



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

■ ЭТАЛОНЫ / MEASUREMENT STANDARDS

DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-1-7-16

УДК 621.317.382.016.25

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 1 ДО 2500 Гц ГЭТ 153–2019

© Г. Б. Гублер, А. Ю. Никитин, Е. З. Шапиро, Н. С. Алексеева

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»
(ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»),
г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: g.b.gubler@vniim.ru, ORCID 0000-0003-1418-3680

Поступила в редакцию – 25 января 2020 г., после доработки – 10 февраля 2020 г.

Принята к публикации – 01 марта 2020 г.

Описаны методы построения, структура, технические и метрологические характеристики многофункционального государственного первичного эталона единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц.

Ключевые слова: электроэнергетические величины, измерение мощности, активная мощность, реактивная мощность, первичный эталон

Ссылка при цитировании:

Многофункциональный государственный первичный эталон единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2019 / Г. Б. Гублер [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16. № 1. С. 7–16. DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-1-7-16.

For citation:

Gubler G. B., Nikitin A. Yu., Shapiro E. Z., Alekseeva N. S. Multifunctional state primary power standard in the frequency range from 1 to 2500 Hz, GET 153-2019. Measurement standards. Reference materials. 2020; 16(1): 7–16. DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-1-7-16 (In Russ.).

MULTIFUNCTIONAL STATE PRIMARY POWER STANDARD IN THE FREQUENCY RANGE FROM 1 TO 2500 Hz, GET 153–2019

© G. B. Gubler, A. Yu. Nikitin, E. Z. Shapiro, N. S. Alekseeva

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM),
Saint Petersburg, Russia
e-mail: g.b.gubler@vniim.ru, ORCID 0000-0003-1418-3680

Received – 25 January, 2019. Revised – 10 February 2020.

Accepted for publication – 01 March, 2020.

This paper describes measurement techniques, structure, technical characteristics and results of the uncertainty analysis for primary multifunction power standard in the frequency range from 1 Hz to 2500 Hz.

Keywords: primary electrical power standard, active power, reactive power, power quality

Введение

Совершенствование системы измерений электро-энергетических величин (ЭЭВ) относится к одному из приоритетных направлений развития электроэнергетики, важнейшей отрасли экономики страны. Измерения ЭЭВ (более 20 наименований только наиболее используемых) во всем многообразии их проявления, по существу, служат источником исходной информации, необходимой для управления энергетическими объектами (электрические станции, распределительные сети, потребители) и для коммерческих операций на внутренних и внешних энергетических рынках, где электрическая энергия выступает как товар.

Работы по обеспечению единства измерений ЭЭВ как отдельной ветви электрических измерений проводятся во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева с 50-х годов прошлого века. Созданный впервые в 1986 г. Государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы электрической мощности ГЭТ 153–86 [1] и радикально модернизированный и утвержденный в 2012 г. ГПЭ ГЭТ 153–2012 [2] обеспечили централизованное воспроизведение и передачу экономически наиболее важных единиц ЭЭВ – электрической мощности и энергии. Уровень точности ГПЭ ГЭТ 153 подтвержден ключевыми международными сличениями ССЕМ-K5 (1996–2000 гг.), АРМР.ЕМ-K5.1 (2010–2013 гг.), СООМЕТ.ЕМ-K5 (2017–2019 гг.) и соответствует лучшим мировым образцам.

Требования к точности и объемам измерительной информации, получаемой от средств измерений (СИ)

ЭЭВ, постоянно возрастают, что особенно заметно в последнее десятилетие в связи с массовым переходом к автоматическим информационно-измерительным системам управления и обеспечения безопасности и, в перспективе, к интеллектуальным электрическим сетям (SmartGrid). Наиболее полно этим требованиям отвечают современные цифровые многофункциональные СИ ЭЭВ, позволяющие одновременно регистрировать совокупность ЭЭВ, определяющих текущее состояние сети и характер необходимых управляющих воздействий.

Широкое распространение многофункциональных СИ ЭЭВ, уже составляющих основу парка СИ в электроэнергетике, обострило проблему их метрологического обеспечения на стадиях производства и эксплуатации.

Калибровка и поверка таких СИ сегодня немалым образом осложняются необходимостью наличия соответствующих многофункциональных эталонных СИ, которые позволяют сократить объем аппаратуры и время калибровки (поверки) с нескольких рабочих дней до нескольких часов. Отечественные и зарубежные модели многофункциональных эталонных СИ, в свою очередь, требуют обеспечения метрологической прослеживаемости результатов их измерений к эталонам основных единиц электрических величин. Непосредственная метрологическая прослеживаемость к первичным эталонам единиц электрических величин на переменном токе обеспечена только для среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и силы тока и для электрической мощности. Для остальных ЭЭВ исследования метрологических характеристик эталонных

СИ выполняются на основании различных для каждой ЭЭВ трудоемких экспериментально-расчетных методик оценки неопределенности измерений. Единый подход к разработке таких методик и средствам их аппаратной реализации затрудняет обеспечение единства выполняемых с их помощью измерений.

