

# SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

---

# СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

---

---

УДК 577.15.08

## ПОВЫШЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

*В. Г. Мельник, А. В. Слицкий*

Институт электродинамики НАН Украины пр. Победы 56, г. Киев-57, 03680,  
Украина, e-mail: melnik@ied.org.ua

## ПОВЫШЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

*В. Г. Мельник, А. В. Слицкий*

**Аннотация.** В статье рассматриваются возможности устранения влияния на точность измерительного канала наличия на его характеристике преобразования зон с аномально повышенной дисперсией получаемых результатов, что имеет место при комбинированном, высокодискретном, аналого-цифровом преобразовании сигналов в мостах переменного тока, в частности, при использовании интегрирующих АЦП МАХ-132 с изменяемой скоростью разряда. Предложенные методы распознавания этих зон, с которыми связана специфическая нелинейность преобразования в высокочувствительных системах с импедансными сенсорами, позволяют реализовать интеллектуальные алгоритмы измерений, существенно повысить разрешающую способность и снизить погрешности приборов.

**Ключевые слова:** мост переменного тока, характеристика преобразования, нелинейность, интегрирующие АЦП

## ПІДВИЩЕННЯ ЛІНІЙНОСТІ ВИСОКОЧУТЛИВИХ ІМПЕДАНСОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ

*В. Г. Мельник, О. В. Сліцький*

**Анотація.** У статті розглядаються можливості усунення впливу на точність вимірювального каналу наявності на його характеристиці перетворення зон з аномально підвищеною дисперсією отриманих результатів, що має місце при комбінованому, високодискретному, аналого-цифровому перетворенні сигналів в мостах змінного струму, зокрема, при використанні інтегруючих АЦП MAX-132 зі змінною швидкістю розряду. Запропоновані методи розпізнавання цих зон, з якими пов'язана специфічна нелінійність перетворення в високочутливих системах з імпедансними сенсорами, дозволяють реалізувати інтелектуальні алгоритми вимірювань, істотно підвищити розрізнявальну здатність і знизити похибки приладів.

**Ключові слова:** міст змінного струму, характеристика перетворення, нелінійність, інтегруючі АЦП

## INCREASING OF LINEARITY OF THE HIGHLY SENSITIVE IMPEDANCE-MEASURING SYSTEMS WITH SENSORS

*V. G. Melnyk, A. V. Slitskiy*

**Annotation.** In the article discussed the possibility of eliminating the influence on the accuracy of the measuring channel of presence on the its conversion characteristic of the zones with abnormally increased dispersion of the results, as is the case with the combined, highly-discrete, analog-to-digital conversion of signals in the AC bridges, in particular, when is using the integrating ADC MAX-132 with multi-slope of discharging. The proposed methods of recognition of these zones, which are associated with the peculiar nonlinearity of the high-sensitivity systems with impedance sensors, allow realize the smart measurement algorithms, significantly improve resolution and reduce instrument error.

**Keywords:** AC Bridge, characteristic of conversion, nonlinearity, the integrating ADC

**Введение.** При технологическом контроле, мониторинге, диагностике и аналитических исследованиях с применением импедансных сенсоров часто осуществляется регистрация массивов параметров динамических процессов, для чего требуется широкий диапазон преобразования сигналов, высокие быстродействие, чувствительность и разрешающая способность. Для увеличения информационной производительности измерений применяют комбинированное высокодискретное (20 и более двоичных разрядов) аналого-цифровое преобразование сигналов в мостах переменного тока [1, 2]. Оно включает быстрое, низкодискретное, и медленное, высокодискретное, сравнения измеряемого и образцового сигналов. При этом, на определенных, периодиче-

ски повторяющихся уровнях сигналов, может возникать повышенная дисперсия получаемых результатов из-за неустойчивости отсчета в виде скачков на постоянную величину, связанная с воздействием шумов при низкодискретном сравнении. Такая неустойчивость может возникать как при уравнивании моста из-за нелинейности его уравнивающего элемента (ЦАП), так и при измерении его выходного сигнала с помощью АЦП. В частности, это происходит в интегрирующих АЦП с переменной скоростью разряда [3], в том числе в интегральном «multi-slope ADC» типа MAX-132, который удобен для применения в импедансометрической аппаратуре. При усреднении достаточно большого числа отсчетов это приводит к специфической диффе-

ренциальной нелинейности преобразования, которая в несколько раз снижает разрешающую способность приборов. Она может быть уменьшена методами, предложенными в [2, 4]. Однако эти методы неэффективны при быстро изменяющихся сигналах. В работе, на примере особенностей АЦП MAX - 132, рассматривается новый метод, основанный на распознавании и исключении из характеристики преобразования зоны неустойчивости. Он заключается в выявлении расщепления области распределения вероятностей  $P$  получаемых значений  $N_x$  измеряемого сигнала  $U_x$  на две разделенные части, отстоящие друг от друга на величину указанного скачка, что характерно для этой зоны. Необходимые вычисления производятся в процессе усреднения результатов преобразований для снижения влияния шумов, поэтому не требуют дополнительных затрат времени. При попадании рабочей точки в такую зону производится ее калиброванное смещение, которое учитывается при обработке результатов.

