

УДК 621.317.38:681.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ  
КЛАССА ТОЧНОСТИ КАЛИБРАТОРА МОЩНОСТИ**

Ю.М. Фомичев, С.В. Силушкин

Томский политехнический университет

E-mail: msv@tpu.ru

**Фомичев Юрий Михайлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: fym@tpu.ru

Область научных интересов: средства измерений, разработка калибраторов мощности.

**Силушкин Станислав Владимирович**, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: slavasv@mail.ru

Область научных интересов: обработка изображений и сигналов, аппаратно-программные измерительные технологии.

Обсуждается функциональная схема калибратора фиктивной мощности с автоматической коррекцией для поверки измерителей электрической энергии. Предложен синтезатор сигналов на базе платы сбора данных и разработано программное обеспечение для него, проведены экспериментальные исследования его метрологических характеристик.

**Ключевые слова:**

Электрическая энергия, качество электроэнергии, средства измерений электрической энергии, метрологические характеристики.

**Введение**

Расширение применения электронных счетчиков повышенной точности (класса 0,2S–0,5S) и появление новой нормативно-методической базы [1–3] привело к необходимости модернизации метрологического обеспечения. В современных электронных счетчиках используются аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), преобразующие мгновенные значения входных сигналов с последующим вычислением измеряемых величин, появились дополнительные функции, связанные с определением качества электрической энергии, что также требует проведения дополнительных метрологических испытаний.

Известны два метода построения поверочных систем:

- 1) метод с использованием непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного приборов;
- 2) метод калибратора мощности, который требует прецизионного задания значений тока, напряжения, фазового сдвига и т. д.

В статье рассматриваются возможности уменьшения погрешности калибраторов фиктивной мощности (КФМ).

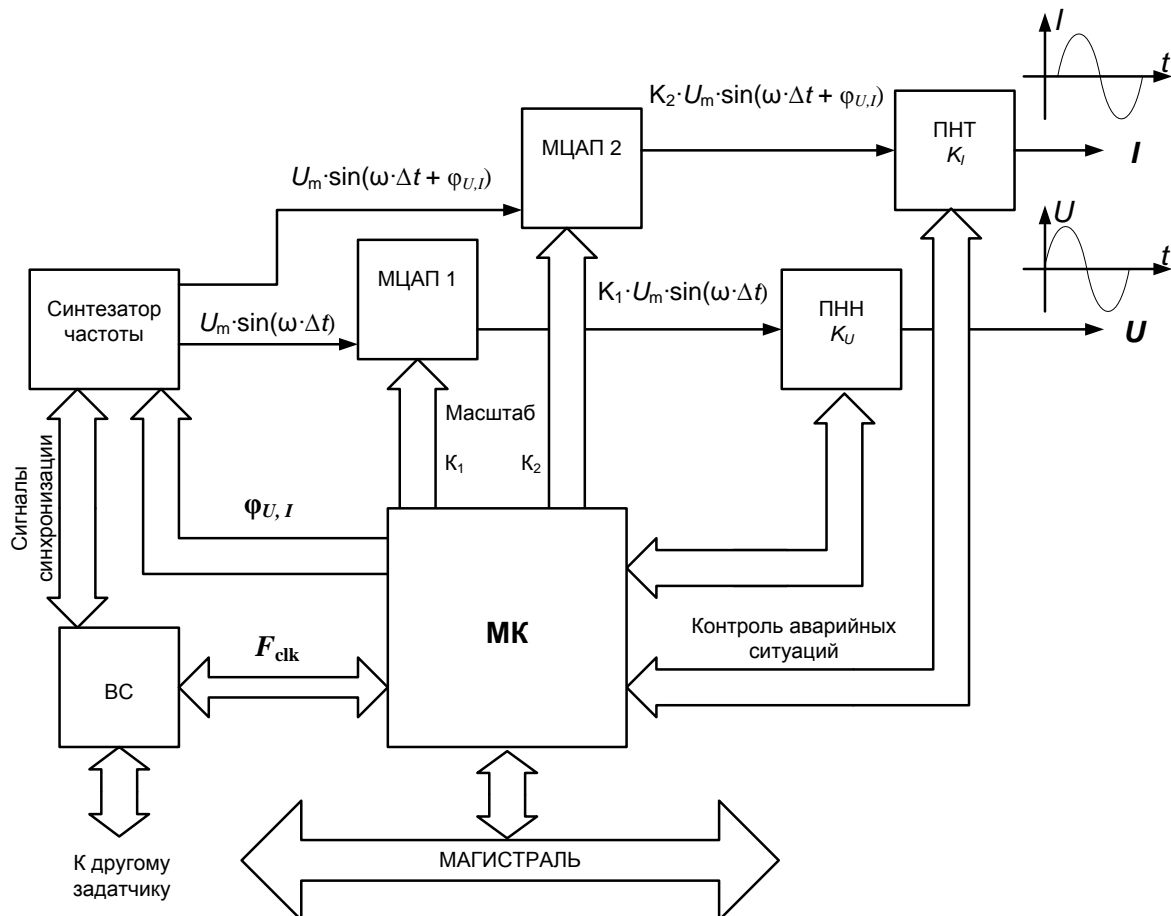
**1. Выбор структурной схемы калибратора мощности**

