

Государственный первичный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153—2012

Г. Б. ГУБЛЕР, А. С. НИКИТИН, Е. З. ШАПИРО

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: g.b.gubler@vniim.ru

Описаны методы построения, структура, технические и метрологические характеристики Государственного первичного эталона единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153—2012.

Ключевые слова: активная мощность, реактивная мощность, первичный эталон единицы электрической мощности.

The methods of construction, structure, technical and metrological characteristics, and the results of uncertainty analysis for the state primary electronic power unit standard in the frequency range from 1 to 2500 Hz are described.

Key words: active power, reactive power, primary electric power standard.

Точные измерения электрической мощности и энергии относятся к числу наиболее распространённых и экономически важных видов измерений в различных отраслях промышленности. Измерения этих величин служат основой расчётов за электроэнергию и, что не менее важно, базой разработок энергосберегающих технологий, систем обеспечения безопасности и современных интеллектуальных сетей, которые рассматриваются как главное направление развития электроэнергетики XXI в.

Условия эффективной и равноправной работы на внешних электроэнергетических рынках требуют международно признанного уровня точности измерений электрической мощности и энергии, который, в первую очередь, определяется точностью воспроизведения единиц активной мощности (ватт), реактивной мощности (вар) и соответствующих единиц электрической энергии (ватт-секунда, вар-секунда) с помощью национальных эталонов единиц электрической мощности каждой из стран-участниц рынка. Отдельные эталоны единиц электрической энергии в мировой практике не создаются. Эти единицы воспроизводятся путём интегрирования значений воспроизведённых единиц мощности на известных интервалах времени. Поскольку точность измерений времени на несколько порядков превышает точность измерений мощности, можно считать, что неопределённости воспроизведения единиц электрической мощности и электрической энергии одинаковы.

Первые национальные эталоны единицы активной электрической мощности (Германия, США, Канада) были созданы в конце 1970-х гг. Работы по созданию исходных средств измерений (СИ) электрической мощности проводились во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева с начала 1950-х гг. В 1986 г. во ВНИИМ впервые был создан государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы электрической мощности ГЭТ 153—86 [1], который обеспечил централизованное воспроизведение

единицы активной мощности и её передачу соответствующим СИ. Создание эталона подняло в стране уровень точности СИ мощности до мирового уровня того времени, что было подтверждено рядом международных сличений, включая сличения МКМВ К5 1998—2000 гг. [2]. В связи с этим Россия стала одной из стран, располагающих независимыми эталонами единицы мощности, т. е. эталонами, воспроизводящими национальную единицу ватт на основе национальных единиц — вольт, ом.

С момента утверждения ГЭТ 153—86 произошло радикальное обновление парка рабочих СИ электроэнергетических величин (ЭЭВ), связанное с заменой аналоговых средств на СИ, основанные на математической обработке результатов синхронных измерений мгновенных значений напряжения и тока, с переходом от индивидуальных точек учёта электрической энергии к автоматизированным информационно-измерительным системам коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ), а также с созданием автоматизированных (в перспективе интеллектуальных) систем управления и обеспечения безопасности электрических сетей.

Задача обеспечения единства измерений в условиях быстрого изменения парка рабочих СИ потребовала соответствующего изменения эталонных средств, насчитывающих более 100 тыс. единиц отечественного и зарубежного производства, а точность некоторых образцов стала соизмеримой с точностью первичного ГПЭ.

Необходимость создания нового ГПЭ была обусловлена тем, что ГЭТ 153—86 принципиально не мог обеспечить: точность воспроизведения единицы активной мощности, достаточную для испытаний и поверки наиболее точных отечественных и зарубежных эталонных и рабочих СИ; непосредственное воспроизведение единицы реактивной мощности; воспроизведение единиц в диапазоне частот ниже 20 Гц, используемом на промышленных объектах с частотным регу-

лированием; непосредственную информационную совместимость с современными вторичными и рабочими эталонами и зарубежными эталонами на международных сличениях.