Задача обеспечения прослеживаемости результатов измерений ЭЭВ потребовала существенной модернизации верхних уровней эталонной базы электроэнергетических измерений с целью централизованного воспроизведения единиц ЭЭВ и их регламентированной передачи рабочим эталонам. Эта задача может быть решена путем создания ряда отдельных ГПЭ единиц ЭЭВ, что экономически и технически нецелесообразно в связи большим количеством ЭЭВ, которое постоянно возрастает с изменениями потребностей электроэнергетики. Более рациональным представляется путь создания единого многофункционального эталонного программно-аппаратного комплекса, который наилучшим образом обеспечит передачу единиц ЭЭВ многофункциональным СИ ЭЭВ и возможность дальнейшего развития. Этот путь реализован в новом многофункциональном государственном первичном эталоне единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153–2019¹, утвержденном в 2019 г.

В качестве первого этапа решения крупной задачи воспроизведения единиц измерений ЭЭВ выбран ряд

¹Об утверждении Государственного первичного эталона единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц»: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

наиболее важных для практической энергетики величин, включающий, помимо активной и реактивной электрической мощности, показатели качества электрической энергии (ПКЭ) и параметры электрических сетей (ПЭС), характеризующие гармонический состав сигналов напряжения и тока, углы сдвигов фаз их основных гармоник и несимметрию трехфазных электрических сетей. Для части характеристик напряжения сети (например, для коэффициентов гармоник или коэффициентов несимметрии в трехфазных сетях) понятия ПЭС и ПКЭ во многом совпадают.

Структура и состав ГПЭ ГЭТ 153–2019

Эталон ГЭТ 153-2019 представляет собой многофункциональную измерительную систему, состоящую из ряда реальных (аппаратно-реализованных) и виртуальных (программно-реализованных) подсистем, каждая из которых воспроизводит единицы одной или нескольких взаимосвязанных электроэнергетических величин, используя частично аппаратуру других подсистем. Принцип «открытой архитектуры», положенный в основу структуры многофункционального эталона, предусматривает возможность дальнейшего расширения его функций, например, в части воспроизведения единиц векторных величин или единиц ЭЭВ, передаваемых цифровыми копиями сигналов тока и напряжения. Структура ГЭТ 153-2019 представлена на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

Описание рис. 1:

1 – Базовая подсистема – подсистема воспроизведения единиц активной (Вт) и реактивной (вар) электрической мощности, включающая средства общей

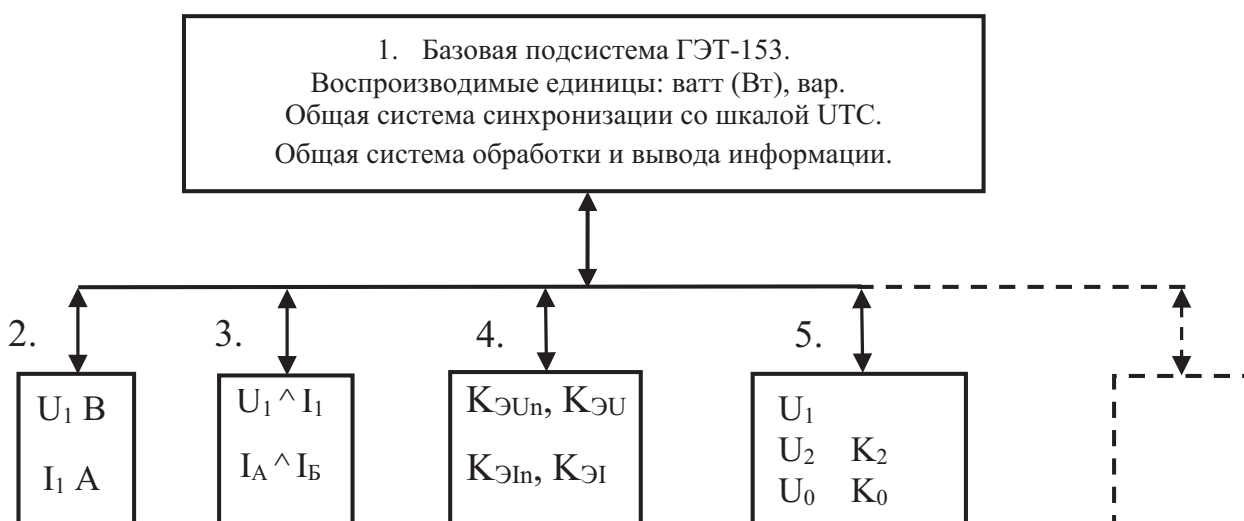


Рис. 1. Обобщенная структура многофункционального ГПЭ ГЭТ 153-2019

Fig. 1. Generalized structure of the multifunctional state primary standard GET 153-2019