На рис. 1 приведена структурная схема КФМ типа «Вектор» и «Эника».

В состав калибраторов указанного типа входят следующие основные блоки:

- 1) МК – микроконтроллер управляет работой калибратора по заданной программе и осуществляет контроль аварийных ситуаций;
- 2) ВС – внешняя синхронизация может задаваться МК или от другого задатчика при объединении калибраторов в трехфазную систему;
- 3) синтезатор частоты – позволяет получить сигналы синусоидальной формы заданной частоты (определяется тактовой частотой  $F_{\text{clk}}$ ) и фазовым сдвигом ( $\varphi_{U,i}$ );
- 4) МЦАП-1 и МЦАП-2 – масштабирующие цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие устанавливать значения выходного сигнала по заданной программе (масштабирование определяется коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$ );

- 5) ПНН, ПНТ – мощные аналоговые выходные каскады преобразователей «напряжение–напряжение» и «напряжение–ток» с постоянными коэффициентами преобразования  $K_U$  и  $K_I$  соответственно;
- 6) магистраль – осуществляет коммуникацию калибратора с персональным компьютером (ПК).



**Рис. 1.** Структурная схема калибратора фиктивной мощности типа «Вектор» и «Эника»

Программа работы калибратора зависит от типа поверяемых счетчиков электрической энергии и задается в управляющей программе на ПК, в память которого также заносятся результаты поверки/калибровки, которые затем оформляются в виде протоколов испытаний.

Согласно требованиям, установленных ГОСТами предыдущего поколения, поверка осуществлялась при синусоидальной форме сигналов тока и напряжения, которые формировал цифровой синтезатор с заданным сдвигом по фазе относительно друг друга. С помощью МЦАП, ПНТ и ПНН устанавливаются требуемые значения тока, напряжения и фазового сдвига. ПНТ и ПНН – это фактически усилители мощности, которые должны обладать постоянными и стабильными коэффициентами преобразования, а также очень малыми фазовыми сдвигами ( $\varphi \leq 0,01^\circ$ ). Эти параметры обеспечиваются за счет введения очень глубоких обратных отрицательных связей (ООС), порядка 1000. Несмотря на реактивную (емкостную, индуктивную) изменяющуюся по величине нагрузку в узком диапазоне частот (45...65 Гц), задача решалась применением специально разработанных цепей коррекции.

Современные ГОСТы устанавливают требования, согласно которым необходимо проверять погрешность измерения счетчиками при воздействии сигналов сложной формы: с содержанием высших гармоник (до 40...50-й) или субгармоник (интергармоник). Это привело к необходимости расширения полосы рабочих частот ПНТ и ПНН до 2...3 кГц. Для определения влияния субгармоник необходимо сформировать сигнал, вид которого приведен на рис. 2, т. е. требуется изменение скачком тока нагрузки.

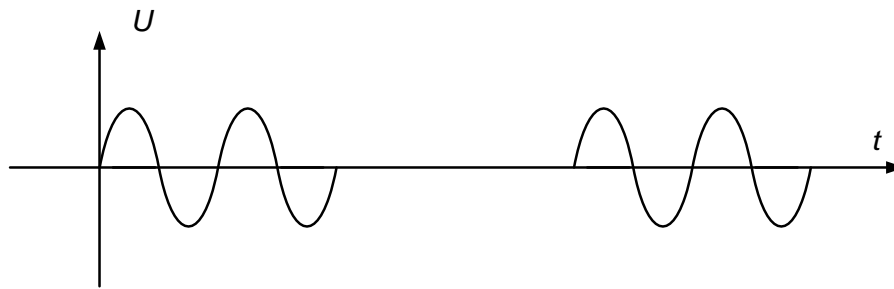


Рис. 2. Форма сигнала для получения субгармонических составляющих

Все это усложнило задачу обеспечения устойчивости при больших глубинах ООС по мгновенному значению [4].

