



Е.В. Львова, О.М. Балабан, В.В. Листопадова, Н.С. Вагарина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛАХ

(Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.)

В работе [1] дано описание методики анализа измерителей реактивной мощности в промышленных сетях переменного тока, подверженных воздействию несинусоидальных возмущений, когда в сигнале присутствуют гармоники основной частоты. Существующие методы измерения реактивной мощности в этих условиях дают сильно разнящиеся результаты [2] при измерении одной и той же величины мощности, поэтому появилась необходимость в проведении сравнительного анализа данных методов и измерителей мощности, в основе которых лежат эти методы измерения.

Для проведения тестовых испытаний измерителей электроэнергии в однофазной цепи при гармоническом и негармоническом характере сигналов было разработано специальное аппаратное и программное обеспечение для экспериментальной тестовой установки. Упрощённая блок-схема установки показана на рисунке 1. Она собрана на трёхфазном генераторе сигнала заданной мощности 3120АМХ фирмы Pacific Source (США) со следующими характеристиками: 1) максимальная мощность 12 кВА; 2) диапазон частот от 20 Гц до 5 кГц; 3) нестабильность выходного напряжения по сети 0,027 мВ; 4) нестабильность выходного напряжения по нагрузке 0,00135 мВ; 5) суммарный коэффициент гармоник 0,1 %; 6) уровень пульсаций напряжения и шума –70 дБ.

В однофазном режиме генератор имеет два выхода, один из которых используется в качестве генератора напряжения, а другой, синхронизированный с первым, но работающий независимо, является генератором тока, который включается через линейную нагрузку. Эталонным измерителем выбран анализатор мощности Power Analyzer D6000 фирмы LEM Norma, GmbH (Австрия) со следующими метрологическими характеристиками: 1) модульная комплектация системы, 1 - 12 каналов измерения; 2) погрешность 0,05% для измерений тока и напряжения, менее 0,1% для измерения мощности; 3) полоса частот от постоянного тока до 1 МГц; 4) гармонический анализ с помощью дискретного и быстрого преобразований Фурье, встроенная память для хранения результатов и графический дисплей; 5) частота дискретизации 100 кГц;

В качестве тестируемых приборов (ТП) были взяты измеритель мощности электроэнергии ПСЧ-4ТМ.05МД, поставляемый ННПО имени М.В. Фрунзе (г. Н. Новгород), и многофункциональный измеритель мощности РМ9, выпускаемый фирмой Schneider Electric S.p.A. (Италия).

На первом этапе определялось, какой алгоритм учёта реактивной мощности заложен в ТП и эталонный измеритель, потому что они не указаны производителями в технической документации. Для этой цели были сгенерированы сиг-



налы, параметры которых показаны в таблице 1. Эталонный измеритель показал 2343,03 ВАР, прибор ПСЧ-4ТМ.05МД показал сходное значение 2327 ВАР, ТП РМ9 после выдержки в 1 минуту не показал увеличения реактивной энергии.

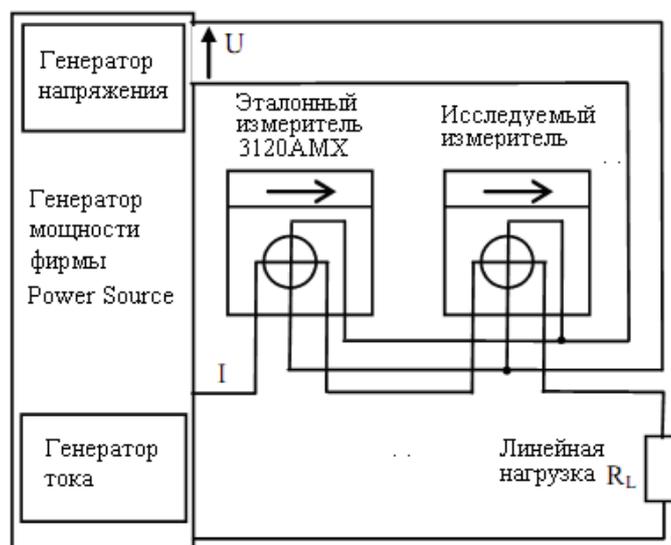


Рисунок 1 – Блок-схема экспериментальной тестовой системы для однофазных измерителей мощности