Состав и структура Государственного первичного эталона единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153—2012. Эталон выполнен в виде трех приборных стоек, включающих:

комплекс средств для воспроизведения единиц электрической мощности в диапазонах напряжений 1—1000 В, сил токов 0,01—10 А, частот 1—2500 Гц и коэффициентов мощности K_P от 0 до 1 при сдвиге фазового угла, характерном для индуктивных или емкостных нагрузок;

комплекс средств для исследований эталона, в который входит аппаратура для первичной и периодической аттестации эталона, анализа неисклученных составляющих погрешностей (НСП), а также для проведения работ, направленных на расширение функциональных возможностей эталона;

систему управления, обработки и представления информации на основе персонального компьютера.

Методы измерений основной электроэнергетической величины — активной электрической мощности, определяющие структуру эталонов её единицы, существенно отличаются от методов измерений других электрических величин (напряжения, силы тока, сопротивления и т. д.). Это вызвано, прежде всего, спецификой измеряемой величины, состоящей в том, что реальная активная мощность P , поглощаемая в нагрузке электрической цепи и преобразуемая в другие неэлектрические виды мощности — тепловую, механическую, мощность излучений и др., непосредственно не воздействует на СИ мощности. На СИ мощности, включаемое, как правило, в электрическую цепь между генератором и нагрузкой, в каждый момент времени воздействуют две величины: падение напряжения на нагрузке $u(t)$ и ток, протекающий через нагрузку $i(t)$, а результатом измерения является среднее за период T значение их произведения:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt.$$

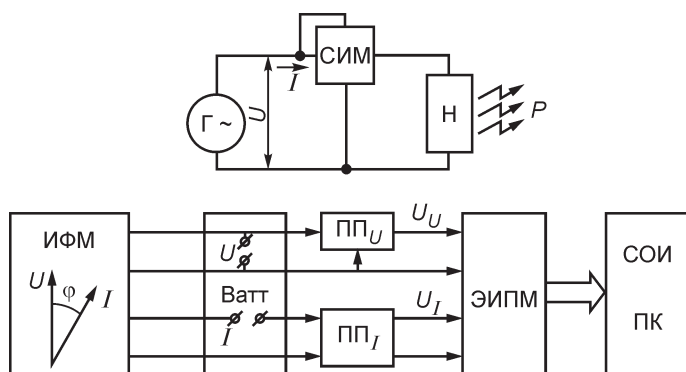


Рис. 1. Схема измерений электрической мощности и обобщенная структура ГПЭ:

ИФМ — источник фиктивной мощности; СИМ — средство измерений мощности; Г — генератор; Н — нагрузка; $ПП_U$, $ПП_I$ — первичные преобразователи напряжения и тока; ЭИПМ — эталонный измерительный преобразователь мощности; СОИ — система обработки и представления информации; ПК — персональный компьютер

Таким образом, с помощью СИ мощности измеряют не реальную физическую величину — активную мощность в нагрузке, а так называемую проходящую мощность, что приводит к появлению характерных только для этих СИ погрешностей, подробно рассмотренных в [3].

Метрологические работы, связанные с воспроизведением единицы мощности, а также с калибровкой и поверкой СИ мощности и энергии, выполняют при фиктивной мощности, когда напряжение и ток во входные цепи СИ мощности подаются от отдельных маломощных источников. При этом фиктивная мощность имитирует проходящую в условиях, когда реальная мощность вообще отсутствует.

Воспроизведение единицы электрической мощности (активной или реактивной) и передача её различным видам СИ в форме фиктивной мощности — наиболее рациональный путь решения метрологических задач, поскольку он позволяет достаточно просто моделировать различные режимы электрических цепей и варианты нагрузок при минимальных аппаратных и финансовых затратах. Вместе с тем существенные различия условий калибровки и последующего применения данных СИ требуют детального анализа специфических погрешностей измерений фиктивной мощности с целью обеспечения единства измерений фиктивной, проходящей и реальной мощностей.

На рис. 1 представлена обобщенная структура ГПЭ, воспроизводящего единицу мощности в форме фиктивной мощности. Ватт воспроизводится на зажимах источника фиктивной мощности ИФМ, состоящего из источников напряжения и тока одной частоты с возможностью регулирования модулей векторов напряжения U , силы тока I и угла сдвига фаз φ между ними. В состав измерительной части эталона входят: первичные преобразователи напряжения и тока $ПП_U$, $ПП_I$, эталонный измерительный преобразователь фиктивной мощности ЭИПМ и система обработки и представления информации СОИ на основе персонального компьютера ПК.