Для достижения поставленной цели необходимо исследовать возможность применения в КФМ обратной связи не только по мгновенному значению, но и периодической автоматической коррекции погрешности. На рис. 3 приведена функциональная схема такого КФМ.

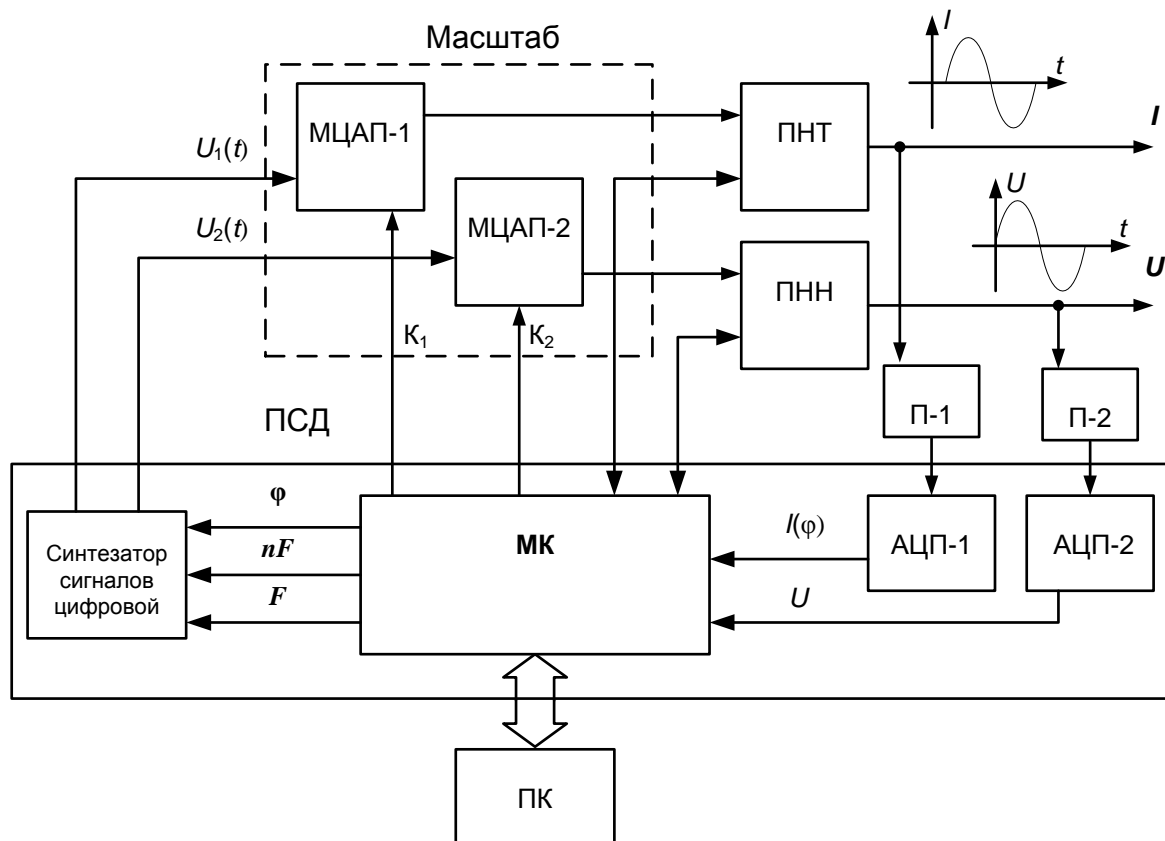


Рис. 3. Функциональная схема КФМ с обратной связью по мгновенному значению и автоматической коррекцией погрешности

Предлагаемая схема калибратора состоит из следующих основных блоков:

- 1) ПСАД – плата сбора данных, которая на своем борту имеет МК, 16-разрядный ЦАП (выполняет функции синтезатора сигналов) и 16-разрядный АЦП (АЦП-1 и АЦП-2 – каналы АЦП);
- 2) МЦАП-1 и МЦАП-2 – масштабирующие ЦАП;
- 3) ПНТ и ПНН – также как и в рассмотренных ранее калибраторах, являются мощными аналоговыми выходными каскадами;

- 4) П-1 и П-2 – измерительные преобразователи (резистивный делитель напряжения, трансформатор тока или токовый шунт) для приведения выходных сигналов напряжения и тока к уровню измеряемых сигналов АЦП;
- 5) ПК – управляет работой калибратора, сохраняет в память результаты поверки/калибровки счетчиков и позволяет формировать протокол испытаний.

