

А.Н. Попенака¹, А.И. Колбасин², Н.М. Маслова²

¹ООО НПП ТУНИКА, Харьков, Украина

²ННЦ "Институт метрологии", Харьков, Украина

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ СРЕДСТВ ПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

The technology of mode parameters vector measurement is described. Hardware-measuring-computer complex is suggested for testing a wide range of power measuring instruments. The dual channel synchronous analog-to-digital converter (ADC) connected to the voltage divider and the shunt is a single-phase power meter. Stages of calibration of electrical energy and power meters are considered. The measurement uncertainty at calibration of devices for electrical energy and power meters verification is evaluated. The results of the calibration of the two reference meters are presented as an example.

Ключевые слова: неопределенность измерений, векторные измерения, калибровка, мощность, электрическая энергия, переменное напряжение, ток, измерительный преобразователь.

В настоящее время стоимость любой продукции определяется энергоёмкостью её производства в значительно большей степени, чем материало- и даже наукоёмкостью. Как результат — особое внимание к учёту энергоносителей и в частности электроэнергии, следствием чего стал стремительный рост производства счётчиков электроэнергии и улучшение их точностных характеристик. Это обусловило развитие эталонной базы и системы передачи единицы электрической мощности, следствием чего стало создание соответствующей поверочной схемы [1].

Вместе с тем счётчики электрической энергии стали снабжаться дополнительными функциями, в частности такими, как измерение параметров качества электроэнергии. В последние 10 лет это подтолкнуло развитие эталонной базы в сфере измерения качества электроэнергии, восходящей к эталонам напряжения и силы тока, и существующей независимо от системы передачи единицы мощности. Такой порядок вещей стал привычным, и уже забылось, что активная мощность — это произведение напряжения, силы тока и косинуса угла между ними.

С другой стороны, в последние годы в энергосистемах технически развитых стран интенсивно внедряются технологии векторных измерений режимных параметров, прежде всего векторов напряжения и тока основной гармоники. Выполняются такие измерения специальными устройствами, которые в мире принято обозначать аббревиатурой PMU (Phasor Measurement Unit), или их функции реализуют в существующих аппаратных средствах, в частности в устройствах защиты, регистраторах, и тому подобных. Такие измерения, полученные в разных точках энергосистемы и синхронизированные во времени, являются основой мониторинга режимов и создают информационную базу для более эффективного решения многих традиционных и новых задач в области автоматизи-

рованного диспетчерского и автоматического противоаварийного управления энергосистем [2].

Несмотря на то, что полученные векторы напряжения и тока позволяют найти мощность и энергию, это направление активно не используется для учета электроэнергии. Основными причинами остаются как недостаточная точность получения фаз векторов (на сегодня приемлемой считается погрешность на уровне десятых градуса [3]), так и отсутствие метрологического обеспечения таких измерений.

Однако существует возможность разработки рабочих эталонов, которые с одной стороны обеспечивают получение единицы электрической мощности, а с другой используют принципы векторных измерений и является средством поверки PMU устройств современной электроэнергетической системы.

Нами был создан эталонный имитатор измеритель параметров электрической энергии ИВПЕЕ-3Ф-1, разработанный на базе программно-аппаратного измерительно-вычислительного комплекса «Метролог», в основу которого положены векторные измерения напряжения и тока, измерения частоты. Комплекс предназначен для поверки широкого спектра измерительных приборов, используемых в электроэнергетике, а также для лабораторных и полевых измерений электроэнергетических величин и их анализа.

Исходными величинами для получения единицы электрической мощности в комплексе являются единицы переменного напряжения и тока, получаемые от калибратора Fluke5720A, работа которого основана на термопреобразовании. Синхронизация напряжения и тока осуществляется средствами комплекса.

