



$$w_i(t + 1) = w_i(t) + \eta_i(t)(x - w_i(t)) \quad (4)$$

где  $\eta_i(t)$  – коэффициент обучения  $i$ -го нейрона на окрестности  $S_w(t)$  в  $t$ -й момент времени

Значение  $\eta_i(t)$  уменьшается с увеличением расстояния между  $i$ -м нейроном и победителем. Веса нейронов, находящихся вне окрестности  $S_w(t)$  не изменяются.

После предъявления двух различных векторов  $x_1$  и  $x_2$  активизируются два нейрона сети, веса которых наиболее близки к координатам соответствующих векторов. Сближение векторов  $x_1$  и  $x_2$  вызывает соответствующее изменение в расположении векторов  $w_1$  и  $w_2$ . Равенство  $w_1 = w_2$  выполняется тогда и только тогда, когда  $x_1$  и  $x_2$  совпадают или практически неотличимы друг от друга.

Разработанная автоматизированная система решает задачу распознавания печатных цифр от 0 до 9 сетью Кохонена. Результаты работы нейронной сети Кохонена сходны с результатами работы нейронной сети Хемминга[3] и нейронной сети Хопфилда[4].

#### Литература

1. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст]/ Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344с.: ил.
2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание [Текст]/ Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.: ил.
3. Перспективные информационные технологии (ПИТ 2014): труды международной научно-технической конференции. Лезина И.В., Мазаев А.В. Автоматизированная система распознавания печатных символов нейронной сетью Хопфилда [Текст] /Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2014 – 534 с.
4. Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015): труды международной научно-технической конференции. Том 1. Лезина И.В., Мазаев А.В. Распознавания печатных символов нейронной сетью Хемминга [Текст] /Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2015 – 530 с.

Е.В. Львова, В.В. Листопадова, О.М. Балабан, Е.Г. Умнова

#### МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

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

Хорошо известно, что в последние годы большая часть электрических нагрузок в обычных силовых сетях стали нелинейными или нестационарными. Это происходит благодаря быстрому распространению среди промышленных, коммерческих и бытовых потребителей электроэнергии оборудования силовой



электроники, например, приводов с регулируемой скоростью вращения, управляемых выпрямителей, понижающих преобразователей частоты. Подобные нагрузки могут создавать массу помех, как для своего предприятия, так и для оборудования других потребителей.

Большинство проблем возникают из того, что имеет место утеkanie реактивной энергии, порождаемой несинусоидальными токами и напряжениями. Поэтому коммунальные предприятия жизненно заинтересованы в минимизации таких энергетических потерь в силовых сетях, так как генераторы возмещают совершаемые потери, а распределяющие компании должны платить за это в соответствии с показаниями счётчиков энергии в точках измерения. Желательно, чтобы распределительные компании принуждали потребителей, являющихся источником подобных помех, платить соответствующие штрафы, в противном случае эти траты лягут на всех участников энергетического рынка.

Научное сообщество обсуждает проблему определения мощности в условиях несинусоидальных сигналов и/или несбалансированных условий в течение последних 35-40 лет, и в инженерной литературе можно найти различные предложения по этому вопросу [1,2].

При поверке измерителя необходимо учесть все наиболее важные явления, влияющие на качество электроэнергии, передаваемой на низких частотах [1,3], а именно: 1) колебания основной частоты; 2) временные понижения напряжения питания, то есть снижения амплитуды напряжения в до значений порядка от 90 % до 1 % от номинального; 3) разбаланс напряжений, когда в многофазной силовой сети возникают ситуации, при которых действующие значения (ДЗ) линейных напряжений (на основной частоте) или разности фаз между последовательными линейными напряжениями не равны между собой; 4) суммарный коэффициент гармоник (СКГ), то есть отношение суммы ДЗ напряжений на всех гармониках вплоть до 40 к ДЗ напряжения на основной частоте.

Физическая сущность всех этих искажений, которые могут возникнуть в реальных силовых сетях, была рассмотрена в различных публикациях. Например, европейский стандарт EN 50160:2010 [4] определяет основные характеристики на входе сети электропитания потребителей в системе коммунального распределения электроэнергии низкого и среднего уровней напряжения в нормальных условиях. Этот стандарт задаёт пределы или величины напряжений, внутри которых любой потребитель может надеяться, что характеристики напряжения останутся неизменными. Некоторые числовые данные приведены в таблице 1. Как можно заметить, некоторые пределы в данной таблице оценены с помощью вероятностной модели, когда реальный верхний предел измеряемых величин не задан, но заданы наибольшие значения этих величин, ниже которых они должны находиться в течение 95 % времени наблюдения. В любом случае данный стандарт не применим в условиях измерения мультисигнального сигнала (в присутствии гармоник основной частоты). Другим важным документом, формулирующим требования к качеству измерения активной и реактивной мощностей, является стандарт Международной электрической комиссии (МЭК) [5], который определяет технические условия для аппаратуры, используемой



при измерениях качества электроэнергии. Диапазоны изменения входных сигналов из-за действия влияющих величин, которые допустимы для измерительных приборов класса А без потери в точности измерения, приведены в таблице 2.