Работа КФМ осуществляется следующим образом:

- по команде с компьютера синтезатор формирует сигналы с заданной амплитудой, формой, частотой и фазовым сдвигом для каналов тока и напряжения;
- масштабирующая цепь (МЦАП) выставляет за счет заданных коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  необходимую амплитуду на вход преобразователей ПНТ и ПНН, которые имеют постоянные коэффициенты преобразования;
- выходные сигналы нормируются преобразователями П-1 и П-2 и подаются на АЦП ПСД;
- АЦП-1 и АЦП-2 преобразуют сигналы тока ( $I_{(\varphi)}$ ) и напряжения ( $U$ ) в цифровой код, а полученный код поступает в управляющую программу на ПК, где вычисляется мощность выходного сигнала;
- полученный результат вычисления мощности сравнивается с заданным значением, при возникшей разнице значений происходит коррекция задаваемых значений мощности. Так как отличие выходной мощности компенсируется, соответственно, уменьшается погрешность калибровки мощности;
- цикл повторяется через 3–5 мин или при установке новых параметров выходных сигналов.

Рассматриваемое решение основывается на применении современных плат сбора данных, например NI 6251 [5]. Данная плата в своем составе имеет двухканальный ЦАП и быстродействующий АЦП, а также позволяет интегрировать ее в измерительную установку. При этом нет необходимости дополнительно разрабатывать драйвера обмена с компьютером, т. к. компания-производитель (National Instruments, США) предоставляет их в комплекте с платой.

Такой подход позволяет избежать сложных конструктивных особенностей и режимов работы генераторов для формирования сигналов сложной формы (рис. 2).

## 2. Синтезатор сигналов на базе платы сбора данных

Эксплуатация различных устройств (компьютерная техника, телевизоры, освещение, источники бесперебойного питания, трансформаторы и пр.) как в быту, так и в промышленности приводит к появлению высших гармоник в сигналах тока с низкой стороны [6]. Последствия появления высших гармоник – это необоснованные экономические потери, связанные с выходом из строя оборудования и повышенным износом изоляции, а также некорректный учет потребляемой энергии из-за необходимости проводить измерения сигналов не только синусоидальной, но и несинусоидальной формы. При этом генерируемые сигналы от производителя с высокой стороны остаются в пределах требований, предъявляемых к качеству электроэнергии.

Промышленностью выпускаются различные цифровые СИ (вольтметры, амперметры, осциллографы) в модульном исполнении, например компания National Instruments выпускает модули в стандарте PXI [7], которые можно использовать для создания систем измерения мощности на основе цифровой обработки сигналов (подобное решение рассмотрено авторами в работе [8]). Компания выпускает также и ПСД (DAQ-Board), которые используются как отдельно стоящее устройство и как встраиваемое в разрабатываемую установку.

На базе платы NI USB-6251 и программной среды LabVIEW 2009 был реализован синтезатор (генератор) и анализатор сигналов, рис. 4.