**Предлагаемый метод измерения.** Специфический характер проявления внутренних помех в рассматриваемом виде АЦП не позволяет бороться с ними обычными методами: усреднением результатов нескольких преобразований и/или предварительным усилением преобразуемых сигналов. Усиление измеряемых аналоговых сигналов в импедансометрическом канале крайне нежелательно, поскольку снижает его точность, особенно при повышении рабочих частот.

В [2] была показана принципиальная возможность для устройств с указанным АЦП практически полностью устранить указанную нелинейность выполнением серии измерений при калиброванных смещениях рабочей точки вдоль характеристики преобразования с последующим их учетом при обработке результатов. Однако, при этом суммарное число необходимых отсчетов многократно превышало то их количество, которое требуется для сведения к оптимальному минимуму проявления обычных шумовых помех, сильно увеличивая время измерения, что неприемлемо для сенсорных систем. В связи с этим, были разработаны варианты нового, интеллектуального, метода измерения, позволяющего оптимизировать со-

четание точности и быстродействия в каналах с многоразрядными интегрирующими АЦП. Суть этого метода заключается в сканировании участка характеристики преобразования АЦП, прилегающей к текущей рабочей точке, путем калиброванных вариаций измеряемого сигнала с помощью дополнительного ЦАП в мостовой цепи, распознавании зон с повышенной специфической дисперсией результатов и исключения их использования при выполнении измерений [4]. Основные принципы возможных реализаций такого метода рассмотрим ниже.

**Структура измерительного канала.** На Рис. 1 представлена модифицированная функциональная схема импедансометрического канала с компенсационно-мостовой измерительной цепью, детально рассмотренного в [2]. Его основными элементами являются: генератор  $G$  тестового сигнала  $U_g$ , подаваемого на объект измерения ( $C_x, G_x$ ), образцовая ветвь моста с мерами активной проводимости  $G_0$  и емкости  $C_0$ , на которые подается напряжение с регулируемого делителя напряжения ( $OУ1$  и ЦАП1), преобразователь ток-напряжение ПТН, регулируемый усилитель сигнала неравновесия моста на  $OУ3$ , синхронный детектор СД для выделения составляющих сигнала неравновесия моста по параметрам  $C$  и  $G$ , который управляется опорными сигналами  $U_{сф}$  или  $U_{кв}$  (синфазным и квадратурным с  $U_g$ ), АЦП с источником опорного напряжения  $U_0$ , микроконтроллер МПК и регистр управления РУ. Для смещения положения рабочей точки на шкале АЦП служит ЦАП2, включенный параллельно уравнивающему элементу мостовой цепи (ЦАП1). Его регулируемая проводимость подключена так же, как и регулируемая проводимость основного ЦАП1 – к инвертирующему (токовому) входу операционного усилителя  $OУ1$ . Однако напряжение на эту проводимость подается через делитель  $Rd1, Rd2$ . Коэффициент деления этого делителя выбран таким, чтобы изменение кода управления ЦАП2 на единицу младшего разряда вызывало изменение положения рабочей точки на шкале АЦП (выходного кода АЦП) на единицу дискретности отсчета АЦП.

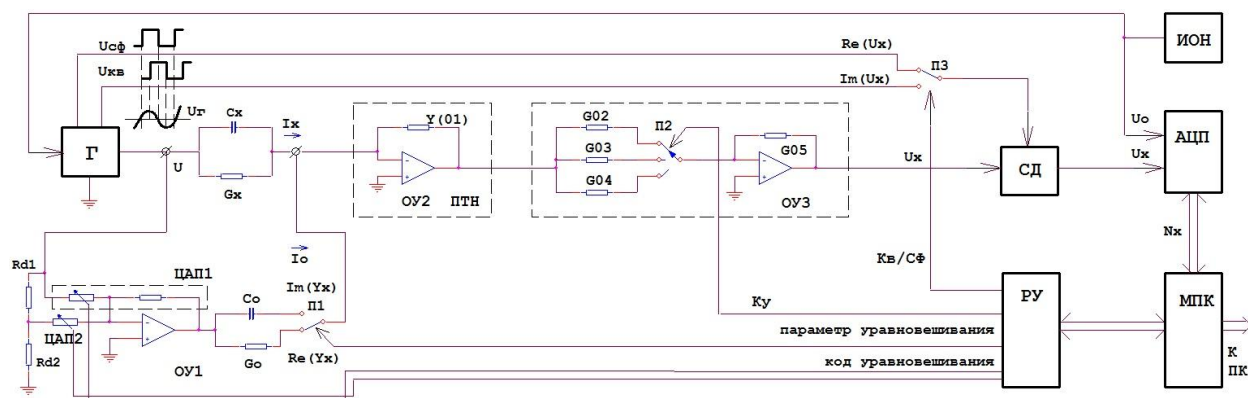


Рис. 1. Функциональная схема импедансометрического канала.

