

Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями

С. И. Макашева✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ smakasheva@gmail.com

Резюме

Статья посвящена актуальной проблеме оценки качества электрической энергии в системе электроснабжения общего назначения при наличии среди подключенных потребителей несимметричных и несинусоидальных нагрузок предприятий промышленности и железнодорожного транспорта. Выполнен аналитический обзор текущего положения дел в области правового регулирования степени ответственности за вклад в ухудшение качества электрической энергии и экономического стимулирования участников электроснабжения для улучшения качества электрической энергии. Производится анализ отечественных и зарубежных исследований в области выявления источников искажения, определения и оценки вклада участников электроснабжения в ухудшение показателей качества электрической энергии. Рассмотрены функциональные возможности автоматической системы мониторинга параметров электрической энергии, установленной в контрольных точках участка магистральной электрической сети, расположенного на Дальнем Востоке России. На основе ее базы данных проведены расчет и анализ показателей качества электрической энергии в контрольных точках систем, дана оценка степени их соответствия существующим нормативным документам. Результаты проведенного вероятностно-статистического анализа показателей качества электрической энергии позволяют заключить, что на рассматриваемом участке 220 кВ трехфазной сети общего назначения существенные искажения синусоидальности кривых напряжения вызываются нагрузками присоединенных тяговых подстанций. Кроме того, неудовлетворительная ситуация зафиксирована с положительным отклонением напряжения. Против ожидания симметрия напряжений в трехфазной системе в контрольных точках оказалась удовлетворительной. Подчеркивается важность разработки методик и способов выявления источников искажения и оценки вклада участников электроснабжения в ухудшение качества электрической энергии. Отмечается необходимость расширения функциональных возможностей существующей системы автоматического мониторинга в части анализа степени соответствия показателей качества нормам действующего государственного стандарта.

Ключевые слова

система электроснабжения, качество электрической энергии, несимметрия напряжений, искажение синусоидальности, отклонение напряжения

Для цитирования

Макашева С. И. Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 143–151. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.09.2021, поступила после рецензирования: 09.10.2021, принята к публикации: 16.10.2021

Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations

S. I. Makasheva✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ smakasheva@gmail.com

Abstract

The paper deals with the actual problem of assessing the power quality in a public power supply systems where asymmetric and non-sinusoidal loads of industrial enterprises and railway transport are connected. The current state of art in the field of legal regulation and economic stimulation of electricity supply participants in the field of power quality improving is analyzed. Analysis of domestic and foreign studies is carried out in the field of identifying sources of distortion, determining and evaluating the contribution of power supply participants to the power quality deterioration. The functional capabilities of the electricity parameters automatic monitoring system installed at the control points of the power network section located on the Far East of Russia were analyzed. Based on its databases, the calculation and analysis of power quality indicators at the mentioned control points were carried out. The degree of their compliance with existing regulatory documents was estimated. The results of the power quality indicators probabilistic and statistical analysis suggest that in the 220 kV section of the three-phase network under con-

sideration, voltage sinusoidity is significantly distorted resulting from connected traction substations' loads. In addition, an unsatisfactory situation is recorded with a positive voltage deviation. Against expectation, the symmetry of voltages in a three-phase system at control points turned out to be satisfactory. The importance of developing methods and ways for identifying distortion sources and assessing their contribution to the power quality deterioration is emphasized. Necessity of expanding the existing automatic monitoring system functionality in terms of assessing the degree of conformity of power quality indicators with the norms of the current State standard is recognized.

Keywords

power supply system, power quality, voltage unbalance, sinusoidal distortion, voltage deviation

For citation

Makasheva S. I. Analiz kachestva elektricheskoy energii v pitayushchej seti 220 kV s prisoedinyonnymi tyagovymi podstanciyami [Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 143–151. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151

Article info

Received: 21.09.2021, Revised: 09.10.2021, Accepted: 16.10.2021

Введение

Электрическая энергия в современном, динамично развивающемся мире является необходимым ресурсом для функционирования всех без исключения сфер деятельности человека, поэтому ее высокое качество нужно всем участникам электроэнергетического обмена на этапах производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Качество электрической энергии (КЭ) есть совокупность показателей качества электрической энергии (ПКЭ), изменение значений которых допускается в строго определенном диапазоне за конкретный временной интервал [1–4]. Если ПКЭ выходит за допустимые значения [2] или за установленные временные рамки, то качество электроэнергии считается неудовлетворительным. Электрическая энергия неудовлетворительного (низкого) качества вызывает ряд неблагоприятных последствий, начиная со снижения эффективности работы и срока службы электрооборудования, увеличения потерь в элементах системы электроснабжения и т. п., заканчивая ростом риска возникновения аварий и отказов элементов и системы в целом [1, 2–7]. Для нашей страны ущерб для экономики от низкого КЭ оценивается в 25 млрд долл. в год, при этом отмечается, что работы по повышению КЭ идут крайне медленно [8].