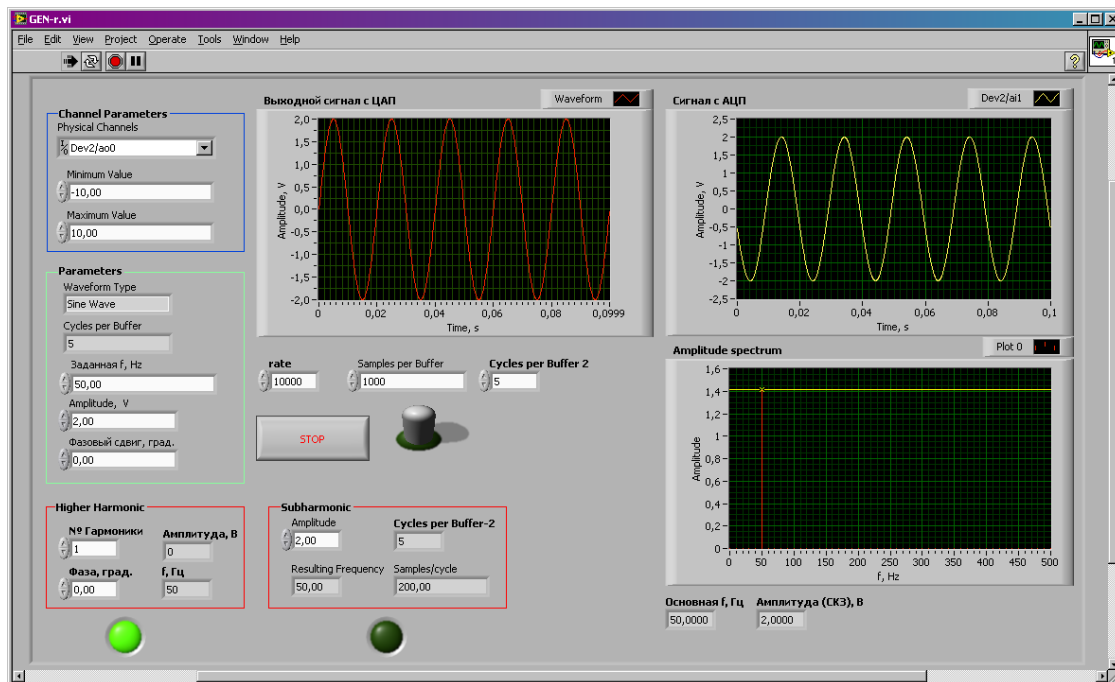


Рис. 4. Генератор и анализатор сигналов

Данное программное обеспечение позволяет сформировать сигнал синусоидальной формы, сигнал с интергармоническими составляющими (субгармониками) или высшими гармониками (рис. 5), а затем передать его на ЦАП.

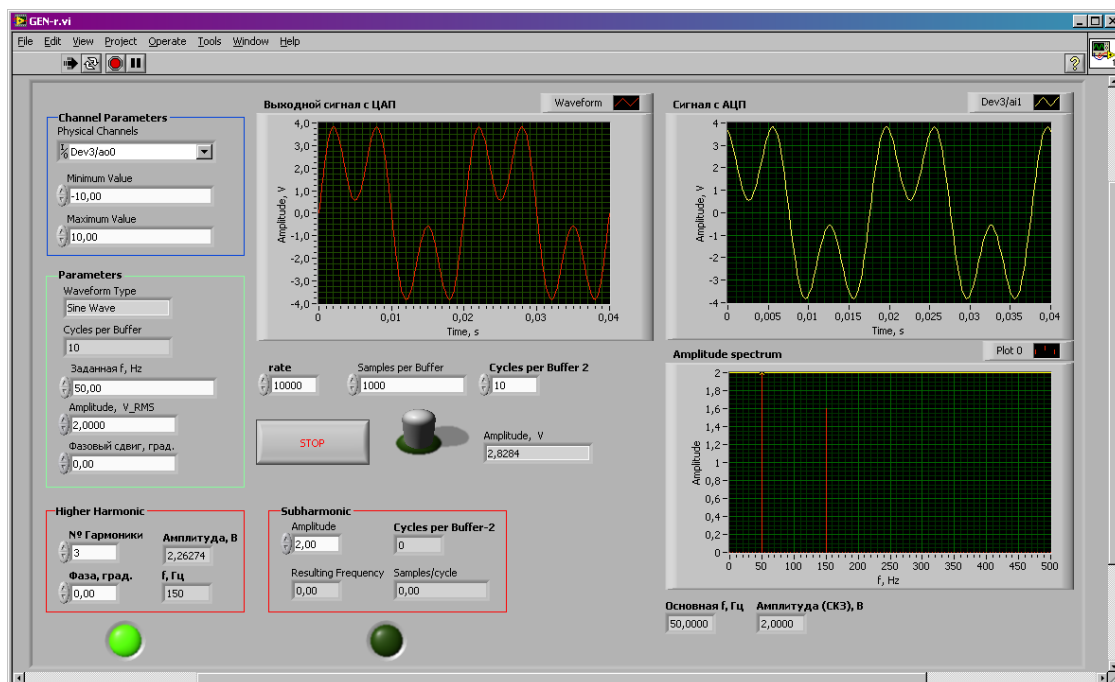


Рис. 5. Генератор и анализатор сигналов в режиме формирования сигнала с высшими гармоническими составляющими (в сигнале присутствует 3-я гармоника)

Одновременно с этим производится измерение АЦП платы сгенерированного сигнала и определение погрешности генерации его амплитуды и частоты. Эту операцию предлагается использовать в разрабатываемом КФМ, когда проводится контроль выходных сигналов измерительных трактов для повышения класса точности калибратора.