Эталонный измерительный преобразователь фиктивной мощности, в общем случае, представляет аналоговое или цифровое устройство для перемножения мгновенных значений напряжения и тока с последующим интегрированием произведения по периоду переменного тока [4, 5]. С конца 90-х гг. XX в. в большинстве развитых стран создано новое поколение эталонов единицы мощности, работа преобразователей которых основана на методах математической обработки результатов синхронных аналого-цифровых преобразований мгновенных значений напряжения и тока, выполненных с помощью быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП_U и АЦП_I) [5, 6].

В этом случае в состав преобразователя кроме АЦП_U и АЦП_I входит встроенный или внешний процессор со специализированной программой, обеспечивающей не только перемножение синхронных выборок напряжения и тока, но и коррекцию систематических погрешностей АЦП. В наиболее перспективных цифровых эталонах, кроме того, обеспечивается синхронизация этих преобразований с Международной шкалой координированного времени (UTC). Такая возможность предусмотрена и в ГЭТ 153—2012.

На сегодняшний день оригинальность независимых национальных эталонов единицы мощности различных стран зачастую заключена в алгоритмах воспроизведения единицы и их программном обеспечении, в то время как структуры эталонов и даже элементная база могут быть достаточно близки. На рис. 2 представлена структурная схема ГЭТ 153—2012.

Алгоритмы воспроизведения единиц активной и реактивной мощности реализуются программным обеспечением (ПО).

Воспроизведение единицы активной мощности. Процесс воспроизведения единицы электрической мощности в ГЭТ 153—2012 состоит из двух взаимосвязанных этапов. На первом этапе выполняются: аналоговые преобразования установленных на источнике фиктивной мощности напряжения U и силы тока I с помощью первичных преобразователей $ПП_U$, $ПП_I$ в напряжения u_U , u_I , воспринимаемые АЦП_U, АЦП_I; синхронные преобразования мгновенных значений этих напряжений с помощью АЦП_U и АЦП_I; накопление массивов мгновенных значений U_U , U_I , полученных с частотой выборки (дискретизации) f_d ; предварительная обработка измерительной информации (расчет частоты f_d) и автоматический выбор режимов работы АЦП. На втором этапе вычисляют активную мощность путём интегрирования произведения синхронно полученных мгновенных значений напряжений u_U , u_I за установленное число периодов m переменного тока:

$$P = \sum_{j=0}^{mn-1} w_j U_{Uj} U_{Ij},$$

где $w(j)$ — весовые коэффициенты специального окна интегрирования; j — номер выборки в момент времени t_j ; U_{Uj} , U_{Ij} — элементы массивов мгновенных значений; mn — количество выборок за m периодов сигнала частотой f_d .

Специализированные блоки программного комплекса обеспечивают: измерение основной гармоники частоты входных сигналов f_c , расчет эквалайзера и коррекцию частотной погрешности АЦП; коррекцию несинхронности выборок АЦП_U и АЦП_I, что эквивалентно коррекции угловой погрешности цифрового эталонного измерительного преобразователя мощности (ЦИПМ); расчёт специальных весовых окон интегрирования для уменьшения погрешности, вызванной некогерентностью частоты входных сигналов и частоты дискретизации.

Методы коррекции частотных и угловых погрешностей ЦИПМ, а также методы расчета специальных весовых окон интегрирования, разработанные в ходе создания эталона, рассмотрены в [6—8]. Эти методы позволили более чем на порядок уменьшить составляющие, вносимые в неопределённость воспроизведения единицы наиболее совершенными на сегодняшний день приборами 3458А, использованными в эталоне в качестве АЦП_U и АЦП_I.