Таблица 1. Пределы некоторых возможных искажений при измерении активной и реактивной мощностей, задаваемые стандартом EN 50160

Частота сигнала	50 Гц $\pm$ 1 % в течение 95 % времени работы; 50 Гц $\pm$ 4 % – 6 % в течение 100 % времени работы
Действующее значение напряжения	230/400 В $\pm$ 10 % в течение 95 % времени работы
Уровень гармоник	СКГ < 8 % в течение 95 % времени работы

Полученные результаты ясно свидетельствуют о том, что в эталонном измерителе мощности D6000 и в ТП ПСЧ-4ТМ.05МД реализован алгоритм оценки реактивной мощности из работы [3], а в ТП РМ9 – алгоритм из [4], использующий сдвиг по времени. Поэтому измерения реактивной энергии, производимые выбранными ТП несовместимы, и по этой причине дальнейшие исследования в режиме негармонического сигнала были проведены только для измерения активной энергии.

В таблице 2 показаны относительные ошибки результатов тестовых измерений, проведённых в соответствии с планом эксперимента из [1]. Далее был выполнен статистический анализ полученных опытных данных с целью выявления значимых факторов, влияющих на точность измерения. Результаты анализа показаны на рисунках 2-4. По оси ординат отложены средние значения относительных погрешностей.



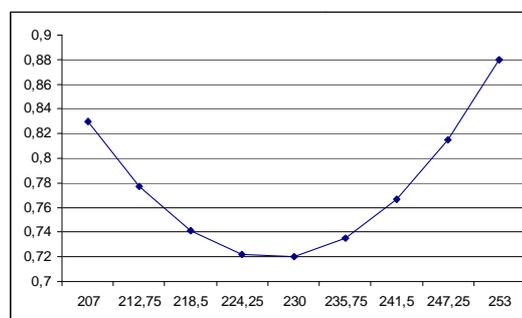
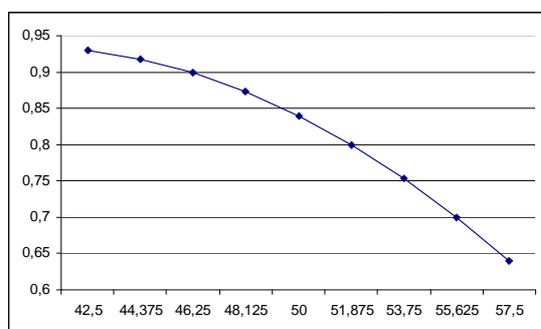
Анализ результатов тестирования показал, что при измерении активной энергии в условиях как гармонического, так и негармонического сигнала (рисунки 2 и 4), изменения основной частоты сигнала и действующего значения (ДЗ) напряжения оказывают незначимые эффекты на точность измерения, а вариации ДЗ тока и изменения сдвига фаз между током и напряжением оказывают более значимые воздействия. При этом точность измерения остаётся приемлемой.

В случае измерения реактивной энергии ситуация более сложная, при этом существуют некоторые комбинации уровней выбранных факторов, совместное влияние которых ведёт к очень большим погрешностям (рисунок 3). Предложенный подход наглядно доказывает возможное возникновение таких ситуаций, но требуются дальнейшие исследования для полного осмысления этого явления.

Установлено, что измерители качества электрической энергии различных производителей дают совершенно отличные друг от друга результаты при учёте возможных гармоник основной частоты, что свидетельствует о необходимости введения единого стандарта на измерение реактивной мощности, который будет основан на каком-то одном вычислительном алгоритме.

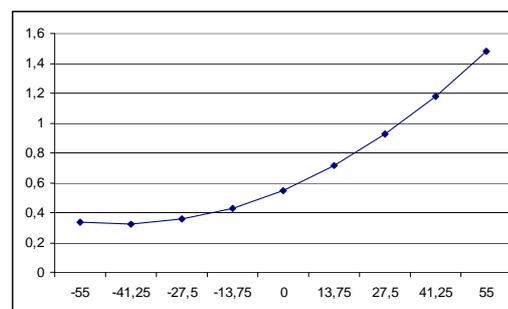
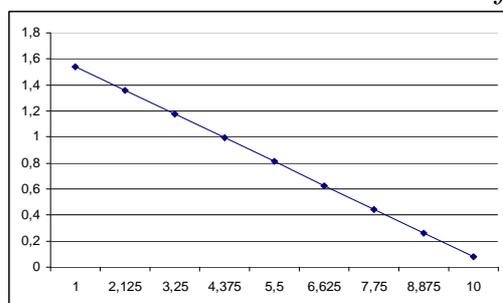
Таблица 2. Относительные погрешности измерений в тестах

