

УДК 621.317.733: 621.314

В.Н. Зиньковский, М.А. Крюков, И.В. Руженцев, С.Н. Сакало

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина*

## ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МУЛЬТИМЕТРА НА БАЗЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

*В работе рассмотрены особенности такого типа измерительных приборов, как мультиметры на базе цифровой обработки сигналов, проанализирована его структура. Указаны принципиальные отличия измерения при помощи цифровой обработки сигналов от обычного измерения при помощи цифровых измерительных приборов. Также приведены формулы, при помощи которых осуществляется обработка сигнала, в частности, формулы для расчёта среднеквадратического значения напряжения, коэффициента гармоник, мощности. Рассмотрен возможный подход к оцениванию неопределённости измерений при помощи мультиметра.*

**Ключевые слова:** мультиметр, цифровая обработка сигналов, микропроцессор.

### Введение

Для обеспечения штатного режима работы электрооборудования – бытовой техники, электротранспорта, промышленного оборудования, – необходимо контролировать режим электропитания, а именно действующее значение питающего напряжения, его частоту, а также содержание высших гармоник. Для этого требуется производить измерительный контроль параметров электрической энергии для сетей промышленной частоты, а также автономных источников питания (дизельных генераторов, систем бесперебойного питания). Контроль напряжения необходим, поскольку в точках подключения потребителей возможны дефекты распределительных сетей, «выбросы» гармоник, генерируемых импульсными источниками питания, и т.д. В случае если не обеспечивается своевременный контроль и регулировка параметров напряжения питания, может случиться либо работа оборудования в нештатном режиме, либо выход его из строя. Следовательно, задача измерительного контроля качества электропитания является актуальной и важной задачей.

Также во многих случаях перед потребителем возникают сопутствующие задачи, решение которых позволяет в комплексе оценить состояние оборудования – это измерение мощности, потребляемой оборудованием, а также сдвига фаз между напряжением и током.

Третья группа задач, которые часто возникают при измерительном контроле, это мониторинг, хранение, статистический анализ, обработка совокупности данных, которые были накоплены в процессе измерений за определенный промежуток времени. Решение этой задачи позволяет выбрать оптимальный режим работы оборудования, проанализировать недостатки системы питания, разрешать спорные вопросы с поставщиками электрической энергии и т.д. Следовательно, эти задачи также являются важными и актуальными.

Вышеперечисленные задачи могут быть решены тремя способами. Первый из них основан на примене-

нии традиционных аналоговых и цифровых измерительных приборов (для измерения какой-либо одной физической величины) и регистраторов, не взаимосвязанных между собой. Он применяется с момента возникновения измерений в данной области, и развитие данного направления в настоящее время замедляется, ибо эти приборы уже практически дошли до предела совершенства. У данного способа контроля существует несколько недостатков. Во-первых, он практически лишен возможности автоматизации, сигнализации о внештатных ситуациях, автоматического регулирования хода выполнения измерения. Во-вторых, вести статистику, осуществлять хранение и обработку накопленной информации зачастую приходится вручную. Все это ведет к тому, что труд оператора сложен и полон рутинных операций, эффективность труда низкая, а если объекты контроля распределены в пространстве, то может потребоваться несколько операторов. К тому же необходимо иметь по одному измерительному прибору на каждую измеряемую величину, на каждый объект и точку контроля, что зачастую является экономически невыгодным.

Второй способ подразумевает применение специализированных микропроцессорных мультиметров, в том числе и с цифровой обработкой сигналов (ЦОС). Он обладает существенными преимуществами по сравнению с первым – возможностью автоматизации процессов проведения измерений и регистрации их результатов. Но все же, несмотря на качественно новый уровень, этот способ характеризуется рядом недостатков: это ограниченные возможности визуализации результатов измерений (на символьных экранах, зачастую без возможности наглядного представления результатов, без возможности графического отображения), жесткость структуры и ограниченность функциональных возможностей прибора. Другими словами, хотя в микропроцессорных мультиметрах и заложены большие возможности по автоматизации процесса измерений, но реконфигурировать структуру и алгоритм работы с целью большей адаптации к конкретным задачам практически невозможно.

