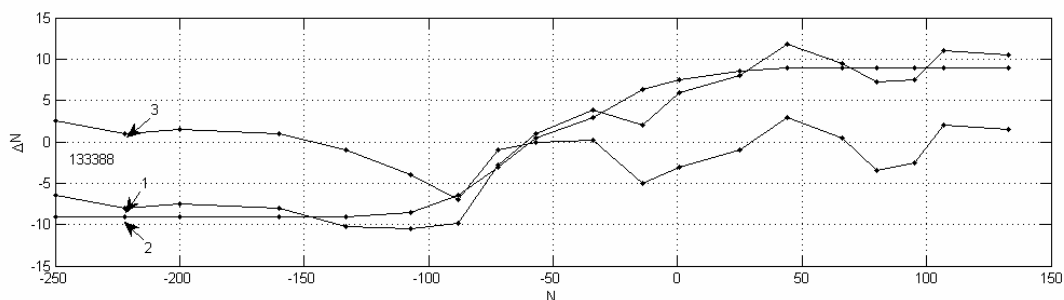


Рис. 5

Слід зазначити, що при дослідженнях нелінійності застосованим методом ковзної варіації, зміни відгуків можуть бути в два рази більшими, ніж диференціальна нелінійність, що викликала їх, оскільки результати перетворення в початковій і кінцевій точках варіації можуть відхилитися в різні боки від усередненої характеристики. Причина цього полягає в характері нелінійності в зонах підвищеної дисперсії, який ілюструється рис. 6. При розміщенні початкових і кінцевих точок варіації виду 1, 2 і 3 додаткова похибка від нелінійності відсутня, а у випадках 4 і 5 вона стає максимальною ( $|\Delta_{\max}| = 2\Delta_{\text{dif}}$ ).

Усереднена характеристика інтегральної нелінійності каналу зображена кривою 2. Її вигляд свідчить про те, що типова для інтегровувальних АЦП нелінійність, обумовлена абсорбцією конденсатора, не перевищує  $\pm 0,001\%$ . У той же час є зміни величин відгуків на варіації, якщо їх початкові та кінцеві точки розміщені по різні боки від нульової точки. Дослідження показують, що ці зміни залежать від зсуву нуля АЦП. Це явище пояснюється на рис. 7, де показано спрощену схему АЦП.

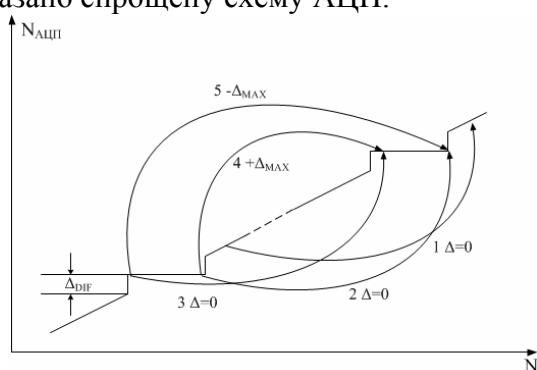


Рис. 6

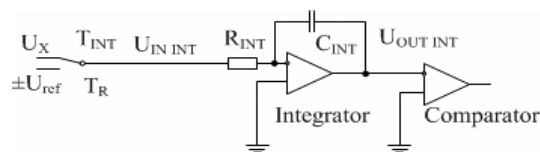


Рис. 7

Якщо знехтувати зміщенням нуля компаратора, то очевидно, що наявність напруги зсуву на інвертуючому вході інтегратора призведе до адитивної похибки інтегрування  $U_x$ , але також і до зміни струму розряду інтегратора від джерела  $U_{\text{ref}}$ . При додатних зсувах нуля АЦП на інвертуючому вході інтегратора є деяка від'ємна напруга. Тому струм розряду зменшується при додатних  $U_x$ , (оскільки в цьому випадку  $U_{\text{ref}}$  від'ємна) і збільшується для від'ємних  $U_x$ . Ці зміни призводять до мультиплікативного збільшення часу розряду інтегратора у першому випадку і його зменшення – у другому, тобто відповідно до множення або ділення результату вимірювання на фіксований коефіцієнт, який нескладно визначити. Такий

ефект не проявляється при однополярних сигналах. Якщо ж необхідно працювати у всьому динамічному діапазоні АЦП, можна кожен отриманий відлік коригувати на зазначені коефіцієнти. Результат такої корекції показано на рис. 5 у вигляді кривої 3. Відзначимо, що для такого режиму використання каналу його зведена похибка від нелінійності всіх видів становить близько 0,001 %.

