

## Энергетика. Автоматика

УДК 621.31

Н.В. Савина, Б.В. Кобцев

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ РЫНКА

*Проведена систематизация источников искажения качества электроэнергии, позволяющая определять наиболее целесообразные пункты контроля качества электроэнергии и контролируемые параметры. Разработаны рекомендации по осуществлению контроля качества электроэнергии в условиях функционирования рынков энергии и мощности.*

*Ключевые слова: качество электроэнергии, показатели качества электроэнергии, контроль, приборы, источник искажения, пункт контроля качества электроэнергии.*

### CONTROL OF ELECTRICITY QUALITY IN THE MARKET CONDITIONS

*Systematization of sources of power quality distortion was carried out which allows to determine the most appropriate points of power quality control and controlled parameters. Recommendations on the implementation of quality control of electricity in the conditions of the functioning of energy and power markets have been developed.*

*Key words: power quality, power quality indicators, control, devices, source of distortion, power quality control point.*

В условиях рынка основным свойством товара, определяющим его конкурентоспособность, является качество. Если рассматривать электроэнергию как товар, то ее качество является главным фактором эффективности процессов производства, передачи, распределения и потребления. Ухудшение качества электроэнергии (КЭ) приводит к нарушению условий нормального функционирования электроприемников, увеличению эксплуатационных издержек и себестоимости продукции [4]. Отсюда следует, что рыночные отношения ставят задачи управления КЭ, которые находятся в центре постоянного внимания как субъектов электроэнергетики, так и потребителей электроэнергии. Это обусловлено большим экономическим ущербом из-за низкого КЭ (порядка 25 млрд. долларов в год [5]). Решение проблемы качества электроэнергии немыслимо без его контроля. Особенностью функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) в рыночных условиях является неопределенность, которая проявляется как их фундаментальное свойство. Это приводит к необходимости новых подходов к организации контроля КЭ, разработки измерительных приборов и комплексов для контроля КЭ, адаптированных под современные условия функционирования ЭЭС.

Основным документом, который отвечает рыночным требованиям в электроэнергетике в отношении качества электроэнергии (КЭ), является ГОСТ 32144-2013 [1]. Указанный стандарт, а также функционирование рынков энергии и мощности принципиально изменили подходы к организации контроля КЭ.

В первую очередь это касается выбора пунктов контроля и построения системы контроля как базы для создания системы управления КЭ. Учитывая все сказанное, следует считать проблему контроля КЭ в рыночных условиях актуальной и требующей особого внимания.

Целью статьи является разработка рекомендаций по организации контроля КЭ в условиях функционирования оптового и розничных рынков энергии и мощности. Для реализации данной цели необходимо раскрыть следующие задачи:

- 1) систематизация информации по источникам искажения КЭ в современных условиях;
- 2) разработка рекомендаций по выбору пунктов и видов контроля КЭ;
- 3) разработка рекомендаций по выбору средств измерения ПКЭ.

Для решения первой задачи следует на основе системного подхода выявить и проанализировать возможные источники искажения КЭ, присущие современной электроэнергетической системе. Такая систематизация источников искажения позволит в условиях эксплуатации правильно определять пункты для организации контроля КЭ. Опираясь на [8-10], были систематизированы источники искажения КЭ и дана их характеристика (табл. 1).