ЦАП2 управляется контроллером прибора, который, таким образом, может производить известное смещение положения рабочей точки на характеристике АЦП, а затем оценивать параметры случайной составляющей измеряемого сигнала. При этом можно классифицировать характер распределения значений, получаемых с помощью АЦП отсчетов и значение их дисперсии.

**Экспериментальные исследования функции преобразования.** Типичный характер разброса результатов преобразования на участке характеристики размером около 200 ед. дискретности, полученный при исследовании трех образцов АЦП, показан на Рис. 2, а изменения усредненных результатов - на Рис. 3. Диаграмма получена сканированием этого участка путем смещения рабочей точки модуляционным ЦАП шагами с дискретностью около 1 ед. отсчета АЦП.

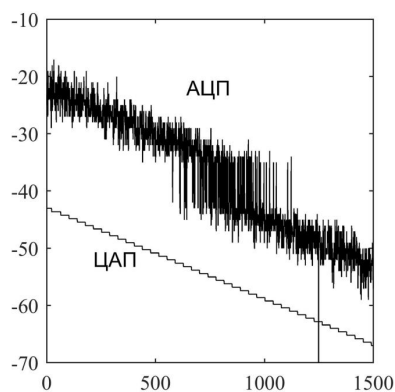


Рис. 2а. Типичный характер разброса результатов преобразования

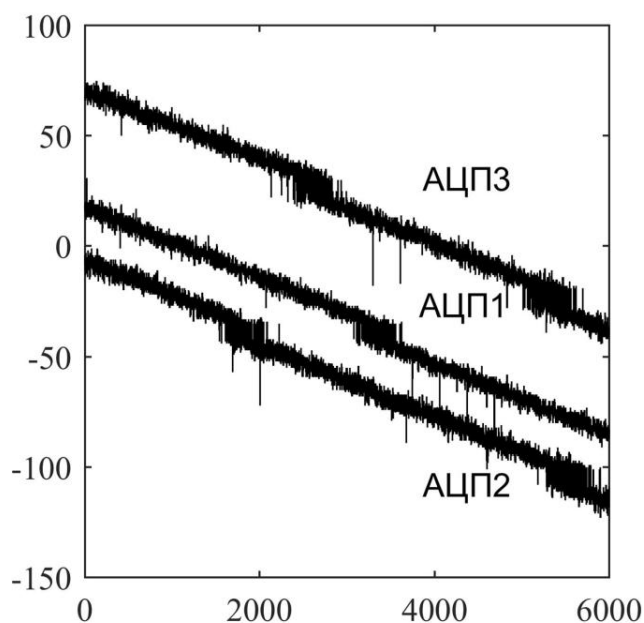


Рис. 2б. Типичный разброс результатов преобразования, полученный при исследовании трех образцов АЦП.

Разброс результатов в «нормальной» области после отсеивания «аномальных» единичных выбросов носит случайный шумоподобный характер с дисперсией до  $\pm 4$  ед. В «аномальной» зоне наблюдаются скачки результатов между двумя малоизменяющимися значениями с разницей до 20 ед. При выполнении измерений указанная дифференциальная нелинейность может проявляться как ложный отклик, что искажает получаемый результат.

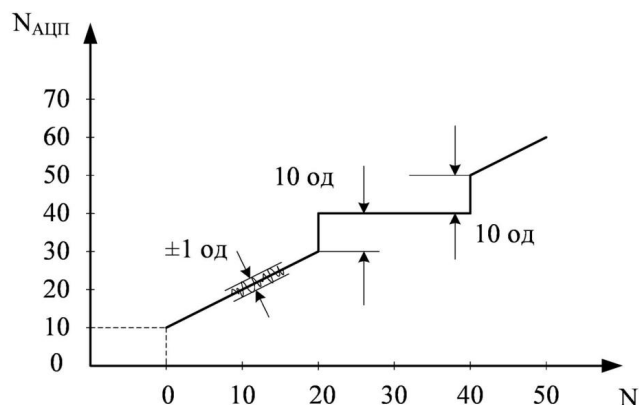


Рис. 3. Изменения усредненных результатов преобразования.

На Рис. 4 схематически изображено распределение вероятностей значений получаемых отсчетов при расположениях рабочей точки на «нормальной» участке характеристики преобразования и «аномальной» области с повышенной дисперсией получаемых отсчетов. Эти распределения соответствуют результатам измерений на участке характеристики АЦП, которые схематически изображены на Рис. 5. Обратим внимание, что распределение значений получаемых отсчетов в «аномальной» области не меняется на всем ее протяжении, что и объясняет возникновение специфической дифференциальной нелинейности. Наличие двух областей расположения вероятных значений отсчетов в «аномальной» зоне объясняет их повышенную дисперсию, а «недвижимость» этих областей в этой зоне - характерную ступеньку на графике, представлены на Рис. 3.