З метою детальнішого дослідження впливу зон підвищеної дисперсії на специфічну диференціальну нелінійність *multi-slope* АЦП були досліджені невеликі ділянки характеристики перетворення на початку і в кінці її додатної і від'ємної частин шляхом вимірювань відгуків на варіацію вхідного сигналу при виконанні серій малих зсувів (приблизно на 20 од. відліку АЦП) початкової точки варіації. Для цього послідовно з постійним резистором  $R_x$  включався магазин опорів з дискретністю регулювання 0,01 Ом. Результати вимірювань на всіх ділянках виявилися схожими. Типовий вид графіка зміни відгуків на варіацію стану старшого розряду ЦАП показано на рис. 8.

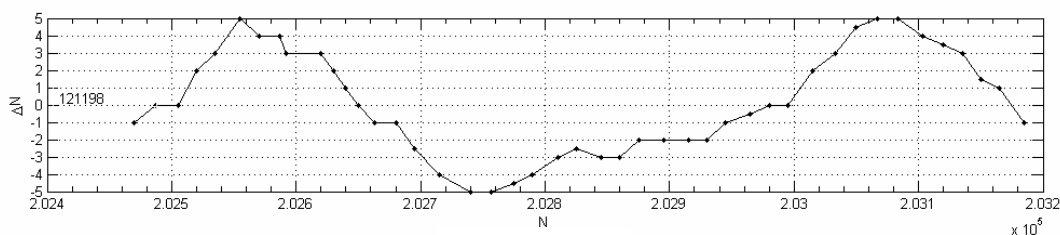


Рис. 8

Хвилеподібний характер залежності підтверджує, що причиною відхилень графіка на рис. 5 від усередненої лінії є вплив зон підвищеної дисперсії. Плавний характер цієї кривої пояснюється усередненням результатів трьох АЦП, а також модуляцією вимірюваного сигналу. Періодичність хвиль (близько 500 од. відліку АЦП) пов'язана зі співвідношенням періодичності зон підвищеної дисперсії (64 од. відліку) і амплітуди модуляційних зсувів (близько 60 од. відліку). Амплітуда хвиль відповідає подвоєному відхиленню результатів вимірювання відгуку на варіацію від їх очікуваних значень за усередненою характеристикою перетворення (121 198 од.), причина чого пояснювалась раніше.

На рис. 9 показано результати дослідження інтегральної нелінійності на ділянці характеристики від 0 до 200 000 іншим методом – порівнянням кута її нахилу на ділянках 0-10 000 і 0-200 000 за допомогою двох близьких за значенням зразкових мір опору ( $R_1 = 24758,8$  к;  $R_2 = 24752,3$  к).

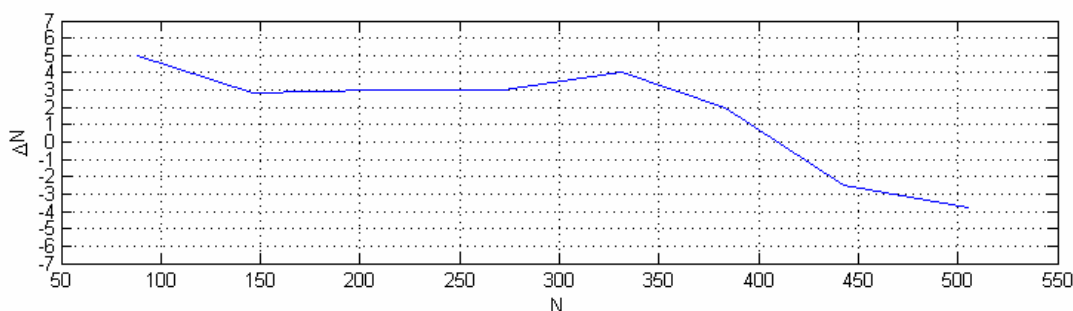


Рис. 9

Відгуки на їх підключення в якості  $Z_x$  вимірювалися для кожного окремо і для паралельного з'єднання. Сума відгуків на окреме підключення порівнювалася з відгуком на суму їх провідностей:  $N(G_1) + N(G_2) - N(G_1 + G_2) = \Delta N$ .