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
ДЗ напряжения	230/400 В $\pm$ 10 % в течение 95 % времени работы
Уровень гармоник	СКГ < 8 % в течение 95 % времени работы

Таблица 2. Пределы допустимых изменений входных сигналов у измерительных приборов качества энергии класса А, задаваемые стандартом МЭК 61000-4-30.

Частота сигнала	50 Гц $\pm$ 15 %
ДЗ напряжения	0 % – 200 % от номинального напряжения
Уровень гармоник	СКГ < 20 %

Директива Европарламента 2004/22/ЕС [6], посвящённая измерительной технике и более подробно освещающая измерители электроэнергии и мощности, устанавливает следующие условия измерения, показанные в таблице 3.

Стандарт МЭК [7] для измерителей активной энергии в статических условиях рассматривает некоторые явления, которые могут повлиять на качество измерения активной и реактивной мощностей, что приводит к появлению дополнительных погрешностей. Допустимые значения данных погрешностей приведены в таблице 4. Это единственный документ, который учитывает возмущения, вызванные влиянием гармоник друг на друга.

Таблица 3. Пределы допустимых изменений входных сигналов у измерительных приборов качества энергии класса А, задаваемые стандартом 2004/22/ЕС.

Частота сигнала	50 Гц $\pm$ 2 %
ДЗ напряжения	10 % от номинального напряжения
Уровень гармоник	СКГ < 6 %
Коэффициент мощности	$-0,8 < \cos \varphi < 0,5$

В соответствии с [7] тесты по измерению изменения, вызванного влияющими величинами, должны проводиться независимо для каждой влияющей величины, когда все остальные величины находятся в нормальных условиях. Это сделано для того, чтобы избежать проведения огромного числа экспериментов, в которых будут учтены все смешанные эффекты влияющих величин, но такой подход не позволяет оценить возможное резкое увеличение погрешности измерений при какой-либо возможной комбинации влияющих величин.



Таблица 4. Пределы допустимых изменений погрешностей приборов класса А, задаваемые стандартом МЭК 62053-21.

Частота сигнала ( $\pm 2\%$ )	1 %
ДЗ напряжения(10 %)	0,7 %
Уровень гармоник тока и напряжения	0,8 %
Постоянный ток и чётные гармоники тока	3 %
Нечётные гармоники тока	3 %
Субгармоники тока	3 %

Поэтому должны быть получены два значимых результата. С одной стороны, очень важно оценить, при каких различных конфигурациях влияющих факторов возникает наибольшая погрешность измерения. С другой стороны, первостепенное значение имеет задача определения количественного влияния на погрешность измерения энергии или мощности каждого фактора в отдельности. В обоих случаях требуется разработать надлежащий план проведения экспериментальных исследований, который позволит существенно сэкономить число опытов при исследовании качественного (при оценке, является ли конкретная влияющая величина значимой или нет) и количественного (при оценке, как сильно влияет конкретная влияющая величина на общую погрешность измерения) влияния различных факторов на точность измерения качества электроэнергии.

В работе [8] дан обзор методов измерения активной и реактивной мощности, применяемых в настоящее время, и показано, что они дают существенно разные результаты при измерении напряжения питания несинусоидальной формы (в присутствии сигналов гармоник).

Для того чтобы провести полную проверку измерителя электроэнергии, необходимо в соответствии с [1,8] выбрать влияющие факторы, которые оказывают значимое действие и должны быть учтены, а так же возможный интервал варьирования каждого выбранного фактора. Этот интервал должен быть шире, чем диапазон изменения, рекомендуемый стандартом, для исследования всех возможных ситуаций. После этого строится план эксперимента, в котором выбранные факторы находятся поочередно на верхнем и нижнем уровнях. Если не использовать оптимального планирования экспериментов, то общее число опытов, в которых будут задействованы все возможные сочетания комбинаций факторов, будет экспоненциально возрастать.