В общем случае однофазным измерителем мощности является синхронный двухканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключенный к масштабным преобразователям напряжения и тока — делителю напряжения и шунту. Делитель

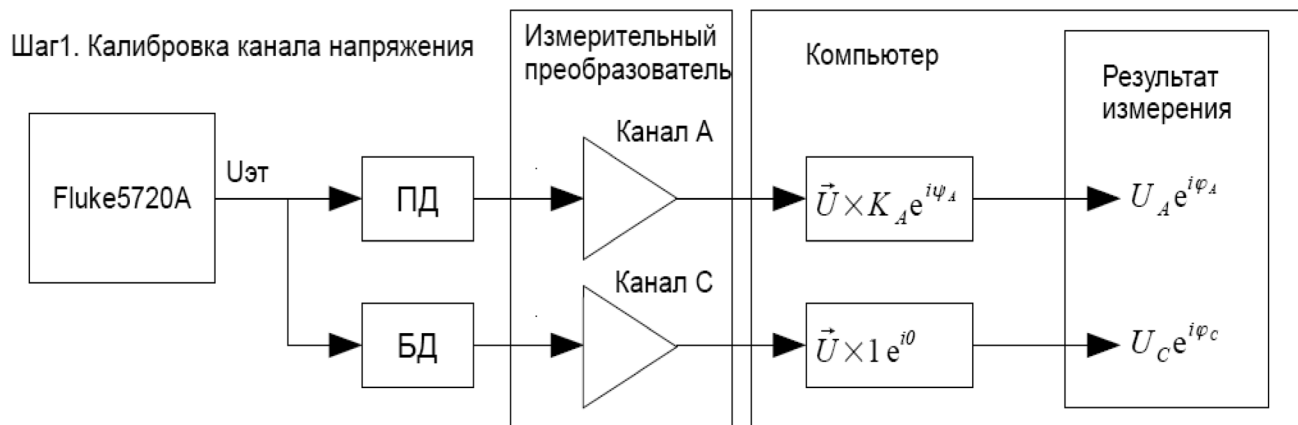


Рис. 1. Калибровка канала напряжения

и шунт при этом должны не только иметь стабильный коэффициент преобразования, но и не вносить фазового сдвига. Изготовление таких масштабных преобразователей является нетривиальной задачей.

Применение принципа векторных измерений позволило отказаться от столь высоких требований к масштабным преобразователям, поскольку появилась возможность независимо откалибровать коэффициент амплитудного преобразования и фазовый сдвиг системы «масштабный преобразователь — АЦП» в сборе. Таким образом, вместо прецизионного безреактивного делителя мы используем два: прецизионный делитель с неизвестным фазовым сдвигом используется для масштабирования амплитуды напряжения, безреактивный делитель с нестабильным коэффициентом деления используется для калибровки фазы вектора напряжения.

Для получения единицы измерения мощности переменного тока был изготовлен измерительный преобразователь, содержащий трёхканальный синхронный АЦП. Вход А подключен к прецизионному делителю напряжения ПД, вход В к прецизионному токовому шунту ПШ, вход С используется как вспомогательный. Алгоритм калибровки системы состоит из трех этапов:

Этап 1. Калибровка канала напряжения (рис. 1). Ко входу С подключается безреактивный делитель БД. От калибратора Fluke5720A на прецизионный и безреактивный делители параллельно подаётся требуемое

напряжение $U_{эТ}$. С помощью управляющей программы определяется комплексная передаточная характеристика канала А (K_{A0} и ψ_{A0}) и модифицируются коэффициенты амплитуды и фазы напряжения (1), (2).

$$K_A = \frac{K_{A0} \cdot U_{эТ}}{U_A} \quad (1)$$

$$\psi_A = \psi_{A0} + \psi_C - \psi_A \quad (2)$$

Этап 2. Калибровка канала тока (рис. 2). Ко входу С подключается безреактивный шунт БШ. С калибратора Fluke5720A на прецизионный и безреактивный шунт, соединённые последовательно, подаётся требуемый ток $I_{эТ}$. В управляющей программе определяется комплексная передаточная характеристика канала В (K_{B0} и ψ_{B0}) и модифицируются коэффициенты амплитуды и фазы тока (3), (4).

$$K_B = \frac{K_{B0} \cdot I_{эТ}}{I_B} \quad (3)$$

$$\psi_B = \psi_{B0} + \psi_C - \psi_B \quad (4)$$

Этап 3. Калибровка испытываемого прибора (рис. 3). Вход С обнуляется. Напряжение с синтезатора тестовых сигналов параллельно подаётся на ПД и испытываемый прибор. Ток с синтезатора тестовых сигналов последовательно подаётся на ПШ и испытываемый прибор. Частота, пропорциональная измеренной мощности, полученная с испытываемого прибора переводится в измеренную им мощность.