Номер теста	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta_{\text{test1}}, \%$	0,5	2,3	-0,2	0,9	0,1	1,6	0,4	0,3	1,2
$\delta_{\text{test2}}, \%$	0,1	2,9	0,0	8,0	-0,3	-30,9	1,1	-0,1	0,1
$\delta_{\text{test3}}, \%$	0,4	0,4	0,7	0,9	0,3	-0,3	-2,5	1,5	-0,3



$f, \text{Гц}$

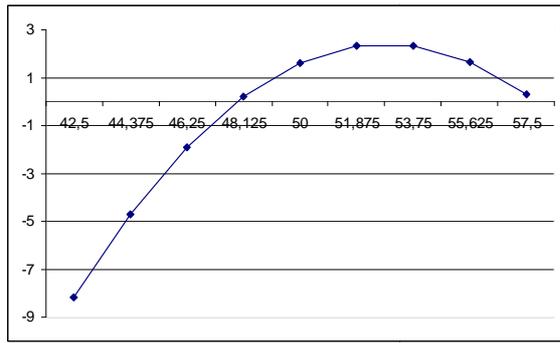
$V_{\text{eff}}, \text{В}$



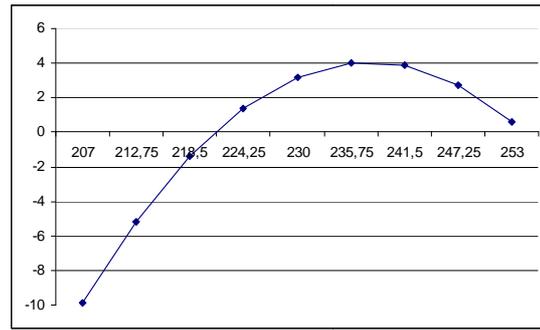
$I_{\text{eff}}, \text{А}$

$\varphi, \text{град}^\circ$

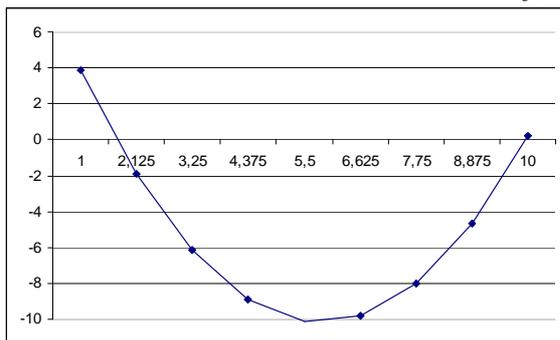
Рисунок 2 – Результаты тестирования измерителя активной энергии, когда параметры гармонического сигнала выбраны из таблицы 1.