В 90-х годах XX века находит применение третий способ – использование цифровых измерительных систем (ЦИС) с ЦОС на базе интегрируемых в персональный компьютер инструментальных плат сбора данных. Основные преимущества ЦИС – это широкие возможности для визуализации результатов измерений, функциональная гибкость, большие возможности для хранения, обработки, возможность управлять дистанционно (по локальным сетям, по глобальной сети интернет). Можно сказать, что ЦИС хороши и удобны тем, что пользователь в значительной степени сам определяет, какими качествами и свойствами они должны обладать, а именно: какие физические величины они должны измерять, в каких диапазонах, по какому алгоритму выполнять обработку данных и т.д., т.е. пользователь сам «конструирует» необходимый прибор. К недостаткам таких систем относится ограниченная точность, которая обусловлена спецификой интеграции плат сбора данных в открытые компьютерные платформы – влиянием нестабильности питающих напряжений, наличием наводок от функциональных узлов компьютера и т.д. Поэтому нецелесообразно применять такие ЦИС для проведения лабораторных исследований, где нужны прецизионные измерения. Область их применения – это проведение измерений на производстве, на участках сетей энергоснабжения и других объектах, где не требуется высокая точность.

Несмотря на то, что ЦИС применяются на практике, в настоящее время отсутствует системное исследование в данной области. Несмотря на то, что ЦИС характеризуются значительным количеством составляющих неопределённости [1], последними необоснованно пренебрегают, а публикации, посвященные анализу и оценке метрологических характеристик (МХ) таких мультиметров, отсутствуют. Зачастую ни владелец, ни изготовитель не владеют информацией об МХ ЦИС в целом, – им известны только МХ отдельных блоков. Следовательно, данные вопросы остаются открытыми и актуальными.

Таким образом, цель данной работы – расчет и анализ МХ мультиметра для измерения параметров питающих напряжений в сетях переменного тока промышленной частоты.

## Основной материал

**1. Структура мультиметра.** В данной работе рассматривается исследование МХ ЦИС, производящей измерения при помощи цифровой обработки сигналов (ЦОС). Укажем принципиальное отличие измерения при помощи ЦОС и обычного измерения при помощи цифровых измерительных приборов (ЦИП). В обычных, невычислительных, ЦИП происходит преобразование измеряемой величины в некоторую величину, удобную для измерения – промежуток времени, частота следования импульсов, напряжение постоянного тока и т.д. Затем при помощи одного из известных методов (временн-импульсного, частотоимпульсного, кодоимпульсного и

т.д.) осуществляется аналогово-цифровое преобразование. В приборах с ЦОС осуществляется аналогово-цифровое преобразование, накопление отсчетов, а затем по полученным данным происходит вычисление необходимых величин по формулам.

Измерение, основанное на ЦОС, может быть технически реализовано по обобщённой структурной схеме, приведенной на рис. 1.

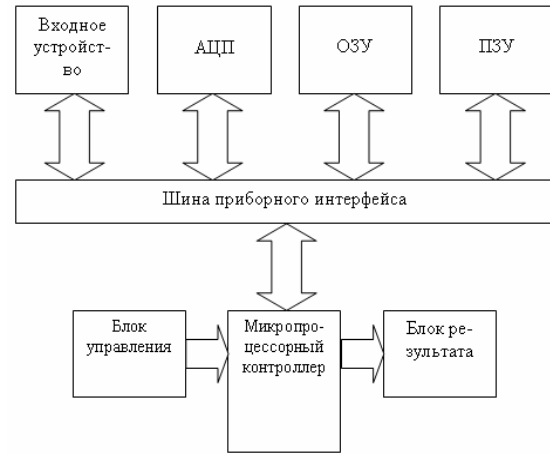


Рис. 1. Схема мультиметра с применением цифровой обработки сигналов

В случае, когда требуется произвести измерение некоторого параметра входного сигнала (например, только действующее значение, или только частоту) целесообразно использовать обычный аналоговый измерительный прибор или ЦИП, предназначенный для измерения данной величины.