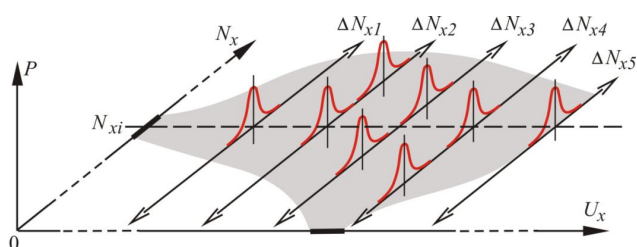


Рис. 4. Распределение вероятностей значений получаемых отсчетов.

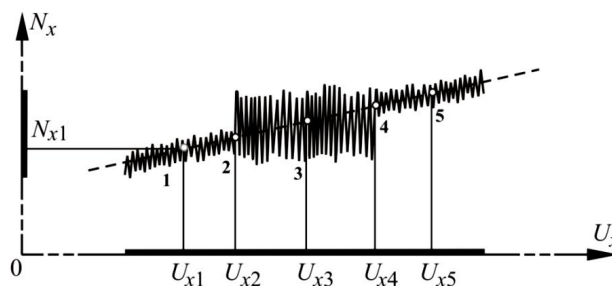


Рис. 5. Результаты измерений на участке характеристики АЦП в «аномальной» области.

**Способы реализации предлагаемого метода.** Во избежание влияния нарушений линейности характеристики преобразования в «аномальных» зонах на получаемые результаты, в процессе измерений проводится сканирование с помощью ЦАП2 некоторого участка характеристики преобразования АЦП, по указанным признакам находятся зоны повышенной дисперсии, а затем рабочая точка устанавливается на «нормальном» участке характеристики между такими зонами. Значение кода управления ЦАП2, соответствующее проведенному смещению рабочей точки, учитывается при обработке результатов измерений. Следует отметить, что размер и расположение «аномальных» зон на характеристике преобразования АЦП являются фиксированными, поэтому после начала измерений достаточно однократного сканирования ее рабочего участка. В дальнейшем, при изменениях измеряемых сигналов в небольших пределах, можно быстро смещать рабочую точку при вероятности его попадания на «аномальный» участок.

Алгоритм распознавания «аномального» участка характеристики преобразования может базироваться на фиксации проявления специфической дисперсии отсчетов с расщеплением функции распределения вероятностей отклонений их значений от среднего на два участка, разнесенных на 10 – 15 единиц дискретности. Одним из признаков попадания рабочей точки на такой участок может быть существенное возрастание (100% и более) средней разницы  $\Delta N_{CP}$  смежных отсчетов  $N_i$  и  $N_{i+1}$  в выборке из  $n$  значений для их усреднения (оптимально 8 – 16 отсчетов). Ее значе-

ние может быть найдено из выражения:

$$\Delta N_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} (N_{i+1} - N_i)}{n-1}$$

а усредненный результат измерений определяется выражением:

$$N_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} N_i}{n}.$$

Для уменьшения влияния на результаты усреднения скачков значений отсчетов под влиянием одиночных импульсных помех и отдельных (немногочисленных) скачков на краях «аномального» участка характеристики, целесообразно исключать такие отсчеты из усредняемых данных.

Признаком такого «аномального» отсчета может быть значительное (примерно в 2 и более раза) повышение разницы его значения со значениями смежных отсчетов  $\Delta_i = N_{i-1} - N_i$  и  $\Delta_{i+1} = N_i - N_{i+1}$  по сравнению с  $\Delta N_{CP}$ . Оптимальное пороговое значение увеличения  $\Delta_{i,i+1}$  по сравнению с  $\Delta N_{CP}$  может определяться экспериментально для конкретного устройства. То же самое касается допустимого числа скачков отсчетов в усредняемой выборке. Ориентировочно, для отнесения такой выборки к «аномальной» их доля должна превышать 20 – 30%.

Результаты экспериментальных исследований распределения вероятностей значений отсчетов для 3 точек на «нормальных» и «аномальных» участках характеристики преобразования АЦП МАХ-132 представлены на Рис. 6.