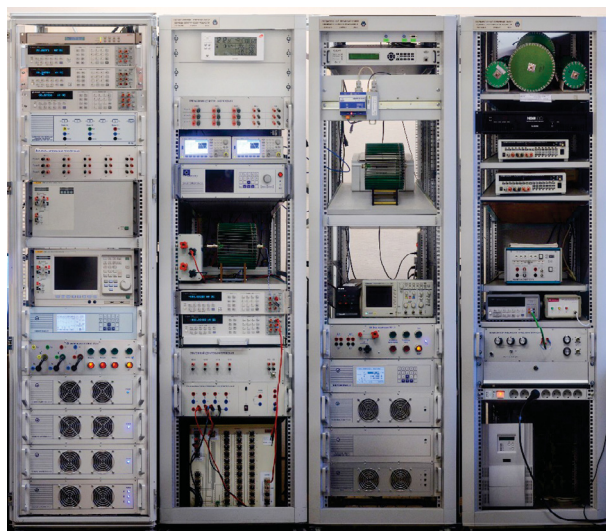


Рис. 2. Внешний вид многофункционального
ГПЭ ГЭТ 153-2019

Fig. 2. Appearance of the state multifunction power standard
GET 153-2019

синхронизации аппаратуры ГЭТ 153-2019 и общие средства математической обработки и представления результатов измерений;

2 – Подсистема воспроизведения единиц напряжения (U_1) и тока (I_1) основных гармоник несинусоидального напряжения и тока;

3 – Подсистема воспроизведения единиц углов сдвига фаз между основными гармониками напряжения U_1 и тока I_1 в однофазных сетях и углов сдвига фаз между основными гармониками любых двух напряжений или двух токов в трехфазных сетях;

4 – Подсистема воспроизведения единиц коэффициентов гармоник ($K_{ЭГ}$): напряжения ($K_{ЭУ}(n)$), тока ($K_{ЭI}(n)$) и суммарных коэффициентов гармоник ($K_{ЭУ}$, $K_{ЭI}$) в области возможных частот электропитания 40–400 Гц;

5 – Подсистема воспроизведения единиц напряжения прямой (U_1), обратной (U_2) и нулевой (U_0) последовательностей и коэффициентов несимметрии напряжения обратной (K_2) и нулевой (K_0) последовательностей в трехфазных сетях;

Пунктиром на рис. 1 показана возможность дальнейшего наращивания функций эталона.

В состав первичного многофункционального ГЭТ 153-2019 входит аппаратура ГПЭ ГЭТ 153-2012 (три стойки справа на рис. 2) и дополнительная установка, обеспечивающая расширение функций нового эталона (стойка слева на рис. 2).

Выбор подсистемы воспроизведения единиц активной и реактивной электрической мощности в качестве базовой обусловлен тем, что в ее состав входит большинство эталонных СИ и вспомогательных элементов, необходимых для создания показанных выше подсистем. Базовая подсистема в полном объеме включает ГПЭ ГЭТ 153-2012 [2], длительные исследования которого, и проведенные с его участием ключевые международные сличения подтвердили корректность оценки составляющих бюджета неопределенности воспроизведения единиц электрической мощности. Эти составляющие далее были использованы при оценке неопределенностей воспроизведения единиц остальных ЭЭВ эталоном ГЭТ 153-2019.

Структура базовой подсистемы ГЭТ 153-2019 представлена на рис. 3.