Таблица 1

## Источники искажения КЭ

Источник искажения	Характеристика искажения	ПКЭ, определяющие вид искажения КЭ
1	2	3
Металлургические заводы	Происходит увеличение отклонения напряжения и увеличивается доза фликера, наблюдается несинусоидальность напряжений и токов, нарушается симметрия трехфазной системы напряжения	$\delta U, P_{ST}, P_{LT}, K_U, K_{U(n)}, K_{2U}, K_{0U}$
Тяга переменного тока	Нарушаются симметрия трехфазной системы напряжения, синусоидальность напряжения, увеличивается отклонение напряжения при прохождении поездов мимо тяговых ПС	$K_U, K_{U(n)}, K_{2U}, K_{0U}, \delta U$
Электростанции	Увеличиваются отклонения напряжения, нарушается синусоидальность кривой напряжения	$\delta U, K_U, K_{U(n)}$
Системы освещения:	При работе лампы создают небольшой уровень искажений, но когда таких электроприемников много, их влияние велико	
газоразрядные лампы	Нарушается синусоидальность кривой напряжения и симметрия трехфазной системы напряжения	$K_U, K_{U(n)}, K_{2U}, K_{0U}$
лампы накаливания	На ПКЭ искажающего эффекта не оказывают, но чувствительны к ухудшению КЭ	
светодиодные лампы	Нарушается синусоидальность напряжения	$K_U, K_{U(n)}$
Производства: химической промышленности	Увеличивается отклонение напряжения, искажается синусоидальность кривой напряжения	$\delta U, K_U, K_{U(n)}$
горнодобывающей промышленности	Увеличивается отклонение напряжения, искажается синусоидальность кривой напряжения, увеличивается доза фликера	$\delta U, P_{ST}, P_{LT}, K_U, K_{U(n)}$
целлюлозно-бумажной промышленности	Увеличивается отклонение напряжения, искажается синусоидальность кривой напряжения	$\delta U, K_U, K_{U(n)}$
текстильной промышленности	Увеличивается отклонение напряжения, нарушается синусоидальность кривой напряжения	$\delta U, K_U, K_{U(n)}$

Продолжение табл. 1

1	2	3
Потребители с частотно-регулируемым приводом	Нарушается синусоидальность кривой напряжения	$K_U, K_{U(n)}$
Бытовой потребитель	Увеличивается отклонение напряжения, нарушается синусоидальность кривой напряжения, нарушается симметрия трехфазной системы напряжения, возрастает уровень электромагнитных помех	$\delta U, K_U, K_{U(n)}, K_{2U}, K_{0U}$
Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии (ВИЭ):	При работе одной установки создается небольшой уровень искажений, но когда таких источников много, их негативное влияние на ЭЭС велико	
ветроэнергетическая установка	Увеличивается отклонение напряжения и увеличивается доза фликера, присутствует несинусоидальность напряжения, увеличивается отклонение напряжения	$\delta U, K_U, K_{U(n)}, P_{ST}, P_{LT}$
солнечная батарея	Наблюдается несинусоидальность напряжения	$K_U, K_{U(n)}$

Примечание:  $\delta U$  – отклонение напряжения электропитания, %;  $P_{ST}$  – кратковременная доза фликера, относит. ед.;  $P_{LT}$  – длительная доза фликера, относит. ед.;  $K_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %;  $K_{U(n)}$  – коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения, %;  $K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %;  $K_{0U}$  – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, %.

В условиях эксплуатации необходимо правильно выбирать пункты контроля КЭ, в противном случае возможны финансовые убытки либо из-за отсутствия контроля в месте сосредоточения источника(ов) искажения КЭ, либо организация контроля КЭ в тех узлах сети, где оно не наблюдается. Исходя из требований [1], необходимо рассмотреть особенности функционирования современных оптового и розничного рынков энергии и мощности.

Оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) предназначен для оптовых продаж и закупок, а потому работать на нем получают право только крупные производители и потребители. Для выхода на оптовый рынок электроэнергии им нужно выполнить ряд требований (установить систему учета, согласовать документы на точки перехода энергии, зарегистрировать точки поставки и др.) [11].

Розничный рынок электроэнергии более обширен, чем оптовый, так как на нем работают все остальные покупатели и продавцы, вне зависимости от количества производимой или приобретаемой электрической энергии. Причем те, кто на оптовом рынке выступал в качестве покупателя, здесь уже часто является поставщиком [7].

Из [11], регулирующего оптовый рынок, видно, что обязательным пунктом контроля КЭ является точка передачи электроэнергии от генерирующих компаний энергосбытовым. Такой точкой, например, могут быть, например, шины электростанции, с которых отпускается электроэнергия.