Воспроизведение единицы реактивной мощности. Реактивная электрическая мощность Q не является реальной физической величиной [9]. Это условное понятие, первоначально введённое для описания процессов в электрических цепях синусоидального переменного тока при линейной нагрузке, содержащей реактивные элементы — индуктивности и ёмкости. Реактивная мощность — один из важнейших параметров энергопотребления, используемый при расчётах потерь в энергетических сетях и системах управления энергообъектами.

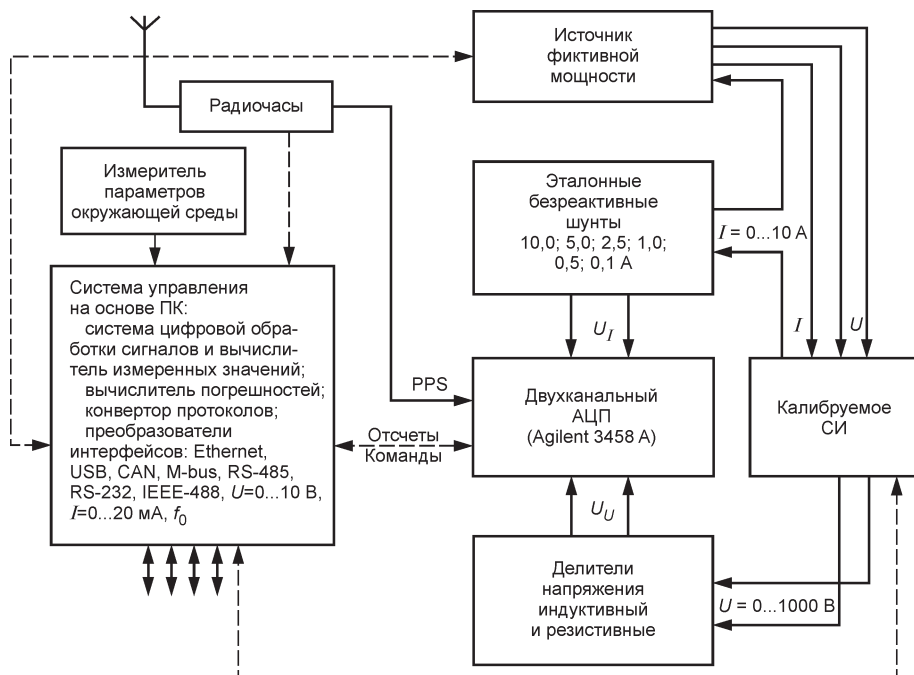


Рис. 2. Структурная схема ГЭТ 153—2012

Существует несколько определений реактивной мощности. Основными и практически используемыми в рабочих и эталонных СИ являются следующие:

$$Q_1 = P \operatorname{tg} \varphi = U_d I_d \sin \varphi; \quad Q_2 = \sqrt{S^2 - P^2},$$

где U_d , I_d — действующие значения напряжения и силы тока; $S = U_d I_d$ — полная мощность.

При синусоидальных формах кривых напряжений и токов $Q_1 = Q_2$, при искажённых — равенство нарушается.

Для передачи единицы реактивной мощности эталонным СИ, основанным на определениях реактивной мощности Q_1 , Q_2 , в эталоне использованы два метода воспроизведения единицы вар, причём основным является метод, соответствующий определению Q_1 , как наиболее близкий к методу воспроизведения активной мощности P . В обоих случаях вычисление мощности Q_1 или Q_2 производится путём математической обработки тех же массивов значений U_U , U_I , что и при вычислении активной мощности с учётом рассмотренных выше корректирующих воздействий. Более того, вычисление Q_1 выполняется по тому же алгоритму, что и вычисление P , с использованием тех же весовых окон при интегрировании. Отличие состоит в том, что выполняется интегрирование отсчётов U_{Uj} , U_{Ij} , сдвинутых во времени на четверть периода основной гармоники сигнала, что соответствует сдвигу фаз на 90° между током и напряжением. При этом в неопределённость воспроизведения Q_1 по сравнению с неопределённостью воспроизведения P добавляется только одна составляющая, равная неопределённости сдвига отсчетов U_{Ij} относительно U_{Uj} $T/4$.