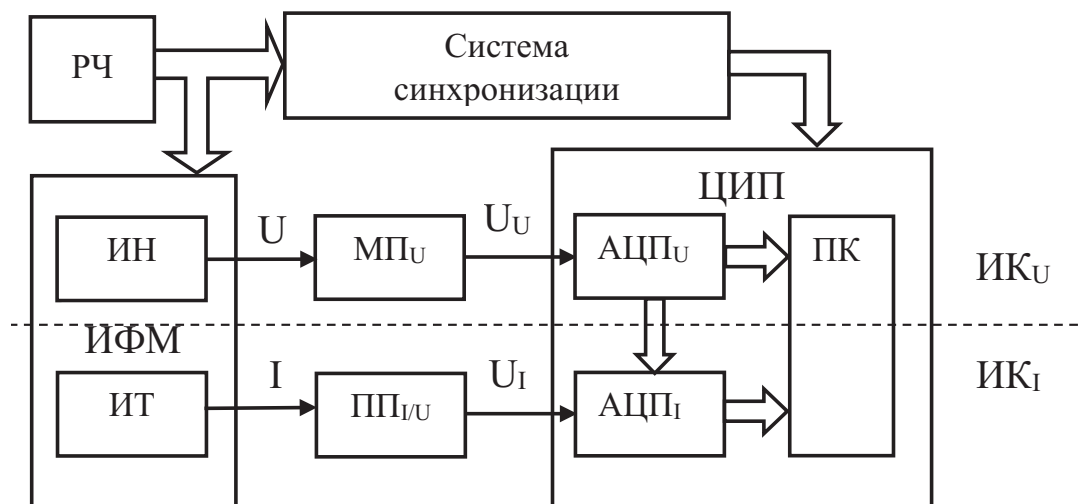


Рис. 3. Обобщенная структура базовой подсистемы ГПЭ

Fig. 3. The generalized structure of the basic subsystem of the power standard

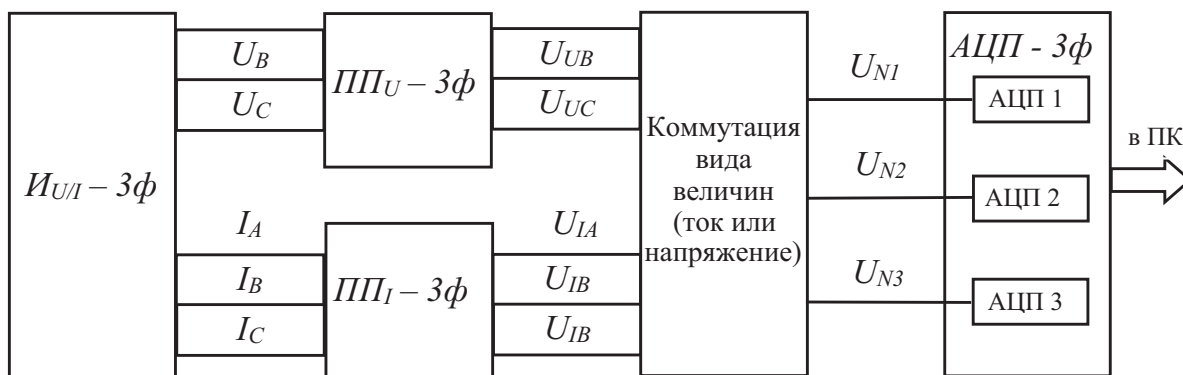


Рис. 4. Структурная схема дополнительной установки

Fig. 4. Block diagram of an additional installation

Описание рис. 3:

ИК_U и ИК_I – измерительные каналы напряжения и тока соответственно;

И_U и И_I – синхронизированные источники напряжения и тока соответственно;

МП_U – масштабный преобразователь напряжения (индуктивный или резистивный делитель напряжения);

ПП_{I/U} – первичный преобразователь тока в напряжение (шунт или электронный измерительный трансформатор тока);

ЦИП – цифровой измерительный преобразователь;

АЦП_U и АЦП_I – синхронизированные АЦП напряжений U_U и U_I;

ПК – персональный компьютер;

РЧ – радиочасы.

Структура и состав дополнительной установки, обеспечивающей функции подсистем воспроизведения единиц параметров трехфазных сетей, представлены на рис. 4.

Описание рис. 4:

И_{U/I}-3φ – программируемый трехфазный источник напряжения и тока;

ПП_U-3φ и ПП_I-3φ – трехфазные первичный преобразователи напряжения и тока;

АЦП-3φ – трехфазный аналого-цифровой преобразователь, включающий три отдельных АЦП, которые объединены общей системой синхронизации эталона;

КР – коммутатор режима, определяющий вид воспроизводимой единицы.

Воспроизведение единиц ЭЭВ

В крупном плане все подсистемы эталона реализуют основной принцип построения современных СИ

ЭЭВ, состоящий в синхронном аналого-цифровом преобразовании мгновенных значений одного или нескольких электрических сигналов (метод выборок) и последующей обработке массивов результатов этих преобразований.

Для метода выборок существуют специфические составляющие неопределенности воспроизведения единиц всех отмеченных ЭЭВ. Эти составляющие обусловлены частотными и угловыми погрешностями цифрового измерительного преобразователя мощности, несовершенством синхронизации процесса взятия выборок в двух (трех) АЦП, соотношением и некогерентностью частот основной гармоники f_1 преобразуемых сигналов и частоты их дискретизации f_d . В ходе работ по совершенствованию ГЭТ 153 были исследованы эти составляющие и выполнена возможная коррекция с помощью алгоритмов цифровой обработки сигналов (эквалайзеров, фазосдвигающих звеньев) и путем применения специальных весовых окон [2–4]. Далее для каждой подсистемы эталона показаны исходные соотношения, определяющие алгоритмы воспроизведения единиц, диапазоны их воспроизведения и области напряжений, токов и частот, при которых они воспроизводятся.