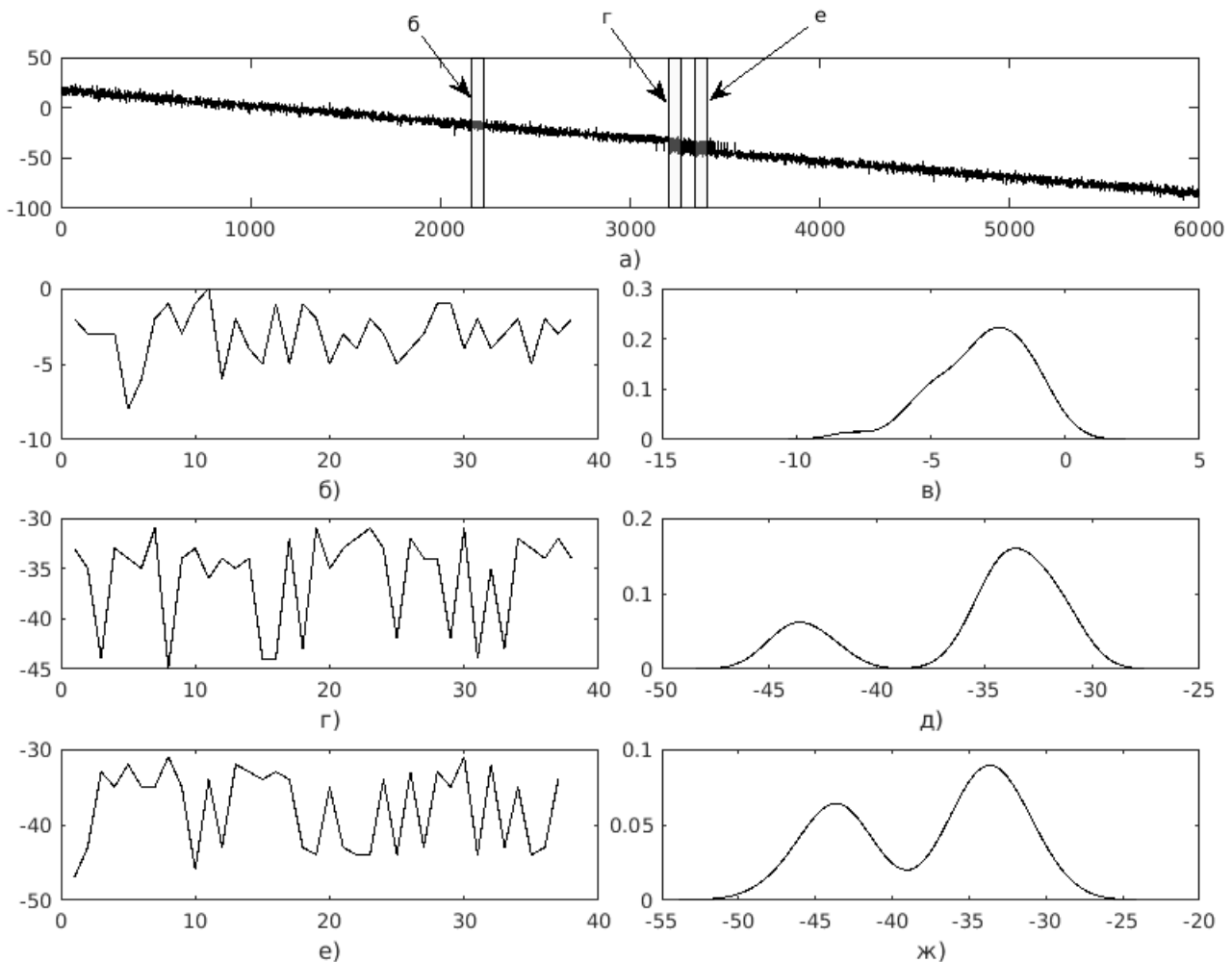


Рис. 6. Распределения вероятностей значений отсчетов для 3 точек на «нормальных» и «аномальных» участках характеристики преобразования.

На рисунках бб, бг, бе изображены временные диаграммы полученных выборок (38 отсчетов), соответствующие участкам, отмеченным на Рис. 6а. На рисунках бв, бд, бж соответственно временным диаграммам изображено распределение вероятностей получаемых значений отсчетов. В Таблице 1 приведены значения  $\Delta N_{CP}$  на указанных участках.

При анализе результатов этих исследований особый интерес представляют краевые зоны «аномального» участка характеристики преобразования (участок г, рис. 6г,е). В них  $\Delta N_{CP}$  может изменяться в широких пределах. Выбор порогового значения  $\Delta N_{CP}$  для классификации положения рабочей точки на «аномальном» участке может определяться экспериментально для конкретного устройства.

Таблица 1  
Таблица значений средней разницы  $\Delta N_{CP}$  смежных отсчетов  $N_i$  и  $N_{i+1}$

№ тчк	1	2	3
$\Delta N_{CP}$	2,0541	5,3421	6,08

В ходе исследований рассматриваемой проблемы предложен еще один, модуляционный метод уменьшения влияния специфической дифференциальной нелинейности на точность измерений. Его суть заключается в непрерывной ступенчатой модуляции измерительного сигнала в “+” и в “-” относительно рабочей точки на равные величины, несколько большие, чем ширина зоны повышенной дисперсии. После усреднения необходимого для подавления шумов числа отсчетов на каждой из ступеней модуляции, некоторые из ступеней полученного оцифрованного отклика, оказываются искаженными относительно формы исходного модулирующего сигнала. Полученные отклики на весь цикл модуляции классифицируются (распознаются) по этому признаку. Таким образом, получается массив данных для усреднения результатов преобразования, в котором известно, какие данные недостоверны. Они могут быть исключены из усредняемых результатов или заменены данными, полученными интерполяцией (экстраполяцией)

по результатам преобразований на смежных ступенях модулирующего сигнала.