Погрешности ГЭТ 153—2012 и неопределённости воспроизведения единицы. В ходе исследований проведены оценки следующих показателей точности эталона: относительного среднего квадратического отклонения (СКО) сред-

Результаты исследований активной и реактивной мощностей

Диапазон частоты, Гц	Коэффициент мощности	Активная мощность			Реактивная мощность		
		$S_0(u_{A0}) \cdot 10^6$	$\Theta_0 \cdot 10^6$	$U_{p0} \cdot 10^6$	$S_0(u_{A0}) \cdot 10^6$	$\Theta_0 \cdot 10^6$	$U_{p0} \cdot 10^6$
1—400	1,0	1,2—1,3	$\pm(16—21)$	14—18	1,2—1,3	$\pm(17—26)$	14,2—22
	0,5	1,5—1,9	$\pm(15—50)$	13—42	1,5—1,9	$\pm(16—55)$	13,4—46
	0	1,1—1,4	$\pm(8—46)$	7,2—38,0	1,1—1,4	$\pm(9—49)$	7,6—40,0
400—2500	1,0	1,3—2,2	$\pm(21—77)$	18—64	1,3—2,2	$\pm(26—103)$	22—86
	0,5	1,9—6,8	$\pm(50—154)$	42—130	1,9—6,8	$\pm(55—182)$	46—152
	0	1,4—6,6	$\pm(46—134)$	38—112	1,4—6,6	$\pm(48—151)$	40—126

него арифметического результатов измерений S_0 ; доверительных границ относительной НСП Θ_0 ; относительных неопределённостей воспроизведения единиц активной и реактивной мощностей по типам А u_{A0} и В u_{B0} ; относительной суммарной стандартной неопределённости $U_{\Sigma 0}$ и расширенной неопределённости U_{p0} при коэффициенте охвата $k = 2$.

Уравнение измерения активной мощности P , реализованное в эталоне, имеет вид

$$P = U_D I_D K_D (1 + \gamma_D) K_{\text{ш}} (1 + \gamma_{\text{ш}}) K_{\text{пм}} (1 + \gamma_{\text{пм}}) \cos(\varphi + \varphi_D + \varphi_{\text{ш}} + \varphi_{\text{пм}}),$$

где K_D , $K_{\text{ш}}$, $K_{\text{пм}}$ — номинальные значения коэффициентов преобразования делителя напряжения, шунта и измерительного преобразователя мощности, соответственно; γ_D , $\gamma_{\text{ш}}$, $\gamma_{\text{пм}}$ — относительные погрешности соответствующих коэффициентов; φ_D , $\varphi_{\text{ш}}$, $\varphi_{\text{пм}}$ — абсолютные угловые погрешности делителя напряжения, шунта и измерительного преобразователя мощности. Здесь и далее под номинальными значениями модулей и углов преобразования K_D , $K_{\text{ш}}$, $K_{\text{пм}}$ понимают их значения на частоте 53 Гц.

Относительная погрешность измерения мощности составляет

$$\gamma_P = \gamma_D + \gamma_{\text{ш}} + \gamma_{\text{пм}} + \delta \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\delta = \varphi_D + \varphi_{\text{ш}} + \varphi_{\text{пм}}$ — суммарная угловая погрешность, выраженная в радианах.

Неисключённая систематическая погрешность измерения (воспроизведения) мощности оценивается как композиция неисключённых остатков относительных погрешностей θ_D , $\theta_{\text{ш}}$, $\theta_{\text{пм}}$, θ_{φ} , каждый из которых оценивается путём элементарного исследования источников погрешности в данных диапазонах напряжений, токов, частот и углов сдвига фаз. Методы исследований основных составляющих НСП эталона рассмотрены в [8, 9, 10—13].

Результаты исследований эталона приведены в таблице для диапазонов напряжений 1—1000 В, сил токов 0,1—10 А и частот 1—2500 Гц при коэффициенте мощности 1, а также 0,5; 0 при индуктивном и ёмкостном сдвигах фазы.

ГЭТ 153—2012 имеет наименьшие СКО, НСП и неопределённость воспроизведения единиц при напряжении 120 В, силе тока 5 А и частоте 53 Гц. Эти значения силы тока и напряжения являются базовыми при ключевых международных сличениях эталонов единицы электрической мощности, и именно при них устанавливается эквивалентность эталонов.