Подсистема 1 (базовая) воспроизводит единицы активной (P) и реактивной (Q) электрической мощности путем численного интегрирования за установленное число периодов m произведения синхронно полученных мгновенных значений напряжений U_{Uj} и U_{Ij} в соответствии с уравнениями:

$$P = \sum_{j=0}^{N-1} w_j \cdot U_U(t_j) \cdot U_I(t_j), \quad (1)$$

и

$$Q = \sum_{j=0}^{N-1} w_j \cdot U_U(t_j) \cdot U_I(t_j + \frac{T}{4}), \quad (2)$$

где j – номер выборки;

T – период основной частоты f_1 ;

N – количество выборок за m периодов T ;

w_j – весовые коэффициенты окна.

Единицы воспроизводятся в диапазоне от 0 до 50000 Вт (вар) в области частот от 1 до 2500 Гц, в диапазонах напряжения от 0,01 до 1000 В, силы тока от 0,01 до 50 А при любых значениях коэффициентов мощности. Расширение диапазона силы тока до 50 А, и, соответственно, мощности до 50000 Вт (вар) обеспечено в ГЭТ 153-2019 по сравнению с ГЭТ 153-2012 за счет эталонного электронного двухступенчатого измерительного трансформатора тока [5].

Подсистема 2 воспроизводит единицы напряжения U_1 и тока I_1 основной гармоники полигармонического сигнала в диапазоне основных частот от 40 до 400 Гц при напряжении от 0,01 до 1000 В, силе тока от 0,01 до 50 А и наличии гармонических составляющих порядка от 2-й до 50-й (частота высшей гармоники не более 2500 Гц). Это виртуальная подсистема, специфика которой определяется алгоритмами воспроизведения единиц и программным обеспечением.

Единица основной гармоники напряжения U_1 воспроизводится в измерительном канале ИКУ подсистемы 1 (рис. 3) путем анализа полигармонического сигнала в частотной области с использованием метода квазикогерентной выборки с последующим оконным преобразованием Фурье и интерполяцией спектра сигнала [4, 6]. Единица U_1 воспроизводится в форме СКЗ напряжения при обязательном условии измерения и регистрации частоты (f_1) основной гармоники, выделенной из полигармонического сигнала. В этом состоит принципиальное отличие единицы напряжения основной гармоники, воспроизведенной с помощью методов анализа в частотной области, от единицы напряжения переменного тока, воспроизведенной классическими методами (например, путем AC/DC преобразования) во временной области.

Процедура воспроизведения единицы силы тока основной гармоники I_1 аналогична процедуре воспроизведения единицы U_1 . Отличие состоит в необходимости первичного преобразования переменного тока в пропорциональное ему напряжение U_1 с помощью шунта или электронного измерительного трансформатора в измерительном канале тока подсистемы 1. С учетом этого далее для одноименных единиц рассматриваются только процедуры воспроизведения единиц напряжения.

Подсистема 3 воспроизводит единицу угла сдвига фаз ($\varphi_{Y1/Y2}$) между векторами Y_1 и Y_2 основных гармоник двух полигармонических сигналов. В однофазной сети это угол сдвига фаз между напряжением и током ($\varphi_{U/I}$), в трехфазной сети это угол сдвига фаз между двумя фазными напряжениями U_A и U_B (φ_{UaUb}) или между двумя токами I_A и I_B (φ_{IaIb}), например, для фаз А и В. Единица угла сдвига фаз воспроизводится в диапазоне от 0 до 360°, в диапазонах напряжения – 0,01 до 500 В, силы тока – 0,01 до 50 А и частоты основной гармоники – 40 до 400 Гц.

В любом случае единица угла воспроизводится путем определения скалярного (SP) и псевдоскалярного (VP) произведения векторов напряжений Y_1 и Y_2 по формулам (3–6):

$$SP = |Y_1| \cdot |Y_2| \cdot \cos \varphi_{Y1/Y2} \quad (3)$$

$$VP = |Y_1| \cdot |Y_2| \cdot \sin \varphi_{Y1/Y2} \quad (4)$$

$$\varphi_{Y1/Y2} = \arccos (SP / |Y_1| \cdot |Y_2|) \quad (5)$$

$$\varphi_{Y1/Y2} = \arcsin (VP / |Y_1| \cdot |Y_2|) \quad (6)$$

При воспроизведении угла $\varphi_{U/I}$ в однофазной сети SP и VP представляют собой активную и реактивную электрические мощности, воспроизводимые одновременно хорошо исследованной подсистемой 1, что позволяет использовать известную оценку угловой погрешности ГЭТ 153 при воспроизведении угла $\varphi_{U/I}$ и коэффициентов мощности $\cos \varphi_{U/I}$ и $\sin \varphi_{U/I}$. В этом случае Y_1 и Y_2 – это напряжения U_U и U_I соответственно (см. также рис. 3).

Выбор одной из функций воспроизведения (SP или VP) определяется областью значений, в которой воспроизводится угол. Выбирается та функция, значение производной которой (чувствительность по аргументу) в данной области больше.