Применение приборов, использующих ЦОС, оправдано в том случае, когда необходим прибор, который бы мог одновременно измерять несколько параметров входного сигнала (например, действующее значение, частоту, коэффициент гармоник и др.). Иначе говоря, применять измерительные приборы с ЦОС целесообразно в тех случаях, когда с их помощью можно избавиться от большого числа разрозненных приборов, заменив их одним мультиметром с ЦОС.

**2. Применение вычислительного алгоритма на основе цифровой обработки сигналов.** Рассмотрим алгоритм вычисления, реализуемый в исследуемой РИС. Суть алгоритма измерения, основанного на цифровых методах с ЦОС, можно упрощенно записать в таком виде:

- аналогово-цифровое преобразование мгновенных значений напряжения  $u(t)$  в моменты дискретизации  $t_q$ ,  $q = 1, m$ ;

- запоминание массива кодов  $u_q$ ,  $q = 1, m$ ;

- цифровая обработка кодов  $u_q$ , которая включает в себя вычисление значений величин, которые измеряются по соответствующим формулам.

Вычисления измеряемых величин выполняются по следующим формулам:

– период измеряемого сигнала:

$$T = m \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где  $m$  – количество отсчетов за период;  $\Delta t$  – время между двумя соседними моментами дискретизации;

– частота измеряемого сигнала:

$$f = 1/T; \quad (2)$$

– среднеквадратическое (действующее) значение напряжения:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{q=1}^N u^2(t_q)}, \quad (3)$$

где  $N$  – число точек дискретизации;  $u^2(t_q)$  – мгновенные значения напряжения в точках дискретизации  $t_q$ ;

– среднеквадратическое (действующее) значение силы тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{q=1}^N i^2(t_q)}, \quad (4)$$

где  $N$  – число точек дискретизации;  $i^2(t_q)$  – мгновенные значения силы тока в точках дискретизации  $t_q$ ;

– активная мощность:

$$N_p = \frac{1}{m} \sum_{q=0}^{m-1} u(t_q) i(t_q); \quad (5)$$

– коэффициент гармоник:

$$k_{\Gamma} = \sqrt{\frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} \left[ \frac{u(t_q)}{U_{\text{макс}}} - \sin(\omega t_q + \psi) \right]^2}, \quad (6)$$

где  $U_{\text{макс}}$  – амплитуда первой гармоники исследуемого сигнала;  $\omega$  – циклическая частота измеряемого сигнала ( $\omega = 2\pi f$ );  $\psi$  – начальная фаза первой гармоники.

Определить амплитуду первой гармоники и начальную фазу измеряемого сигнала можно, предварительно вычислив квадратурные составляющие первой гармоники. Формулы для их нахождения следующие:

$$U_{vx} = \frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} u(t_q) \sin \omega t_q; \quad (7)$$

$$U_{vy} = \frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} u(t_q) \cos \omega t_q. \quad (8)$$

Амплитуда первой гармоники вычисляется как

$$U_{1\text{max}} = \sqrt{U_{1x}^2 + U_{1y}^2}. \quad (9)$$

Начальная фаза связана с квадратурными составляющими соотношениями:

$$\psi = \arctg\left(\frac{U_{1y}}{U_{1x}}\right) = \arcsin\left(\frac{U_{1y}}{\sqrt{U_{1x}^2 + U_{1y}^2}}\right). \quad (10)$$

Разность фаз вычисляется как разность начальных фаз исследуемых сигналов.