На рис. 4 приводится пример прямого измерения генерируемого сигнала, из которого видно, что погрешность генерации сигналов, пройденных через ЦАП и АЦП, сводится к нулю. Это обеспечивается высокой разрядностью используемых преобразователей.

Измерение мощности сигналов предлагается производить на основе уже разработанных программных продуктов, предложенных авторами в работе [8].

Дальнейшие исследования и установление метрологических характеристик используемой платы необходимо провести на эталонном оборудовании.

### 3. Экспериментальное исследование метрологических характеристик

ПСД позволяет воспроизводить и измерять следующие параметры сигналов: амплитудные (действующие) значения напряжения; фазовый сдвиг между сигналами; частоту гармонических сигналов; активную, реактивную и полную мощности как синусоидальных, так и несинусоидальных сигналов (дополнительно рассчитывается мощность искажения); коэффициент гармоник (коэффициент искажения синусоидальности кривой).

На текущем этапе работ проверялась точность:

- 1) ЦАП – для формирования гармонических сигналов с заданной частотой и амплитудой;
- 2) АЦП – для измерения амплитуды и частоты сигналов.

Для определения точности проведенных измерений использовалось поверенное оборудование, относящееся к рабочим эталонам: частотомер ЧЗ-35А, мультиметр Agilent 3458А, калибратор Fluke 5520А.

#### Измерение действующих значений напряжения и частоты сигналов, формируемых ЦАП

Исследовались погрешности формирования действующих значений напряжения ЦАП платы сбора данных, диапазон частот формирования сигналов – от 50 Гц до 2,5 кГц.

Погрешность формирования частоты генерируемых сигналов ( $\delta f$ ) с ЦАП контролировалась с помощью частотомера ЧЗ-35А. Для измерения значений напряжения в диапазоне  $U_0 = 0,5 \dots 7,0$  В использовался мультиметр Agilent 3458А, результаты измерений представлены в табл. 1.

Относительная погрешность измерений рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \pm \frac{X_0 - X_{\text{э}}}{X_{\text{э}}} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

где  $X_0$  – заданные значения соответствующей физической величины;  $X_{\text{э}}$  – показания рабочего эталона.

**Таблица 1.** Погрешность формирования ЦАП значений напряжения в частотном диапазоне, %

| Напряжение $U_0$ , В | Частота сигнала $f$ , кГц |        |        |        |       |        |       |       |        |
|----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
|                      | 0,05                      | 0,10   | 0,15   | 0,25   | 0,35  | 0,45   | 0,55  | 1,00  | 2,50   |
| 0,1                  | 0,004                     | -0,002 | 0,000  | -0,001 | 0,001 | -0,001 | 0,000 | 0,000 | -0,004 |
| 0,5                  | 0,028                     | -0,010 | 0,000  | -0,004 | 0,002 | -0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,006  |
| 1,0                  | -0,002                    | -0,010 | -0,001 | 0,000  | 0,000 | 0,000  | 0,001 | 0,001 | 0,006  |
| 1,5                  | 0,033                     | -0,007 | -0,007 | 0,007  | 0,000 | 0,000  | 0,000 | 0,000 | 0,007  |
| 2,0                  | 0,040                     | -0,010 | -0,005 | 0,000  | 0,000 | 0,000  | 0,000 | 0,000 | 0,005  |
| 3,0                  | 0,033                     | -0,007 | -0,003 | 0,000  | 0,000 | 0,003  | 0,000 | 0,000 | 0,003  |
| 4,0                  | 0,035                     | -0,010 | 0,000  | -0,003 | 0,000 | 0,000  | 0,000 | 0,000 | 0,005  |
| 5,0                  | 0,028                     | -0,008 | 0,000  | -0,002 | 0,002 | -0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,004  |
| 7,0                  | 0,017                     | -0,009 | 0,000  | -0,001 | 0,000 | 0,000  | 0,001 | 0,000 | 0,004  |

Результаты измерений, приведенные в табл. 1, показали, что погрешность формируемых значений амплитуды и частоты напряжения не превышает 0,04 %, т. е. ЦАП исследуемой платы позволяет формировать выходные сигналы с необходимым запасом точности.