В областях значений углов $0 \pm 45^\circ$ и $180 \pm 45^\circ$ используется VP и функция $\arcsin$, в областях значений углов $90 \pm 45^\circ$ и $270 \pm 45^\circ$ используется SP и функция $\arccos$.

Единица угла сдвига фаз φ_{UaUb} или φ_{IaIb} между одноименными основными гармониками напряжения или тока в двух разных фазах трехфазной сети воспроизводится с использованием дополнительной установки (рис. 4). Выбор пар фаз, для которых определяются углы между векторами напряжений или токов, и соответствующих пар АЦП определяется заданным состоянием коммутатора.

Подсистема 4 воспроизводит единицу коэффициентов гармоник напряжения ($K_{\Sigma U(n)}$), тока ($K_{\Sigma I(n)}$) и суммарных коэффициентов гармоник ($K_{\Sigma U}$, $K_{\Sigma I}$) порядка

n при значениях n от 2 до 50. Единица воспроизводится в диапазоне от 0,03 до 50 % для гармоник напряжения и от 0,03 до 100 % для гармоник тока в области основных частот электроснабжения от 40 до 400 Гц при значениях напряжения от 0,1 до 500 В и силы тока от 0,01 до 10 А.

Единицы коэффициентов гармоник ($K_{ЭГ}$) воспроизводятся методом суперпозиции сигнала основной гармоники и одной или нескольких гармонических составляющих. Высшие гармонические составляющие полигармонических сигналов определяются в области частот до 2500 Гц, т. е. до 50-й гармоники при основной частоте 50 Гц (что требуют стандарты на ПКЭ) и до 6-й гармоники при основной частоте 400 Гц.

При воспроизведении единицы КЭГ программируемыми источниками напряжения или тока формируются тестовые полигармонические сигналы, несущие воспроизведенные значения КЭГ в виде суммы предуготовленного набора значений гармонических составляющих, например, с гармониками: 2-й (15 %), 5-й (25 %), ... 17-й (1 %).

Коэффициенты гармоник $K_{ЭU(n)}$ и $(K_{ЭI(n)})$ определяются как отношение действующего значения напряжения или тока n-й гармоники к действующему значе-

нию основной гармоники, а суммарные коэффициенты $K_{ЭU}$, $K_{ЭI}$ рассчитываются по формулам:

$$K_{ЭU} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} \%$$

и

$$K_{ЭI} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \% \quad (7)$$

где N – целое не более 50.

Подсистема 5 воспроизводит единицу напряжений прямой (U_1), обратной (U_2) и нулевой (U_0) последовательностей в трехфазных сетях в диапазонах: напряжений от 0,01 до 500 В, и частот основной гармоники – 40 до 70 Гц и единицу коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (K_2) и нулевой (K_0) последовательностям в диапазоне значений от 0 до 50 %.

Трехфазная система напряжений с заданными характеристиками несимметрии формируется источником дополнительной установки. При воспроизведении

Таблица 1. Результаты исследований Государственного первичного эталона единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2019 приведены в таблице

Table 1. The research results of the State primary standard of a unit of electric power in the frequency range from 1 to 2500 Hz GET 153-2019 are shown in the table

Величина, (единица)	S (u_a)	Θ	u_b	U_P
Мощность* (Вт) % (вар) %	1,1·10 ⁻⁴ – 2·10 ⁻⁴ 1,3·10 ⁻⁴ – 6,8·10 ⁻⁴	8·10 ⁻⁴ – 55·10 ⁻⁴ 21·10 ⁻⁴ – 18·10 ⁻³	3,5·10 ⁻⁴ – 23·10 ⁻⁴ 8,9·10 ⁻⁴ – 7,6·10 ⁻³	7,2·10 ⁻⁴ – 46·10 ⁻⁴ 18·10 ⁻⁴ – 15·10 ⁻³
Основная гармоника* U_1 (В), I_1 (А) %	1·10 ⁻⁴ – 4·10 ⁻⁴	4,9·10 ⁻⁶ – 1,72·10 ⁻⁴	1,7·10 ⁻⁴ – 1·10 ⁻³	4,2·10 ⁻⁴ – 2·10 ⁻³
Углы сдвига фаз** φ_{U1} , φ_{UaUb} , φ_{IaIb} (градус)	5·10 ⁻⁵ – 5·10 ⁻⁴	5,8·10 ⁻⁴ – 5,8·10 ⁻³	2,5·10 ⁻⁴ – 2,5·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴ – 5·10 ⁻³ f (40–400) Гц
Коэфф. гармоник $K_{Эг} < 1^{**} \%$ $K_{Эг} > 1^{*} \%$	2·10 ⁻⁵ – 5·10 ⁻⁵ 0,001–0,002	0,8·10 ⁻⁴ – 5,8·10 ⁻⁴ 0,007–0,011	0,3·10 ⁻⁴ – 2,5·10 ⁻⁴ 0,003–0,0045	0,7·10 ⁻⁴ – 1·10 ⁻⁴ 0,006–0,01
U_1 , U_2 , U_0 (В)*** %	4·10 ⁻⁴ – 7·10 ⁻⁴	0,0024–0,0049	0,001–0,002	0,0021–0,0042
K_2 , K_0 ** %	5·10 ⁻⁴ – 1·10 ⁻³	0,0038–0,0075	0,0015–0,003	0,0032–0,0063

* – относительные значения;

** – абсолютные значения;

*** – приведенные к поддиапазону измерений значения

этих единиц коммутатор (см. рис. 4) устанавливает на входах АЦП₁, АЦП₂ и АЦП₃ фазные напряжения U_A , U_B и U_C соответственно.