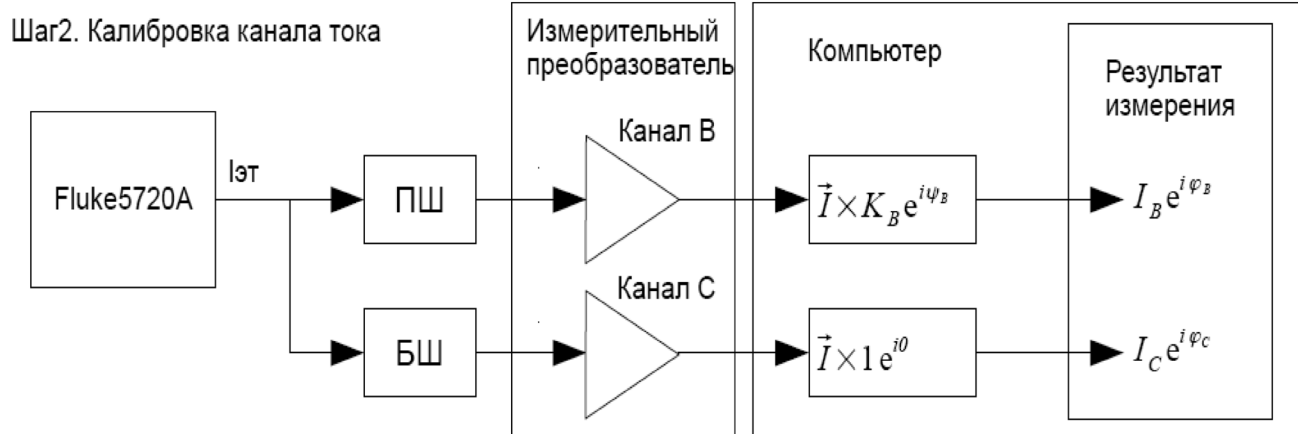


Рис. 2. Калибровка канала тока

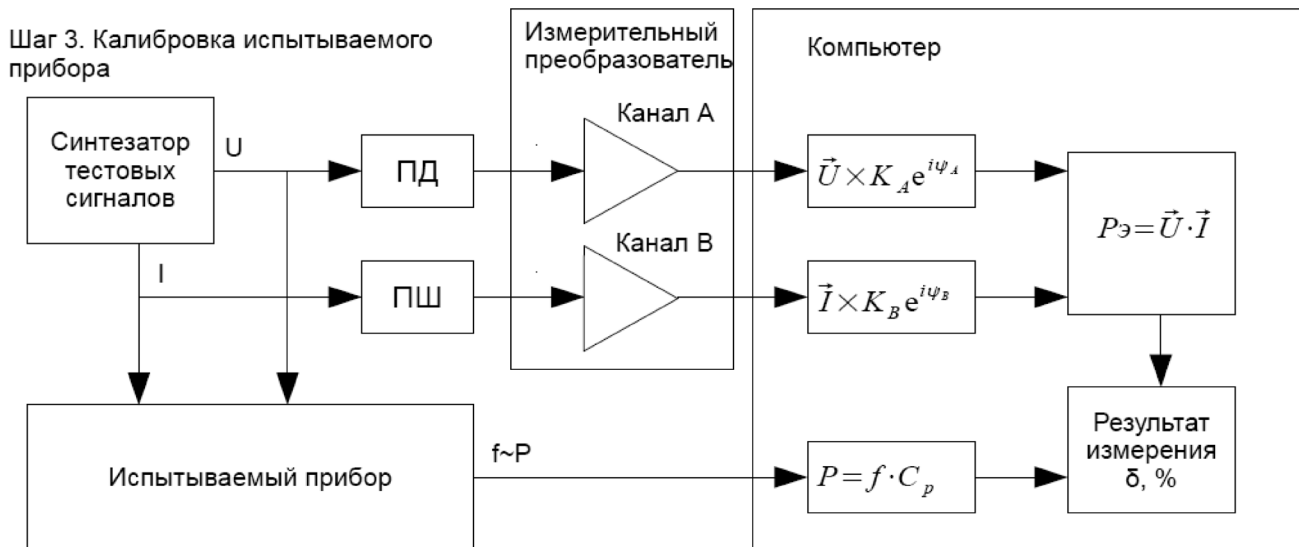


Рис. 3. Калибровка испытываемого прибора

Эталонная мощность вычисляется по формуле (5):

$$P_3 = \vec{U} \cdot \vec{I} = U_A \cdot I_B \cdot \cos(\varphi_B - \varphi_A) \quad (5)$$