Из [7], регулирующего порядок работы на розничном рынке, следует, что наиболее удобным пунктом контроля КЭ является ближайшая к источнику искажения точка присоединения к электрической сети, которая часто совпадает с точкой передачи электроэнергии (ТПЭ). ТПЭ – точка электрической сети, находящаяся на линии раздела объектов электроэнергетики между владельцами по признаку собственности или владения на ином, предусмотренном законами основании, определенная в процессе технологического присоединения [1].

Кроме того, для выбора пунктов контроля КЭ необходимо определять структуру генерации и потребления электроэнергии в рассматриваемой системе, так как больший эффект от управления КЭ

можно получить в тех узлах сети, в которых потребители, искажающие КЭ, составляют наибольшую долю потребления, а также в узлах присоединения к сети объектов малой генерации. Анализ структуры электропотребления в узле сети позволяет выявить источник искажения КЭ и определить его долю. Контроль КЭ целесообразно осуществлять в тех точках сети, где выполняется следующее соотношение:

для сетей напряжением выше 1 кВ

$$\frac{S_{уст\ спец}}{S_{кз\ min}^{ТОП}} \cdot 100 \geq 0,3\%,$$

для сетей напряжением ниже 1 кВ

$$\frac{S_{уст\ спец}}{S_{кз\ min}^{ТОП}} \cdot 100 \geq 0,2\%,$$

где  $S_{уст\ спец}$  – суммарная установленная мощность специфичной нагрузки;  $S_{кз\ min}^{ТОП}$  – мощность короткого замыкания (КЗ) в минимальном режиме в точке присоединения специфичной нагрузки к сети либо в ТПЭ.

Для промышленных предприятий целесообразно установить пункты контроля КЭ на выводах электроприемников (ЭП), характер нагрузки которых резко отличается от графика нагрузки центра питания (ЦП), также пунктом контроля могут быть шины высшего и низшего напряжения ГПП [2]. Дополнительно для потребителей, искажающих синусоидальность кривых напряжений и токов, рассматривают возможность контроля КЭ в ближайших точках присоединения, к которым присоединены восприимчивые к помехам энергопринимающие устройства потребителей. Пункты контроля КЭ на высоковольтных подстанциях, подключенных к энергосистеме, лучше располагать на входных и выходных фидерах [3].

При рассмотрении нетрадиционных источников энергии нецелесообразно размещать пункт контроля на выводах ЭП (солнечной батареи, ветроэнергетической электроустановке), так как искажение одного ЭП очень мало. Практичнее считать пунктом контроля узлы сети, к которым подключены объекты малой генерации, выполненные на их основе.

Исходя из сказанного, предложены целесообразные пункты контроля КЭ для различных источников искажения КЭ.

Таблица 2

### Пункты контроля КЭ

Источник искажения 1	Пункты контроля 2
Металлургические заводы	ТПЭ, выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличается от графика нагрузки центра питания, шины высшего и низшего напряжения пункта приема (ПП) электроэнергетики, ближайшие точки присоединения с восприимчивыми потребителями
Тяговые подстанции	ТПЭ, входные и выходные фидеры, шины 220/110 кВ
Электростанции	Шины, с которых отпускается электроэнергия, ТПЭ
Системы освещения	ТПЭ, шины трехфазного ВРУ здания, сооружения
Производства: химической промышленности	ТПЭ, выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличается от графика нагрузки центра питания, ближайшие точки присоединения с восприимчивыми потребителями
горнодобывающей промышленности	ТПЭ, выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличается от графика нагрузки центра питания, шины высшего и низшего напряжения ПП, ближайшие точки присоединения с восприимчивыми потребителями
целлюлозно-бумажной промышленности	ТПЭ, выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличается от графика нагрузки центра питания, шины высшего и низшего напряжения ПП, ближайшие точки присоединения с восприимчивыми потребителями

Продолжение табл. 2

1	2
текстильной промышленности	ТПЭ, выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличен от графика нагрузки центра питания, шины высшего и низшего напряжения ПП, ближайшие точки присоединения с восприимчивыми потребителями
Потребители с частотно-регулируемым приводом	Шины трехфазного ВРУ здания или шины 0,4 кВ подстанции 6 - 35/0,4 кВ
Бытовой потребитель	ТПЭ, шины трехфазного ВРУ здания
Малая генерация	Узлы сети, к которым подключены установки

Таким образом, предложенный подход позволит организовать контроль КЭ, обеспечивающий получение достоверной информации по КЭ с минимальными затратами.