Единицы напряжений U_1 , U_2 и U_0 воспроизводятся расчетным путем по алгоритму вычисления симметричных векторов трехфазных сигналов [7] как результат обработки массивов синхронизированных выборок мгновенных значений фазных напряжений U_A , U_B и U_C с помощью специализированных блоков ПО, обеспечивающих анализ параметров векторных величин.

Единицы коэффициентов несимметрии K_2 и K_0 воспроизводятся расчетным путем как отношения действующих значений напряжений обратной U_2 и нулевой последовательности U_0 соответственно к напряжению прямой последовательности U_1 в соответствии со стандартом [8].

Результаты исследований ГПЭ ГЭТ 153-2019

В ходе исследований проведены оценки следующих показателей точности эталона: СКО среднего арифметического результатов измерений (S); доверительных границ неисключенной систематической погрешности (НСП) измерения (Θ); неопределенностей воспроизведения единиц по типу А (u_a) и типу В (u_b); суммарной стандартной (U_Σ) и расширенной неопределенности (U_p) при коэффициенте охвата $k=2$.

НСП воспроизведения каждой ЭВВ оценивалось как композиция неисключенных остатков составляющих погрешностей их измерений, исследованных путем оценки источников погрешности в диапазонах напряжений, токов, частот, отмеченных выше. Методы исследований основных составляющих НСП эталона рассмотрены в [2, 3, 9–11].

По диапазонам и неопределенности воспроизведения единиц ЭЭВ и диапазонам напряжений, токов и частот ГЭТ 153-2019 обеспечивает потребности отечественного энергетического приборостроения. По ре-

результатам международной деятельности ВНИИМ включен в проводимые впервые ключевые сличения ВРМ ССЕМ-K13 «Сличения эталонов электрической мощности при измерении гармоник тока и напряжения промышленной частоты» (участие ВНИИМ в 2020 г.). В этих сличениях ВРМ с достаточно ограниченным кругом участников ВНИИМ представляет региональные организации КООМЕТ и АРМР.

Перспективы дальнейшего совершенствования эталона

Принятая в ГЭТ 153-2019 открытая архитектура структуры эталона позволяет наращивать его новыми подсистемами при максимальном использовании аппаратуры и программного обеспечения действующих подсистем. Как одно из первостепенных направлений совершенствования эталона рассматривается расширение его функций в область метрологического обеспечения цифровых подстанций интеллектуальных сетей. Развитие этого направления предусматривает создание подсистем воспроизведения и передачи единиц векторных измерений (параметров синхрофазоров) и единиц ЭВБ, представленных цифровыми копиями аналоговых величин (числовыми потоками в формате протокола IEC 61850–9–2). Традиционная для эталона единиц ЭВБ задача повышения точности и расширения частотного диапазона предусматривает проведение исследований с использованием квантовых мер переменного напряжения [11], [12].

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный специальный эталон единицы электрической мощности / Е.З. Шапиро [и др.] // Измерительная техника. 1990. № 8. С. 3–5.
2. Гублер Г. Б., Шапиро Е. З., Никитин А. Ю. Государственный первичный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2012 // Измерительная техника. 2016. Т. 59. № 1. С. 3–7.
3. 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. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2008.4574725>
4. Grandke T. Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1983. Vol. 32. № 2, pp. 350–355. <https://doi.org/10.1109/TIM.1983.4315077>
5. Захаров Б. В., Шаталов А. Н. Погрешности двухступенчатого трансформатора тока // Измерительная техника. 1980, № 4. С. 41–42.
6. Вьюхин В. Н., Попов Ю. А., Тани Ю. Л. Исследование метода когерентной выборки для тестирования высокоразрядных АЦП // Автометрия. 1997. № 5.

7. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Т. 1. 4-е изд. / К. С. Демирчян [и др.]. СПб. 2003. 463 с.
8. ГОСТ 30804.4.30–2013 (IEC 61000–4–30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М: Стандартинформ, 2014. 9 с.
9. Josephson arbitrary waveform synthesizer as a reference standard for the measurement of the phase of harmonics in distorted waveforms / D. Georgakopoulos et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol.68 № 6. pp. 1927–1934. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2877828>
10. Gubler G. Extension of a waveform reconstruction algorithm for a DVM with an Integrating ADC. Conference on precision electromagnetic measurements (CPEM 2018). Paris, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500991>
11. Aguilar J. D., Salinas J. R., Kieler O. F., Caballero R., Behr R., Sanmamed Y. A., Méndez Á. R. Characterization of an analog-to-digital converter frequency response by a Josephson arbitrary waveform synthesizer. Measurement Science and Technology 2019. Vol. 30. № 3. 035006 <https://doi.org/10.1088/1361-6501%2Faafb27>
12. Katkov A., Shevtsov V., Gubler G. VNIIM 10 V programmable josephson voltage standard. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). Paris, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500892>

REFERENCE

1. Shapiro E. Z., Belov V. S., Pushkareva O. G., Nikolaeva G. V. National special standard for the unit of electrical power. Izmer. Tekhn.=Measurement Techniques. 1990; 32(8); 3–5. (In Russ.)
2. Gubler G. B., Nikitin A. Y., Shapiro E. Z. National primary standard for the unit of electrical power at frequencies from 1 to 2500 Hz, GET 153-2012. Measurement Techniques. 2016;59(1);3–7. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0906-4> (In Russ.)
3. Gubler G. On the use of windows for measurements of R.M.S., active power and harmonic parameters. CPEM Digest. 2008;206–2017. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2008.4574725>
4. Grandke T. Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1983;32(2):350–355. <https://doi.org/10.1109/TIM.1983.4315077>
5. Zakharov B. V., Shatalov A. N. Pogreshnosti dvukhstupenchatogo transformatora toka [Errors of a two-stage current transformer]. Izmer. Tekhn.=Measurement Techniques. 1980; (4). pp. 41-42 (In Russ.)
6. V'iukhin V. N., Popov Iu. A., Tani Iu. L. Issledovanie metoda kogerentnoi vyborki dlia testirovaniia vysokorazriadnykh ATsP [Research of the coherent sampling method for testing high-bit ADCs]. Avtometriia. 1997;(5). (In Russ.)
7. Demirchian K. S., Neiman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. In 3 volumes. Textbook for universities. T. 1. 4th ed. Sankt-Peterburg, 2003. 463 p.
8. ГОСТ 30804.4.30–2013 (IEC 61000–4–30:2008) Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods. Standartinform Publ., 2014. 9 p. (In Russ.)
9. Georgakopoulos D., Budovsky I., Benz S. P. Gubler G. Josephson arbitrary waveform synthesizer as a reference standard for the measurement of the phase of harmonics in distorted waveforms. In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019;68(6): 1927–1934. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2877828>
10. Gubler G. Extension of a waveform reconstruction algorithm for a DVM with an Integrating ADC. Conference on precision electromagnetic measurements (CPEM 2018). Paris, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500991>
11. Aguilar J. D., Salinas J. R., Kieler O. F., Caballero R., Behr R., Sanmamed Y. A., Méndez Á. R. Characterization of an analog-to-digital converter frequency response by a Josephson arbitrary waveform synthesizer. Measurement Science and Technology 2019;30(3):035006. <https://doi.org/10.1088/1361-6501%2Faafb27>
12. Katkov A., Shevtsov V., Gubler G. VNIIM 10 V programmable josephson voltage standard. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). Paris, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500892>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гублер Глеб Борисович – канд. техн. наук, руководитель лаборатории государственных эталонов в области электроэнергетики ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», ученый-хранитель ГЭТ 153.

Российская Федерация, 195220,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19,
e-mail: g.b.gubler@vniim.ru
ORCID0000-0003-1418-3680

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gleb B. Gubler – PhD (Engineering), head of power and energy standards laboratory D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: g.b.gubler@vniim.ru
ORCID0000-0003-1418-3680

Шапиро Ефим Зиновьевич – докт. техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории государственных эталонов в области электроэнергетики ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», заслуженный метролог Российской Федерации.
e-mail: e.z.shapiro@vniim.ru

Никитин Александр Юрьевич – заместитель руководителя лаборатории государственных эталонов в области электроэнергетики ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева».

Российская Федерация, 195220,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19,
e-mail: a.nikitin@vniim.ru

Алексеева Надежда Сергеевна – научный сотрудник лаборатории государственных эталонов в области электроэнергетики ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», помощник ученого-хранителя ГЭТ 153.

Российская Федерация, 195220,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19,
e-mail: n.s.alekseeva@vniim.ru

Efim Z. Shapiro – PhD (Engineering), principal research scientist of electric power and energy standards laboratory D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, honoured metrologist of the Russia.
e-mail: e.z.shapiro@vniim.ru

Alexander Yu. Nikitin – deputy head of power and energy standards laboratory D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: a.nikitin@vniim.ru

Nadezda S. Alekseeva – research scientist of electric power and energy standards laboratory, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: n.s.alekseeva@vniim.ru