По неопределённости воспроизведения единиц и диапазонам охватываемых напряжений, сил токов, частот и коэффициентов мощности ГЭТ 153—2012 входит в число лучших эталонов развитых стран.

В области частот до 1000 Гц в 2011 г. в РТВ (Германия) проведены совместные исследования ЦИПМ ГПЭ единицы

электрической мощности РТВ и ВНИИМ [13]. Цифровые измерительные преобразователи мощности указанных национальных метрологических институтов имеют различную структуру и основаны на разных методах программной коррекции частотных и угловых погрешностей. Разность в показаниях преобразователей мощности не превышает 5 мВт/(В·А) по модульной и $1,5 \cdot 10^{-6}$ по угловой составляющим погрешности.

В 2011 г. ВНИИМ принял участие в ключевых международных сличениях эталонов электрической мощности стран — участниц Азиатско-Тихоокеанской метрологической программы (APMP).

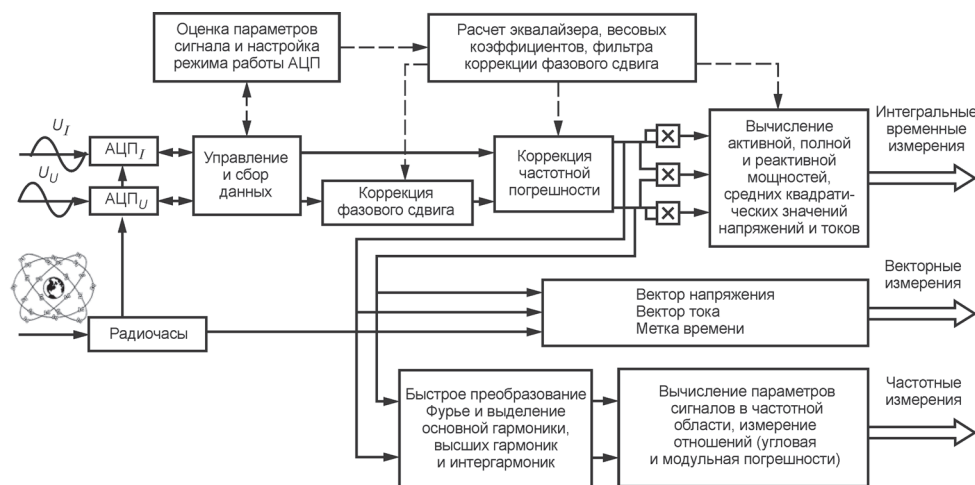


Рис. 3. Структурная схема программного комплекса цифрового измерительного преобразователя мощности

В сличениях ТКЕМ АРМР-ЕМ-К5.1 приняли участие 11 стран, включая Китай, Австралию, Японию и Корею. Сличения проведены с использованием аппаратуры ВНИИМ (ГЭТ 153—2012). В настоящее время готовится отчёт о результатах сличений ТКЕМ АРМР-ЕМ-К5.1, после чего будет проведена корректировка декларируемого ВНИИМ минимального значения расширенной неопределённости измерений электрической мощности в базе данных СМС МКМВ с 50 до $20 \cdot 10^{-6}$ мкВт/В·А.

В 2015 и 2016 гг. планируется участие ГЭТ 153—2012 в очередных ключевых сличениях эталонов единиц мощности на промышленной частоте (ССЕМ К5) и первых в истории сличениях эталонов в режиме измерения мощности гармоник (ССЕМ К13), проводимых под эгидой МБМВ.

Перспективы дальнейшего совершенствования эталона. Принятые в эталоне методы воспроизведения единицы, их математическая и аппаратная реализация обеспечивают широкие возможности его дальнейшего совершенствования, причём преимущественно в результате развития интеллектуальной части структуры. Уже сегодня во ВНИИМ проходят работы по модернизации ГЭТ 153—2012 в трёх основных направлениях: повышение точности воспроизведения единицы и её передачи СИ различных видов электроэнергетических величин; расширение функциональных возможностей эталона; обеспечение возможности передачи единицы от ГПЭ новым видам СИ цифровых подстанций и интеллектуальных энергетических сетей.