Проблемы с КЭ в равной степени затрагивают как потребителей, так и поставщиков электрической энергии, а также все звенья ее передачи и распределения. Поэтому присутствует необходимость решения ряда сложно разрешаемых вопросов между субъектами про-

цесса электроснабжения в разрезе проблемы ухудшения КЭ:

1. Доказательство участия субъекта (установление «виновника» ухудшения КЭ).

2. Определение степени (доли) вклада субъекта в искажение по конкретным ПКЭ.

3. Экономическое и правовое урегулирование возникающих споров, в том числе в области ответственности за изменение КЭ.

4. Разработка и применение мер, направленных на улучшение КЭ.

Одним из наиболее сложных является комплекс вопросов, касающихся доказательства участия субъекта в процессе ухудшения КЭ, определения доли его участия в этом ухудшении и применение экономических мер воздействия в отношении «виновника» вносимых искажений. Особенно сложно проводить подобные исследования в электрических сетях, к которым подключаются различные по мощности, характеру нагрузки и отраслевой принадлежности объекты.

Актуальность проблемы и постановка цели и задач

Несмотря на очевидный факт необходимости поддержания КЭ на высоком уровне, качество электрической энергии в системах электроснабжения за последние 10 лет значительно ухудшилось, что отмечают исследователи проблемы КЭ по всему миру [6–12]. Это вызвано не только расширением многообразия нелинейных и несинусоидальных нагрузок, подключаемых к системам электроснабжения, но множеством других факторов [1, 3, 6, 8–10]. Как результат, в реальных условиях эксплуата-

ции измеряемые значения ПКЭ могут значительно отличаться от тех значений, которые приведены в учебной и справочной литературе. Поэтому все большее значение приобретают результаты натуральных измерений на действующих объектах и их анализ.

В нашем случае, объектами исследования являются контрольные точки магистральной электрической сети на шинах 220 кВ трансформаторных подстанций, к которым подключаются отпаечные воздушные линии для присоединения объектов электроснабжения железнодорожного транспорта. Предметами исследования являются ПКЭ, рассчитанные на основе натуральных измерений характеристик электрической энергии. Цель работы – определение степени соответствия ПКЭ нормам действующего стандарта [2].

Для достижения поставленной цели выполнен вероятностно-статистический анализ ПКЭ на основании баз данных натуральных измерений автоматической системы мониторинга (АСМ) за 90 суток. АСМ установлена в точках магистральной электрической сети на участке транзита электрической энергии, расположенном на Дальнем Востоке РФ.

Анализ правовых и экономических аспектов стимулирования повышения качества электрической энергии

В Российской Федерации, несмотря на более чем 20-летний период, прошедший с окончания крупных реформ в энергетической отрасли, нормативно-правовая база по вопросам КЭ все еще не сформирована в полной мере и находится в стадии приведения ряда документов к требованиям международных стандартов [3, 8, 11, 13, 14]. Анализ арбитражной судебной практики показывает, что с 2000 г. к компаниям, осуществляющим энергосбытовую деятельность, применяются правовые методы воздействия за поставку электроэнергии низкого качества в соответствии со ст. 542 Гражданского кодекса РФ [3, 8, 11, 13, 14, 16]. Причем, ГК РФ фактически возлагает ответственность за низкое КЭ на энергоснабжающую организацию, хотя общеизвестно, что основная причина снижения КЭ по ряду ПКЭ (к примеру, коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения) находится на стороне потребителя [1, 3–5].

Кроме того, современные формулировки действующих в РФ нормативных документов в

части КЭ носят во многом декларативный характер и обязывают поставщиков электрической энергии обеспечивать КЭ в одностороннем порядке, что не только несправедливо по отношению к ним, но и на практике не способствует обеспечению КЭ [3]. Анализ арбитражной практики показывает, что заявления истца (энергоснабжающей организации или потребителя электроэнергии) к ответчику о принудительном включении в текст договора на электроснабжение требований по КЭ с оговоренными размерами экономических санкций, против которых возражает другая сторона, в удовлетворении заявляемого требования о возмещении ущерба (любой из сторон) судами любой инстанции практически всегда отклоняются [16].