Следующий этап заключается в выборе типа контроля КЭ. Различают коммерческий, диагностический и технологический контроль КЭ. В соответствии с [6] рекомендуется использовать периодический коммерческий контроль КЭ в следующих пунктах: ТПЭ, шины трехфазного ВРУ здания у бытового потребителя. Диагностический контроль необходим для анализа причин ухудшения КЭ, определения виновника понижения КЭ. Производиться такой контроль должен эпизодически. Его рекомендуется применять в следующих пунктах: выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличен от графика нагрузки ЦП; шины высшего и низшего напряжения ПП; шины электростанций, ВИЭ, объектов малой генерации, с которых отпускается электроэнергия. Такой контроль необходим для технологического присоединения потребителей или объектов генерации, а также при изменении архитектуры сети или технологического процесса на производстве. В пунктах контроля, с источниками искажения КЭ, имеющими нециклические или нерегулярные графики нагрузок, с восприимчивыми электроприемниками, которые являются ближайшими точками присоединения к искажающим потребителям, лучше проводить непрерывный технологический контроль. Характеристика типов контроля КЭ приведена в табл. 3.

Таблица 3

### Типы контроля КЭ

Тип контроля	Пункты контроля	Периодичность контроля
Коммерческий	ТПЭ, шины трехфазного ВРУ здания или шины 0,4 кВ ТП 6 - 35/0,4 кВ	Раз в месяц
Диагностический контроль	Выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличен от графика нагрузки центра питания, шины высшего и низшего напряжения ПП, входные и выходные фидера, шины 220/110 кВ тяговых подстанций, шины генерации, с которых отпускается электроэнергия в сеть	При непрерывном технологическом процессе – раз в месяц. При другом технологическом процессе (непостоянный) – непрерывный контроль
Технологический	Ближайшие точки присоединения с восприимчивыми потребителями, точки присоединения со специфичными потребителями, имеющими нециклический или нерегулярный график нагрузки	Непрерывный контроль

Типы контроля позволят подобрать технические средства для измерения и анализа ПКЭ, обеспечивающие получение достоверной информации о КЭ в требуемом объеме. Вначале необходимо определиться с условиями выбора технических средств измерения ПКЭ. Главным условием выбора измерительного устройства является его соответствие по измеряемым ПКЭ ГОСТу 32144-2013. Следующее условие – функциональность. Это обусловлено тем, что набор измеряемых ПКЭ зависит от источников искажения, структура которых не одинакова в пунктах контроля. И, наконец, стоимость устройства.

В настоящее время на рынке представлено большое количество измерительных приборов и комплексов для контроля КЭ. Среди них есть как разработанные в России, так и зарубежные измерители и анализаторы ПКЭ. В нашей статье рассматриваются приборы российского производства.

Одним из наиболее эффективных устройств является прибор Ресурс-UF2М. Эффективность его заключается в возможности измерять все ПКЭ с высокой точностью. Данный прибор лучше всего подходит для измерения ПКЭ на промышленных предприятиях и в энергосистемах. Среди приборов с таким же широким функционалом, как у Ресурс-UF2М, он является одним из самых недорогих на российском рынке [15]. В ТПЭ, где нет необходимости контролировать все ПКЭ, указанные в [1], лучше использовать приборы Прорыв-КЭ-А. Эти приборы одни из самых дешевых на рынке [12].

Для контроля КЭ в сетях бытового потребителя можно применять приборы серии ЩКМ. Они недорогие и отлично выполняют свои функции на стороне потребителя, подходят как для коммерческого, так и для диагностического контроля [14].