Первое, традиционное для эталонных работ, направление предусматривает разработку методов и аппаратуры для исследований ЦИПМ эталона непосредственно с помощью управляемых квантовых мер напряжения постоянного и переменного тока [14], уточнение параметров модулей коррекции частотной и угловой погрешностей, эквалайзера и др. (рис. 3). Ожидаемый эффект — повышение точности воспроизведения единицы мощности в 1,5—2 раза. Второе направление предусматривает проведение теоретических и экспериментальных исследований с целью расширения функциональных возможностей эталона, разработку новых блоков программного обеспечения, оценки и нормирования неопределённостей воспроизведения единиц активной и реактивной мощностей основной и высших гармонических составляющих. Третье направление предусматривает работы по воспроизведению и передаче единиц векторных измерений и по метрологическому обеспечению СИ цифровых подстанций и интеллектуальных энергетических сетей. В векторных АЦП напряжения и силы тока эталона в этом случае должна быть обеспечена синхронизация моментов выборок напряжения и силы тока с UTC, а результат воспроизведения предоставлен в форме цифрового потока по протоколу IEC 61850-9-2LE. Перспективные модули программного комплекса эталона для решения новых задач показаны на рис. 3.

ГЭТ 153—2015 возглавил новую государственную поверочную схему для СИ электрической мощности и энергии [15].

Литература

1. **Шапиро Е. З., Белов В. С., Пушкарёва О. Г., Г. В. Николаева.** Государственный специальный эталон единицы электрической мощности // Измерительная техника. 1990. № 8. С. 3—5.
2. **Oldham N., Nelson T., Bergeest R., Ramm G., Carranza R., Corney A. C., Gibbes M., Kyriazis G., Laiz H. M., Liu L. X., Lu Z., Pogliano U., Rydler K.-E., Shapiro E., So E., Temba M., Wright P.** An international comparison of 50/60 Hz power (1996-1999) // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2001. V. 50. N. 2. P. 356—360. DOI: 10.1109/19.918141.
3. **Безикович А. Я., Шапиро Е. З.** Измерение активной мощности в звуковом диапазоне частот. Л.: Энергия, 1980.
4. **Shapiro E., Budovsky I., Cibbs M., Park Y.** New Power Transfer Standard // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1997. V. 46. N. 2. P. 412—415.
5. **Stenbakken G., Dolev A.** High accuracy sampling wattmeter // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1992. V. 41. P. 974—978.
6. **Gubler G. B., Gutnikov V. S., Shapiro E. Z., Giniyatullin I. A.** Reference power analyzer based on the non-coherent sampling method // CPEM Digest. 2004. P. 368—369.
7. **Gubler G. B.** On the use of windows for measurements of r.m.s., active power and harmonic parameters // CPEM Digest. 2008. P. 206—207.
8. **Gubler G. B.** Reconstruction of bandlimited signal using samples obtained from integration digital voltmeters // CPEM Digest. 2010. P. 257—258.
9. **Filipski P. S., Baghzouz Y.** Discussion of the power definitions contained in the IEEE dictionary // IEEE Trans. Power Delivery. 1994. V. 9. P. 1237—1244.
10. **Gubler G., Katkov A.** Investigation of ADC-aided AC measurement through the use of PJVS // CPEM Digest. 2012. P. 64—65.
11. **Lapuh R.** Accurate Phase Measurement with two Sampling Voltmeters // IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. Budapest, Hungary, May 21—23, 2001.
12. **Shapiro E. Z.** Methods and instrumentation for the characterization of power line harmonics analyzers // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2005. V. 51. P. 600—603.
13. **Gubler G. B., Shapiro E. Z.** Implementation of Sampling Measurement System for new VNIIM power standard // CPEM Digest. 2012. P. 294—295.
14. **Overney F., Rüfenacht A., Braun J.-P., Jeanneret B.** Josephson-based test bench for AC Characterization of ADC // CPEM Digest. 2010. P. 215—216.
15. **ГОСТ 8.551—2013.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической мощности и электрической энергии в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц.

Дата принятия 09.06.2015 г.