Ранее существовавшая в нашей стране система скидок и надбавок за КЭ к тарифу за потребленную электрическую энергию была примером экономического стимулирования участников энергетического рынка. Однако, несмотря на долгое время своего применения и достаточно хорошую структуру, система была отменена Приказом Минэнерго РФ от 28 декабря 2000 г. № 167, а взамен нее не было введено в обращение никакого другого нормативно-правового документа. Правовое регулирование КЭ в российской электроэнергетике за 20 лет не показало своей эффективности ввиду отсутствия стимулирующих мер (специальных тарифов за поддержание высокого КЭ, штрафных санкций за неудовлетворительное КЭ и т. п.), а также наличия нечетких формулировок и «пробелов» в действующих нормативных правовых документах [3, 15–17]. Кроме того, в настоящее время в России отсутствуют нормативные правовые документы, четко регламентирующие вопросы определения степени участия и доли ответственности субъекта электроэнергетического рынка за внесенные искажения в ухудшение КЭ.

В мировой и отечественной научной практике исследования в области выявления источников искажения и оценки вклада участников электроснабжения ведутся достаточно интенсивно [10, 12, 18–22], однако наиболее сложным вопросом в правовом аспекте является вопрос доказательств и обоснования степени участия субъекта в процессе ухудшения КЭ.

В настоящее время мировым трендом во всех отраслях жизнедеятельности становится цифровизация процессов управления КЭ с ис-

пользованием интеллектуальных систем мониторинга параметров электроэнергетики, что является актуальным направлением и для российской энергетики [3, 6, 7, 23]. Использование АСМ для непрерывного мониторинга КЭ позволяет на основании анализа большого объема накопленных данных решать такие технически сложные вопросы, как установления факта искажения КЭ, сбора доказательств по факту выявленных нарушений КЭ и определения степени ответственности стороны, виновной в искажении КЭ [3].

Применяемые методы исследования и структура используемой системы мониторинга

В РФ лидером по внедрению систем мониторинга и управления качеством электроэнергии (СМиУКЭ) является Федеральная сетевая компания ПАО «ФСК ЕЭС», которая в 2016–2025 гг. реализует пилотный проект системы управления КЭ на основе непрерывного мониторинга.

Проект охватывает четыре предприятия межрегиональной электрической сети Востока (МЭС Востока), которые расположены в Хабаровском, Забайкальском и Красноярском краях, а также на территории Амурской области. Состав потребителей, присоединенных к электрической сети, также различен: Дальневосточная железная дорога – филиал ОАО «РЖД» (присоединенные тяговые подстанции переменного тока) и ряд промышленных предприятий – ООО «Горно-обогатительный комбинат», ООО «Транснефть Дальний Восток», ОАО «Цементный завод», ООО «Бруситовый рудник».

Указанные потребители являются характерными видами нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок, искажающих КЭ при присоединении к питающим электрическим сетям [22–26].

Схема внешнего электроснабжения участка с указанием электросетевых объектов приведена на рис. 1.

Подстанция (ПС) Хабаровская 500/220 кВ является крупным сетевым объектом, обеспечивающим переток мощности от генерирующих источников, расположенных в близлежащих энергосистемах. На ПС Хабаровская имеется два открытых распределительных устройства 220 и 500 кВ. Шины 500 кВ связывают две соседние энергосистемы по двум воздушным

линиям (ВЛ) 500 кВ. Через шины 220 кВ по ВЛ 220 кВ передается мощность на ПС 4 с отпайкой на ПС Икура/тяга, ПС нефтеперерабатывающей станции НПС–32, тяговую ПС Ин/тяга по двум цепям высоковольтных линий электропередачи (см. рис. 1).

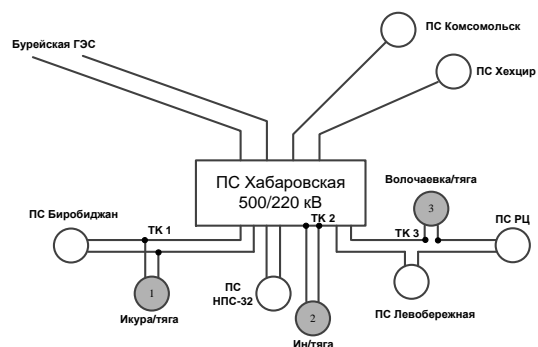


Рис. 1. Структурная схема внешнего электроснабжения рассматриваемого участка
Fig.1. External power supply scheme of the considered power supply system section

Точки контроля КЭ, о которых далее пойдет речь, находятся на ВЛ 220 кВ, питающих одноименные присоединения к тяговым подстанциям, обозначенным на рис. 1 как ТК1, ТК2 и ТК3.