и далее вычисляется относительная погрешность испытываемого прибора и неопределённость типа А.

Неопределённости типа В измерения мощности (6):

$$u_{\text{ВотнР}} = \sqrt{u_{\text{СотнU}}^2 + u_{\text{СотнI}}^2 + \text{tg}^2(\varphi_B - \varphi_A) \cdot (u_{\text{СфВ}}^2 + u_{\text{СфА}}^2)} \quad (6)$$

где $u_{\text{СотнU}}$ — стандартная относительная неопределённость калибровки модуля коэффициента передачи канала напряжения;

$u_{\text{СотнI}}$ — стандартная относительная неопределённость калибровки модуля коэффициента передачи канала тока;

$u_{\text{СфА}}$ — стандартная неопределённость калибровки фазы коэффициента передачи канала напряжения;

$u_{\text{СфВ}}$ — стандартная неопределённость калибровки фазы коэффициента передачи канала напряжения.

Расширенная относительная неопределённость калибровки (7):

$$U_{\text{отн}} = 2 \sqrt{u_{\text{АотнР}}^2 + u_{\text{ВотнР}}^2 + u_{\text{СотнF}}^2}, \quad (7)$$

где $u_{\text{СотнF}}$ — стандартная относительная неопределённость измерения частоты.

В качестве примера приведена таблица калибровки двух эталонных счетчиков класса точности 0,02, где указано относительное отклонение результатов измерения мощности δ и расширенная неопределенность $U_{\text{отн}}$.

Таблица 1. Результаты калибровки эталонных счетчиков

Режим		$\delta, \%$			$U_{\text{отн}}, \%$
U, В	I, А	cos(φ)	Счётчик 1	Счётчик 2	
220	1	1	-0,0046	0,0050	0,021
		0,5L	-0,0003	0,0037	0,023
		0,8C	-0,0092	0,0126	0,021
	5	1	-0,0010	0,0079	0,021
		0,5L	0,0092	0,0088	0,023
		0,5C	-0,0066	0,0171	0,023
60	0,05	1	-0,0063	0,0032	0,021

Стоит отметить, что основной вклад в неопределённость калибровки измерителей мощности вносит неопределённость калибровки модуля коэффициента передачи канала тока.

Следствием использования принципа векторных измерений является то, что для получения реактивной мощности необходимо вектор тока умножить на оператор поворота на 90 градусов:

$$\vec{I}_p = \vec{I} \times 1e^{i90} \quad (8)$$

Тогда реактивная мощность определяется как:

$$Q_э = \vec{U} \cdot \vec{I}_p = U_A \cdot I_B \cdot \cos(\varphi_B + 90 - \varphi_A) \quad (9)$$

Выводы

1. Создана установка для калибровки средств измерения мощности на базе векторных измерений, имеющая метрологическую прослеживаемость к эталонам переменного напряжения и силы тока.
2. Неопределённость измерений при калибровке средств измерения мощности оценивается величиной порядка 0,02 %.

Список литературы

- [1] ДСТУ 41116–2002 «Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної потужності і коефіцієнта потужності у діапазоні частот від 40 до 20000 Гц».
- [2] The Wide World of Wide-area Measurement / Phadke AG, RM de Moraes [et al.] // Power and Energy Magazine, IEEE, September-October, 2008. — V. 6, No. 5. — P. 52–65.
- [3] Математичне моделювання каналів вимірювання векторів напруги в системах керування електроенергетичних об'єктів / І. В. Яковлева, канд. техн. наук; Є. М. Танкевич, д-р. техн. наук; Г. М. Варський, канд. техн. наук. / ISSN1997–9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 1. С. 58–61.