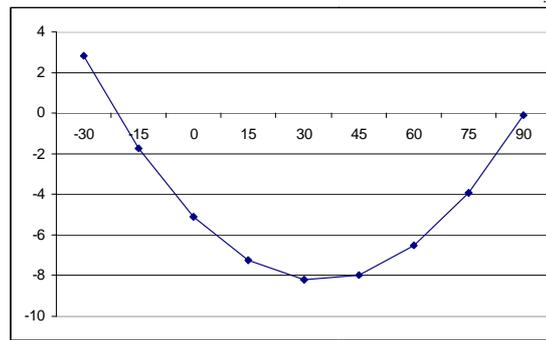
$f$ , Гц



$V_{eff}$ , В

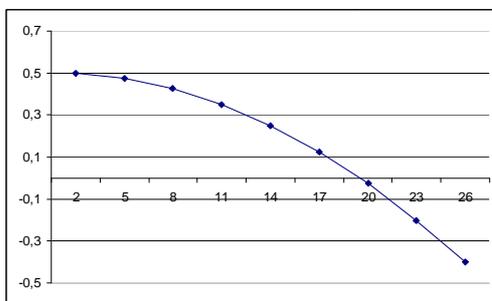


$I_{eff}$ , А

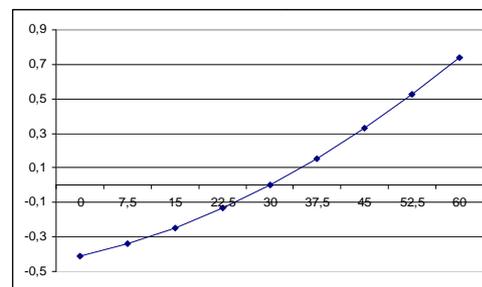


$\phi$ , град<sup>o</sup>

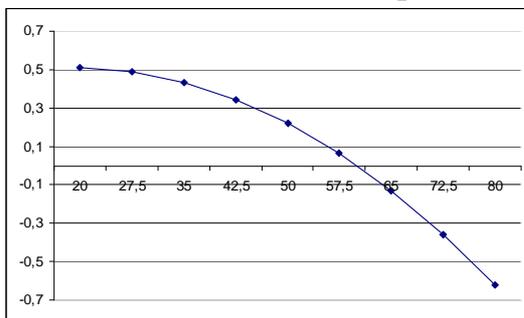
Рисунок 3 – Результаты тестирования измерителя реактивной энергии, когда параметры гармонического сигнала выбраны из таблицы 2.



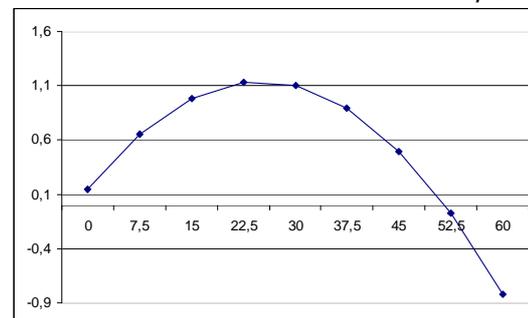
№ гармоники (n)



$\phi_1$ , град



$I_{eff}$ , n-гармоники, %



$\phi_n$ , град<sup>o</sup>

Рисунок 4 – Результаты тестирования измерителя активной энергии, когда параметры негармонического сигнала выбраны из таблицы 2.



В работе представлена экспериментальная установка для проверки качества измерителей электроэнергии при использовании гармонических и негармонических сигналов. Предлагаемая система тестирования измерителей, позволяет анализировать их погрешности измерения при воздействии различных влияющих факторов. Описано применение данной системы при исследовании бытовых измерителей электроэнергии ПСЧ-4ТМ.05МД и РМ9.

### Литература

1. Соломин, М.А. Методика планирования эксперимента для анализа измерителей реактивной мощности // Львова Е.В., Соломин М.А. // В этом же сборнике.
2. Львов, А.А. Неоднозначность методов измерения реактивной мощности в промышленных сетях переменного тока / А.А. Львов, И.И. Артюхов, М.А. Соломин // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 164-172.
3. S. Fryze, S. Active, Reactive and Apparent Power in Circuits with Non-sinusoidal Voltages and Currents,” (in German) / S. Fryze // Elektrotechnische Z., Vol. 53, 1932, P. 596-99, 625-27, 700-02.
4. Cataliotti, A. A time domain approach for IEEE Std 1459-2000 powers measurement in distorted and unbalanced power systems / A.Cataliotti, V.Cosentino, S. Nuccio // Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Sorrento, April 2006, P. 1357-1361.

О.К. Либерзон, С.Г. Пархоменко

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УЧЁТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДЫ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

(Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева)

Обеспечение надежности, долговечности, устойчивости любого объекта строительства невозможно без проведения инженерно-геологических изысканий для строительства по действующим строительным нормам и правилам (СНиП).

Инженерно-геологические изыскания могут выполняться для различных целей, начиная от строительства небольшого загородного дома, и заканчивая проектированием особо опасных и технически сложных объектов, которые включены в специальный перечень объектов, утвержденный на законодательном уровне. Эти объекты могут иметь разное целевое предназначение – гражданское или промышленное, и включать в себя как многофункциональные комплексы, так и гидротехнические сооружения, аэропорты, объекты атомной