Обработка модулированного информативного сигнала происходит в режиме реального времени и не увеличивает общего времени накопления данных, необходимого для достаточного подавления шумовых помех. Возможные варианты откликов при 3-х ступенчатой модуляции представлены на Рис. 7. Ниже приведены математические выражения, позволяющие классифицировать их.

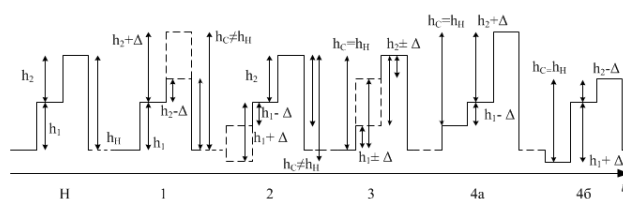


Рис. 7. Возможные варианты откликов при 3-х ступенчатой модуляции.

При экспериментальных исследованиях разработанного канала величина модуляционного шага была выбрана так, чтобы отклик на него был равен 20 ед. отсчета АЦП. При такой его величине сводится к минимуму вероятность искажения 2-х ступеней в модуляционном цикле. На фрагменте “Н” диаграммы показан “нормальный цикл”, когда все значения модулированного сигнала располагаются между зонами повышенной дисперсии. В этом случае величины откликов на модуляционный шаг ( $h_1$  и  $h_2$ ) примерно одинаковы (разница между ними меньше установленного порогового значения  $\Delta_n$ ), а их сумма близка (с погрешностью не более  $\Delta_n$ ) к 40 единицам отсчета АЦП ( $h_n$ ). На фрагментах диаграммы 1 – 3 изображены случаи искажения верхней, нижней или средней ступеней. На фрагментах 4а и 4б показаны маловероятные случаи (возможные при повышенном уровне помех), когда искажены обе крайние ступени: одна в “+”, другая в “-”. Характер специфической дифференциальной нелинейности допускает только такие варианты.

Задача распознавания вида отклика решается проверкой выполнения следующих неравенств (для вариантов откликов на Рис. 7):

$$\begin{aligned}
 & \text{Н: } |h_1 - h_2| < \Delta_n \text{ и } |h_1 + h_2 - 40| < \Delta_n; \\
 & \text{1 или 2: } |h_1 - h_2| > \Delta_n \text{ и } |h_1 + h_2 - 40| > \Delta_n;
 \end{aligned}$$

- 1:  $|h1-20| < \Delta_n$  и  $|h2-20| > \Delta_n$ ;
- 2:  $|h1-20| > \Delta_n$  и  $|h2-20| < \Delta_n$ ;
- 3:  $|h1-h2| > \Delta_n$  и  $|h1+h2-40| < \Delta_n$ ;
- 4:  $|h1-h2| > \Delta_n$  и  $|h1+h2-40| < \Delta_n$ .

Как видим, приведенные критерии не позволяют отличить между собой отклики видов 3 и 4. Чтобы их дифференцировать необходимо, использовать имеющуюся информацию о дисперсии усредняемых отсчетов АЦП для средней ступени. Для вида отклика “3” эта дисперсия повышена, поэтому среднее значение отсчетов за цикл берется по двум крайним ступеням. Для отклика вида 4 за средний результат цикла принимается значение сигнала на средней ступени. В последнем случае имеет место небольшое возрастание случайной погрешности, за счет уменьшения числа усредненных результатов, что, однако существенно меньше погрешности из-за дифференциальной нелинейности. В случаях откликов 1 и 2 среднее значение сигнала за цикл определяется усреднением данных на ступенях, между которыми разница близка к 20, и экстраполированного среднего значения сигнала на искаженной ступени. Здесь представлен простейший алгоритм распознавания. В реальной программе он должен быть несколько сложнее, так как под влиянием помех или быстрых изменений информативного сигнала могут продуцироваться дополнительные комбинации высот ступенек откликов. Такие результаты могут быть исключены как «аномальные» или обработаны по более «умным» алгоритмам, в частности, с целью улучшения динамических свойств канала.

Модуляционный метод хорошо подходит и для устранения погрешностей, связанных с влиянием нелинейности основного уравнивающего элемента моста (ЦАП1 на Рис.1) при использовании комбинированного метода измерения [1]. В этом случае модулируются состояния младших разрядов кода управления этого ЦАП. Экспериментальные исследования показали, что оценка линейности характеристики 12-разрядного ЦАП может быть выполнена с погрешностью не более 5% от дискретности уравнивания моста его младшим разрядом.