Теория планирования экспериментов ставит своей целью выдать рекомендации исследователю, как ему организовать эксперимент, чтобы за минимальное число проведённых опытов определить функциональную связь между выходной переменной и входными влияющими факторами исследуемого процесса. Сами эксперименты проводятся в соответствии со специально сконструированными матрицами планирования, когда значения факторов в отдельных опытах специальным образом выбираются на верхнем или нижнем уровнях.

На первом этапе ставится задача определить, какие факторы оказывают существенное влияние на выходную переменную, характеризующую исследуемый процесс. На втором этапе оценивается влияние на функцию качества каждого фактора в отдельности с количественной точки зрения, [9].



В результате анализа качества измерения электроэнергии в случае действия гармонического и негармонического сигналов были выбраны и признаны значимыми четыре основных исследуемых фактора, которые показаны в таблицах 5–7. Поскольку требуется исследование почти стационарной области изменения данных факторов, где в качестве функции отклика выбрана средняя относительная погрешность измерения мощности, то выбранные факторы задаются на трёх уровнях. В таблице 5 показаны выбранные факторы и их уровни для тестирования измерителя активной энергии в условиях гармонического сигнала. Таблицы 6 и 7 показывают те же параметры и их уровни для тестирования измерителя реактивной энергии в условиях гармонического и негармонического сигнала соответственно.

Таблица 5. Факторы и их уровни в тестах по измерению активной энергии в условиях гармонического сигнала

Параметр	0	-1	+1
Частота $\omega/2\pi$ , Гц	50	42,5	57,5
ДЗ напряжения, В	230	207	253
ДЗ тока, А	3	1	5
Сдвиг фаз, $\varphi$ , град	0	-55	55

Во всех таблицах символ «-1» означает, что параметр выбирается на нижнем уровне, «0» – на среднем (нулевом), «+1» – на верхнем.

Для проведения эксперимента был разработан его план, показанный в таблице 8. План обладает всеми свойствами центрального композиционного планирования: сумма элементов в каждом столбце равна 0, столбцы матрицы плана являются ортогональными.

Таблица 6. Факторы и их уровни в тестах по измерению реактивной энергии в условиях гармонического сигнала

Параметр	0	-1	+1
Частота $\omega/2\pi$ , Гц	50	42,5	57,5
ДЗ напряжения, В	230	207	253
ДЗ тока, А	5,5	1	10
Сдвиг фаз, $\varphi$ , град	30	-30	90

Таблица 7. Факторы и их уровни в тестах по измерению активной энергии в условиях негармонического сигнала

Параметр	0	-1	+1
Порядок гармоники, n	14	2	26
Сдвиг фаз на основной частоте $\varphi_1$ , град	0	30	60
ДЗ тока гармоники, $I_n$ , %	50	20	80
Сдвиг фаз на частоте гармоники, $\varphi_n$ , град	30	0	60

Модель, описывающая зависимость погрешности измерения от выбранных факторов во всех экспериментах задавалась в виде квадратичного полинома, где большая часть парных взаимодействий и квадратов эффектов факторов была отсеяна при проведении предварительных исследований [1, 8].



Таблица 8. Предлагаемый план эксперимента

Номер опыта	Параметр 1	Параметр 2	Параметр 3	Параметр 4
1	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1
3	0	+1	+1	+1
4	-1	0	-1	+1
5	-1	-1	+1	0
6	-1	+1	0	-1
7	+1	0	+1	-1
8	+1	-1	0	+1
9	+1	+1	-1	0

В работе представлен новый подход к проверке качества измерителей электроэнергии при использовании гармонических и негармонических сигналов, основанный на теории оптимального планирования экспериментов. Сначала проведён краткий обзор методик измерения активной и реактивной энергии, используемых при коммерческом учёте электроэнергии. На его основе разработана методика тестирования измерителей, позволяющая анализировать их погрешности измерения при воздействии различных влияющих факторов.

### Литература

1. Gallo D. A New Methodological Approach to Quality Assurance of Energy Meters Under Non-Sinusoidal Conditions / D.Gallo, C.Landi, N.Pasquino, N.Polese // Proceedings of IMTC 2006 – Instrum. and Measur. Technol. Conf. Sorrento, Italy 24-27 April 2006, P. 1626-1631.
2. Emanuel, A.E. Powers in non-sinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning / A.E. Emanuel // IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 26, No 5, November, 2009. – P.1237-1244.
3. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE 1459, 2000.
4. EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC, 1999.
5. IEC EN 61000-4-30, 2003, Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
6. Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 on Measuring Instruments.
7. IEC EN 62053-21 - Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2), 2003-11
8. 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.



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-