$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2, \quad (11)$$

где  $\psi_1$  – начальная фаза одного из сигналов;  $\psi_2$  – начальная фаза другого сигнала.

В случае, когда неопределенности обусловлены различными и не связанными друг с другом причинами, их можно принять некоррелированными. Таким образом, результирующую погрешность мультиметра с ЦОС можно вычислить по формуле:

$$\delta = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_t^2 + \delta_{\text{кв}}^2 + \delta_{\zeta}^2}, \quad (12)$$

где  $\delta_D, \delta_t, \delta_{\text{кв}}, \delta_{\zeta}$  – относительные значения погрешностей дискретизации, динамической, квантования и вносимой помехами.

## Выводы

На основании исследований данных выражений при помощи корреляционных, спектральных и других методов, опираясь на общеизвестные знания о погрешностях ЦИП, можно вывести искомую математическую модель неопределенности измерений при помощи мультиметра.

## Список литературы

1. Неежмаков П.И. Информационные технологии в метрологии: состояние и перспективы / П.И. Неежмаков, Д.Б. Костарев // Украинський метрологічний журнал. – 2003. – № 3. – С. 60-64.
2. Ерохин И.В. Автоматизированные информационно-измерительные системы в жилищно-коммунальном секторе / И.В. Ерохин // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 63-67.
3. Шмелев О.Я. Точность вычислений компьютерного анализатора спектра реального времени / О.Я. Шмелев // Измерительная техника. – 2007. – № 2. – С. 62-64.
4. Заико А.И. Точность измерения энергетического спектра косвенным методом / А.И. Заико // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 10-13.
5. Конюхов А.Г. Метрологическое обеспечение в приборостроении. Аспекты управления / А.Г. Конюхов. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 208 с.
6. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Г.П. Богданов, В.А. Кузнецов, М.А. Лотонов и др.; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
7. Р 50-080-99. Системи вимірювальні інформаційні. Метрологічне забезпечення. Основні положення.
8. Кондрашов С.І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах / С.І. Кондрашов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – 224 с.
9. Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / А.Ф. Фомин. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.
10. Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства / Э.И. Цветков. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 224 с.
11. Р 50-076-98. Вимірювально-інформаційні системи та автоматизовані системи керування технологічними процесами. Методика визначення характеристик похибки вимірювальних каналів, до складу яких входить обчислювальний компонент.

Поступила в редколлегию 23.07.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

**ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МУЛЬТИМЕТРА НА БАЗІ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

В.М. Зінковський, М.О. Крюков, І.В. Руженцев, С.М. Сакало

*У роботі розглянуто особливості такого типу вимірювальних приладів, як мультиметри на базі цифрової обробки сигналів, проаналізовано його структуру. Вказані принципові відмінності вимірювання за допомогою цифрової обробки сигналів від звичайного вимірювання за допомогою цифрових вимірювальних приладів. Також приведені формули, за допомогою яких здійснюється обробка сигналу, зокрема, формули для розрахунку середньоквадратичного значення напруги, коефіцієнту гармонік, потужності. Розглянутий можливий підхід до оцінювання невизначеності вимірювань за допомогою мультиметра.*

**Ключові слова:** мультиметр, цифрова обробка сигналів, мікропроцесор.

**EVALUATION OF UNCERTAINTY OF MEASURING OF MULTIMETER ON BASE OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING**

V.N. Zinkovskiy, M.A. Kryukov, I.V. Ruzhentsev, S.N. Sakalo

*In this work are considered the features of measuring devices like multimeters on the base of the digital signal processing, their structure is analyzed. The basic differences of measuring are indicated through the digital signal processing from the ordinary measuring through digital measuring devices. Formulas by which the signal processing is carried out are also resulted, in particular, formulas for the calculation of mean square value of voltage, harmonic content, power. Possible approach is considered to the evaluation of uncertainty of measurement with the help of a multimeter.*

**Keywords:** multimeter, digital signal processing, microprocessor.