Все перечисленные приборы имеют широкий диапазон каналов передачи данных во внешние системы телеизмерений, контроля и мониторинга качества электроэнергии, а наличие Web-интерфейса позволяет удаленно снимать показания прибора по IP адресу прибора. Они могут использоваться как при коммерческом, так и диагностическом контроле. Соответствие приборов виду и пунктам контроля КЭ приведено в табл. 4.

Таблица 4

Выбор приборов для организации контроля КЭ

Марка прибора	Вид контроля	Пункты контроля
Ресурс-UF2М-3П46-50-500	Периодический	ТПЭ металлургическим заводам, предприятиям целлюлозно-бумажной, химической, горнодобывающей и текстильной промышленности; шины высшего и низшего напряжения ПП
Прорыв-КЭ-А	Периодический	ТПЭ, к которым подключены тяговые подстанции, системы освещения, потребители с частотно-регулируемым приводом; шины трехфазного ВРУ здания, шины 0,4 кВ ТП 6-35/0,4 кВ
Ресурс-UF2М	Непрерывный	Точки с восприимчивыми электроприемниками, которые являются ближайшими точками присоединения к искажающим потребителям, выводы ЭП, характер нагрузки которых резко отличен от графика нагрузки ЦП, входные и выходные фидеры, шины 220/110 кВ тяговых подстанций
Энерготестер ПКЭ-А-С	Эпизодический	Шины генерации, с которых отпускается электроэнергия
ЩМК 96	Непрерывный	Шины трехфазного ВРУ здания бытового потребителя

### Заключение

Предложен подход к организации и проведению контроля КЭ в рыночных условиях, обеспечивающий требуемую полноту и достоверность информации по КЭ с минимальными затратами.

1. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000.

3. Жежеленко, И.В., Короткевич, М.А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях. – М.: Высшая школа, 2012.

4. Карташев, И.И., Тульский, Р.Г. Управление качеством электроэнергии. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 11 с.

5. Лебедев, Г.М., Воронин, В.А. Об экономическом ущербе от снижения качества электроэнергии и источниках его возникновения. – М.: Вестник КГТУ, 2016. – 79-84 с.

6. Осика, Л.К. Коммерческий и технический учет электрической энергии на оптовом и розничном рынках. – М.: Политехника, 2015.
7. Постановление Правительства РФ №442 от 04.05.2012.
8. Тигунцев, С.Г. О вкладе потребителя в качество электрической энергии. – М.: Вестник СФУ, 2013. – С. 106-120.
9. Темербаев, С.А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях. – М.: Энергетика и промышленность России, 2007.
10. Федосов, Д.С. Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014.
11. ФЗ №35. Об электроэнергетике.
12. <https://proryvnpp.ru/pribor-pke/>
13. <http://printsip.ru/analizatory-kachestva-elektroenergii>
14. <https://www.elpribor.ru/catalog/98/1066/>
15. <http://www.entp.ru/documentation/UF2>

УДК 621.316

**Н.В. Савина, В.А. Гамолин**

#### **РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ КОМПЛЕКСАХ**

*Учитывая постоянно возрастающую стоимость электрической энергии, минимизация потерь электроэнергии представляют собой одну из основных задач для электросетевых комплексов. В данной работе предложен алгоритм выбора оптимального набора мероприятий по снижению потерь электроэнергии для электросетевых компаний.*

*Ключевые слова: потери электроэнергии, мероприятия по снижению потерь, структурный анализ, очаги повышенных потерь.*

#### **DEVELOPMENT OF TOOLS TO REDUCE ELECTRIC POWER LOSSES IN DISTRIBUTIVE NETWORK COMPLEXES**

*Given the ever-increasing cost of electrical energy, minimizing of power losses is one of the main tasks for the electric grid systems. In this paper, we propose an algorithm for selecting activities to reduce power losses for electric grid companies.*

*Key words: power losses, activities to reduce power losses, structural analysis, focus of increased power losses.*

Высокий уровень потерь электроэнергии в электросетевых комплексах свидетельствует о накапливающихся в них проблемах, которые требуют безотлагательных решений в реконструкции и техническом перевооружении электрических сетей. Решение проблемы потерь электроэнергии в электрических сетях относится к «Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации», утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 7 июля