**Результаты метрологических исследований.** Для оценки эффективности предложенных технических решений был изготовлен экспериментальный образец импедансометрического канала по схеме на Рис. 1 с использованием АЦП МАХ-132 и проведены исследования его характеристики преобразования во всем рабочем диапазоне измерения (значения выходных кодов  $N_x$  от  $-260000$  до  $+260000$ ). Использовался метод 3-ступенчатой модуляции. Сканирование характеристики производилось изменением объекта измерения (прецизионные резисторы с сопротивлением от 7,5 кОм до 100 кОм) и кода управления основным уравнивающим элементом (ЦАП1). Шаг сканирования составлял 15 единиц дискретности. В процессе сканирования определялись изменения разницы усредненных отсчетов при включенном и при выключенном старшем разряде ЦАП1, чем обеспечивалась идентичность тестовых воздействий с относительной погрешностью не хуже  $10^{-5}$ . Случайная погрешность не превышала 0,5 ед. дискретности. Среднее значение указанной разницы составляло 121207 единиц дискретности, максимальные отклонения не превышали 5 единиц (см. Рис. 8). Представленный на указанном рисунке волнообразный характер изменений величины откликов на вариацию старшего разряда ЦАП сохранялся во всем рабочем диапазоне АЦП. Таким образом, приведенная к полной шкале погрешность от дифференциальной нелинейности не превышала 0,001%, что примерно в 4 – 5 раз меньше дифференциальной нелинейности без применения предложенного метода. Оставшаяся дифференциальная нелинейность в виде волнообразных вариаций с амплитудой около 5 и периодом около 500 единиц дискретности шкалы (она остается таковой во всем диапазоне измерения) объясняется отмеченной выше недостаточной «интеллектуальностью» использованного метода. Она может быть улучшена путем описанного выше анализа характера дисперсии результатов преобразования АЦП.



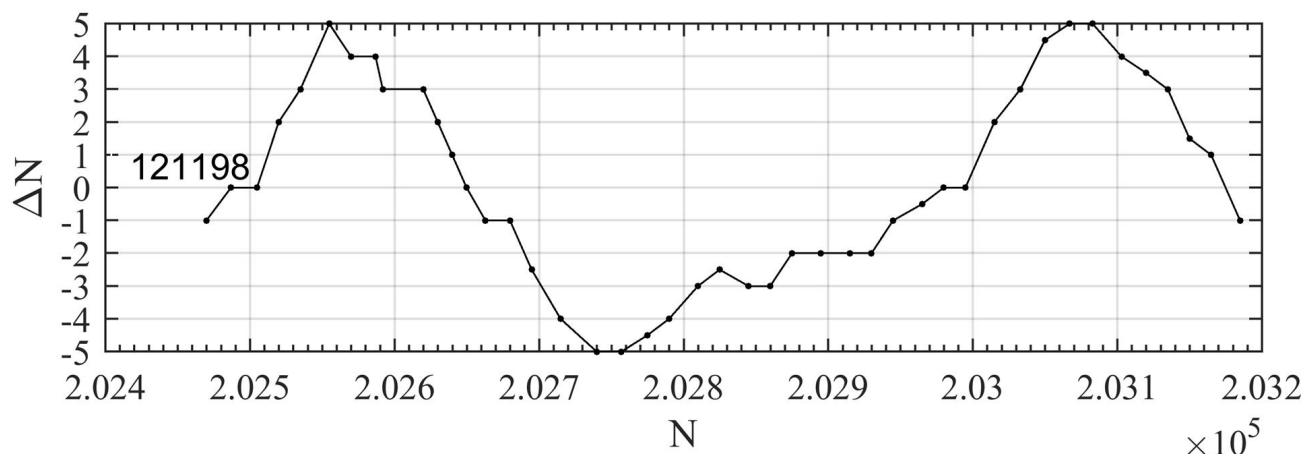


Рис. 8. Характер изменений величины откликов на вариацию старшим разрядом ЦАП.

**Выводы.** Предложены интеллектуальные методы распознавания участков дифференциальной нелинейности на характеристиках преобразования высокочувствительных измерителей параметров иммитанса с использованием мостовых схем и многоуровневых «multi-slope» АЦП путем калиброванной модуляции информативных сигналов на выходе моста дополнительным ЦАП и оценки дисперсии получаемых результатов. Разработанные методы обработки этих результатов и соответствующая коррекция обеспечивают снижение нелинейности преобразования сигналов до уровня 0,001% и относительной погрешности их измерения в декадном диапазоне до 0,01%. Это, в свою очередь, позволяет скорректировать нелинейность основного ЦАП моста и снизить полную относительную погрешность простых и недорогих измерителей параметров иммитанса до уровня не более 0,01%. Общая разрядность преобразования измерительного канала может достигать 24 двоичных разрядов.