Вимірювання проводилися при зміщенні початкової точки по невеликій ділянці характеристики (від 90,6 до 505,5) для одночасної оцінки диференціальної нелінійності. Як і у випадку дослідження нелінійності методом однакових варіацій вхідного сигналу АЦП на різних ділянках характеристики перетворення, амплітуда змін  $\Delta N$  може удвічі перевищувати відхилення характеристики АЦП від ідеально лінійної, оскільки значення  $N(G_1) + N(G_2)$  і  $N(G_1 + G_2)$  можуть відхилитися через специфічну диференціальну нелінійність у різних на-

прямах. Для уникнення такого явища в робочому режимі приладів необхідно встановлювати нульову точку поза зонами підвищеної дисперсії. Результати дослідження змін відгуків вимірювального каналу на варіацію вхідного сигналу таким методом близькі до результатів, отриманих методом його ковзної варіації за допомогою ЦАП.

**Висновки.** За рахунок розробленого методу обробки інформаційного сигналу і більш повного використання його енергії підвищено завадостійкість і досягнуто приблизно трикратне підвищення розрізняювальної здатності вимірювального каналу.

Для дослідженого типу *multi-slope* АЦП просте усереднення результатів вимірювання за трьома точками характеристики перетворення дає можливість знизити вплив його специфічної диференціальної нелінійності приблизно в три рази до рівня близько 0,001 %. При використанні інтелектуальних алгоритмів обробки результатів модуляції вимірюваного сигналу можливе додаткове підвищення лінійності характеристики перетворення.

Зсув нуля інтегратора високочутливих інтегрувальних АЦП викликає, крім адитивної похибки, відмінність нахилів додатної та від'ємної частин характеристики перетворення. Пов'язані з цим мультиплікативні похибки та інтегральну нелінійність характеристики можна усунути запропонованим методом корекції результатів вимірювань.

1. Лепіх Я.І., Гордієнко Ю.О., Дзядевич С.В., Дружинін А.О., Євтух А.А., Ленков С.В., Мельник В.Г., Романов В.О., Проценко В.О. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / За ред. Я.І. Лепіха, В.О. Романова. – Одеса: Астропринт, 2011. – 352 с.
2. Мельник В.Г., Семенчычева Л.Н. Повышение точности узкодиапазонных импедансометрических каналов прямого преобразования // Техн. электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 73–80.
3. А.с. 1739305 СССР. Измеритель комплексных сопротивлений / М.Н. Сурду, В.Г. Мельник, Б.А. Кромпляс, Н.Е. Изволенская. – Опубл. 1992. Б.И. №21.
4. Goeke W.C. An 81/2-Digit Integrating Analog-to Digital Converter With 16 Bit, 100,000 Sample-per-Second Performance / Hewlett-Packard Journal. April 1989 Vol. 40, N 2. – P. 8–15.
5. Пат. US 51011206 (A) – 1992 – 03 – 31 – Integrating analog-to-Digital Invertor Converter. Inventor: Riedel Ronald J [US]. Applicant: Hewlett Packard Co (US).

УДК 621.317

**В.Г. Мельник**, канд. техн. наук, **А.В. Слицкий**, асп.

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Помехоустойчивый прецизионный канал преобразования информативных сигналов для импедансометрических систем**

*Изложены новые результаты исследований, полученные в отделе электрических и магнитных измерений в 2014 г., по направлению повышения точности и помехоустойчивости импедансометрических каналов систем управления, мониторинга и диагностики. Рассмотрен простой и эффективный преобразовательный канал для измерителей параметров импеданса на основе интегрирующих АЦП типа multi-slope. Показана возможность трехкратного повышения его информационного КПД и устранения специфической для этого типа АЦП нелинейности преобразования с помощью модуляции измерительного сигнала и интеллектуальной обработки откликов на эту модуляцию. Приведены результаты метрологических исследований приборов, которые позволили выявить проявления и устранить причины нелинейностей характеристики преобразования. Библ. 5, рис. 9.*

**Ключевые слова:** измерение, импеданс, погрешность, нелинейность, аналого-цифровой преобразователь.

**V.G. Melnyk, O.V. Slitskiy**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Precise, noise-immune canal for transformation of informative signals in the impedance-measuring systems**

*Presented the new research results, obtained in the department of electrical and magnetic measurements in the field of improving the accuracy and noise immunity of impedans-measurig instruments. The structure and base of functioning of a simple and effective channel are described for converting impedance parameters with integrating, using multi-slope ADC. The possibility of a threefold increase its information efficiency and to eliminate specific for this type of ADC nonlinearity by the modulation under intellectual processing of the measuring signal and responses to this modulation. The results of metrological research of the channel which reveal manifestations and causes of non-linearities of conversion are discussed. References 5, figures 9.*

**Key words:** measuring impedance, error, non-linearity, analog-to-digital converter.

Надійшла 20.04.2015

Received 20.04.2015