### Измерение действующих значений напряжения и частоты сигналов с помощью АЦП платы сборки данных

Исследовались погрешности измерения действующих значений напряжения, для чего был использован калибратор Fluke 5520A как источник входных сигналов напряжения в диапазоне частот от 50 Гц до 2,5 кГц, диапазон измеряемых напряжений  $U_0 = 0,5...3,5$  В. Относительная погрешность измерений рассчитывается по формуле (1). Результаты измерений представлены в табл. 2. Значения частоты генерируемых сигналов ( $\delta f$ ) контролировалась частотомером ЧЗ-35А.

**Таблица 2.** Погрешность измерений значений напряжения в частотном диапазоне, %

| Напряжение $U_0$ , В | Частота сигнала $f$ , кГц |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 0,05                      | 0,10   | 0,15   | 0,25   | 0,35   | 0,45   | 0,55   | 1,00   | 2,50   |
| 0,1                  | -0,024                    | -0,040 | -0,033 | -0,019 | -0,032 | -0,020 | -0,049 | -0,028 | -0,020 |
| 0,5                  | -0,019                    | -0,021 | -0,019 | -0,019 | -0,019 | -0,020 | -0,020 | -0,018 | -0,018 |
| 1,0                  | -0,011                    | -0,011 | -0,010 | -0,011 | -0,011 | -0,010 | -0,011 | -0,011 | -0,011 |
| 1,5                  | -0,007                    | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 |
| 2,0                  | -0,010                    | -0,010 | -0,010 | -0,010 | -0,010 | -0,010 | -0,010 | -0,010 | -0,010 |
| 3,0                  | -0,007                    | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 | -0,007 |
| 3,5                  | -0,023                    | -0,023 | -0,023 | -0,023 | -0,026 | -0,026 | -0,026 | -0,026 | -0,026 |

Результаты измерений, приведенные в табл. 1 и 2, показали, что погрешность измерений значений напряжений не превышает 0,04 %, т. е. не выходит за пределы установленных в технической документации на NI USB-6251 [5].

### Заключение

Предложена функциональная схема КФМ с обратной связью по мгновенному значению и автоматической коррекцией погрешности.

Предложенный калибратор имеет модульную структуру, поэтому его можно адаптировать к требованиям заказчика, а его параметры могут быть улучшены путем добавления модулей формирования и обработки сигналов в состав программного обеспечения, а также заменой аппаратных модулей на модули с более высокими метрологическими характеристиками.

Экспериментально показано, что синтезатор сигналов на базе платы сбора данных обеспечивает формирование и измерение параметров сигналов в частотном диапазоне от 50 Гц до 2,5 кГц с погрешностью до 0,05 %, что удовлетворяет требованиям по запасу точности для получения КФМ с классом точности 0,1.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 8.584-2004. ГСИ. Счетчики статические активной электрической энергии переменного тока. Методика поверки. – Введ. с 2005-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 23 с.
- ГОСТ Р 52322-2005 (МЭК 62053-21:2003). Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 21. Статические счетчики активной энергии классов точности 1 и 2. – Введ. с 2005-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 24 с.

- 3 ГОСТ Р 52323-2005 (МЭК 62053-22:2003). Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 22. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2S и 0,5S. – Введ. с 2005-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 20 с.
- 4 Фомичев Ю.М., Силушкин С.В. Современное состояние автоматизированных систем поверки средств измерений параметров электрической энергии // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 2 (8). – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/692/504> (дата обращения: 22.09.2013)
- 5 National Instruments / NI 625x Specifications, 2007. – URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371291h.pdf> (дата обращения: 22.09.2013).
- 6 Кобелев А.В., Зыбин А.А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1.– С. 187–191.
- 7 National Instruments / PXI Platform, 2012. – URL: <http://www.ni.com/pxi> (дата обращения: 22.06.2012).
- 8 Силушкин С.В., Муравьев С.В., Фомичев Ю.М., Емельянова Е.Ю. Цифровой измеритель мощности сигналов сложной формы на базе PXI-платформы // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 176–181.

Поступила 08.11.2013 г.