### Список использованной литературы

- [1] Vasylenko A.D., Melnyk V.G., Novik A.I., Semenycheva L.N. Povyshenie razreshajushhej sposobnosti immitansometricheskikh kanalov // *Tekhnichna elektrodinamika*, № 1, 2013. S. 70 – 81. (in Russian).
- [2] Melnyk V.G., Semenycheva L.N. Povyshenie tochnosti uzkodiapazonnykh impedansometricheskikh kanalov prjamogo preobrazovanija // *Tekhnichna elektrodinamika*. – №3, 2011. S. 73-80. (in Russian).
- [3] Surdu M.N., Melnyk V.G., Krompljas B.A., Izvolenskaja N.E. Izmeritel kompleksnykh soprotivlenij // A.s. №1739305 (CCCR). MKIG 01 R 17/10. Zajavleno 29.05.1990 (№4846016/21). Opubl. 07.06.1992, Bjul. № 21. (in Russian).
- [4] Melnyk V.G., Slickij A.V. Zavadostijkij precizijnij kanal peretvorennya informativnih signaliv dlja impedansometrichnih sistem // *Praci Institutu elektrodinamiki Nacionalnoi akademii nauk Ukraini. Zbirnik naukovih prac. Vipusk 41*. Kiyv. 2015. S. 36 – 43. (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 08.06.2016 р.

UDC 577.15.08

## INCREASING OF LINEARITY OF THE HIGHLY SENSITIVE IMPEDANCE-MEASURING SYSTEMS WITH SENSORS

*V. G. Melnyk, A. V. Slitskiy*

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, 03680,  
Kiev - 57, Ukraine, tel. : + (380) 44 3662511, e-mail: melnik@ied.org.ua

### Summary

The article is devoted to development the principles of construction of the measurement channels of the systems with impedance sensors that combine high sensitivity, wide measuring range, accuracy and high speed. To do this, used the combination of the methods of measurement with rapid, low-discrete, and with slow, high-discrete, converting by comparing of measured and standard signals, which are implemented using the AC bridges and integrating ADC with variable discharge rate. In such devices, on certain levels of signals, some instability of readings may occur due to exposure to noise at the low-discrete comparison. This leads to the presence on the conversion characteristic of the channel of evenly spaced narrow zones with abnormally elevated dispersion of results. Such dispersion is the cause of emergence in these areas of the peculiar differential nonlinearity under averaging the data obtained. The possibilities of eliminating the impact of such circumstances on the accuracy of the measuring channel are discussed in the article. The proposed methods of detection of instability zones are based on the analysis of the form of responses on the stepped form modulation of the measurement signals in the bridge circuit, and the probability distribution of the obtained data values.

Criteria for such analysis, articulated in the article, allow doing it in real time, simultaneously with averaging of the results of measurement and with another data processing. The principles of construction of the measurement channel described in this work allow realize the intelligent measurement algorithms, significantly improve resolution and reduce the error of the instrument without noticeable loss of performance. The article presents experimental data, confirming the possibility reducing of the non-linearity of the sensor signal conversion to the level of 0.001% and the relative error of measurement in the ten-fold range of the results change to 0.01%.

**Keywords:** AC Bridge, characteristic of conversion, nonlinearity, the integrating ADC

УДК 577.15.08

## ПІДВИЩЕННЯ ЛІНІЙНОСТІ ВИСОКОЧУТЛИВИХ ІМПЕДАНСОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ

*В. Г. Мельник, О. В. Слицкий*

Інститут електродинаміки НАН України, просп. Перемоги, 56, 03680, м. Київ-57,  
Україна, тел.: +(380) 44 3662511, e-mail: melnik@ied.org.ua

### Реферат

Стаття присвячена розробці принципів побудови вимірювальних каналів систем з імпедансними сенсорами, які поєднують високу чутливість, широкий діапазон виміру, точність і високу швидкодію. Для цього застосовуються комбіновані методи вимірювання зі швидким, низько дискретним, і повільним, високо дискретним, порівнянням вимірюваного і зразкового сигналів, які реалізуються з використанням мостів змінного струму та інтегруючих АЦП зі змінною швидкістю розряду. В таких приладах на певних рівнях сигналів може виникати деяка нестійкість їх перетворення через вплив шумів при низько дискретному порівнянні. Це призводить до наявності на характеристиці перетворення каналу рівномірно розподілених вузьких зон з аномально підвищеною дисперсією одержуваних результатів. Така дисперсія є причиною виникнення в цих зонах специфічної диференціальної нелінійності при усередненні отриманих даних. У статті розглядаються можливості усунення впливу таких явищ на точність вимірювального каналу. Запропоновані методи розпізнавання зон нестійкості засновані на аналізі форми відгуків на ступінчасту модуляцію вимірювального сигналу в мостовому колі і характеру розподілу ймовірностей значень одержуваних даних. Критерії для такого аналізу, сформульовані в статті, дозволяють проводити його в реальному часі, одночасно з усередненням результатів вимірювальних перетворень і іншою обробкою даних. Принципи побудови імпедансометричного каналу, які описані в роботі, дозволяють реалізувати інтелектуальні алгоритми вимірювань, істотно підвищити розрізнявальну здатність і знизити похибки приладів без помітного зниження їх швидкодії. У статті наводяться експериментальні дані, що підтверджують можливість зниження нелінійності перетворення сигналів сенсорів до рівня 0,001% і відносної похибки їх вимірювання в декадному діапазоні змін до 0,01%.

**Ключові слова:** міст змінного струму, характеристика перетворення, нелінійність, інтегруючі АЦП