Рассматриваемый участок энергосистемы не имеет собственных генерирующих источников электрической энергии, в связи с чем потребность в мощности и электрической энергии всех потребителей покрывается за счет электростанций, расположенных в соседних субъектах РФ.

На уровне подстанции в выбранных контрольных точках производится измерение ПКЭ при помощи приборов класса А: Ресурс–UF2–4–30 и МИП–02А–43.01. На этом уровне поступающая информация в виде распределенной функции измерений доступна для обработки, отображения, хранения и передачи информации. Для того чтобы измеренные характеристики послужили основанием для возможных исковых требований в судебные органы (к примеру, для возмещения материального ущерба из-за несоответствия КЭ нормам ГОСТа), замеры, должны быть произведены в порядке, регламентированном ГОСТ 30804.4.30–2013. Замеры ПКЭ в СМиУКЭ формируются в виде базы данных таблиц, а информация, представленная в ней, легко поддается обработке стандартными утилитами Microsoft

Excel, что позволяет хранить ее удаленно на сервере, анализировать, делать прогнозы ПКЭ и т. д.

Общеизвестно, что параметры электрической сети (в том числе и ПКЭ) можно представить в виде случайных величин, измерения и обработку которых принято производить при помощи вероятностно-статистических методов [3].

Для практических расчетов принимается, что распределение энергетических характеристик электрической сети подчиняется распределению Гаусса (нормальный закон распределения):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}},$$

где x – рассматриваемая случайная величина, μ_x – математическое ожидание (МО) случайной величины x ; σ_x – среднеквадратическое отклонение (СКО).

Рассматриваемая СМиУКЭ фиксирует значения ПКЭ в текущий момент времени, но не сравнивает их с допустимыми значениями ПКЭ и не выводит заключение о соответствии (или не соответствии) КЭ нормам [2]. Этот вид расчетов нам необходимо было провести для контрольных точек. Для этого по каждому исследуемому ПКЭ для каждой контрольной точки были рассчитаны параметры нормального закона распределения для исследуемых ПКЭ и определены прогнозные диапазоны их изменения.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате расчета и анализа значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} в точках контроля, откуда получают питание тяговые подстанции (Икура/тяга, Ин/тяга, Волочаевка/тяга на рис. 1.), превышений требований ГОСТ 32144-2013 не было выявлено. Такая ситуация является скорее исключением из правил, так как однофазные нагрузки электроподвижного состава железных дорог, неравномерно загружающие трехфазную питающую систему, яв-

ляются источниками несимметрии напряжений. В нашем случае удовлетворительное КЭ по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} можно объяснить нетипичной схемой подключения тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения и близостью мощного питающего центра – ПС Хабаровска 500/220 кВ.

В результате анализа положительного отклонения напряжения $\delta U_{(+)}$ на ПС Хабаровская по всем фазам выявлено превышение норм, установленных ГОСТ 32144–2013 [2]. Результаты расчета по каждой из трех рассматриваемых точек присоединения тяговых подстанций приведены в табл. 1. Жирным шрифтом в таблице выделены значения, которые выходят за нормируемые пределы [2].

КЭ по величине положительного отклонения напряжения во всех трех точках контроля является неудовлетворительным.

Анализ искажения синусоидальности кривых напряжения по отдельным гармоническим составляющим $K_{U(n)}$ показал, что для ТК1 имеются превышения требований [2] для следующих высших гармонических составляющих (ВГС) напряжений:

- по фазе А превышены нормально допустимые значения по 9 ВГС, предельно допустимые значения превышены по 5 и 9 ВГС;
- по фазе В превышены нормально допустимые значения по ВГС с порядковыми номерами 3 и 9, предельно допустимые – 5 и 9 ВГС;
- по фазе С превышены нормально допустимые значения для 9 ВГС, предельно допустимые значения превышены по ВГС с номерами 5 и 9.

Таким образом, КЭ по коэффициенту $K_{U(n)}$ в исследуемой точке ТК1 не соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013 по всем трем исследуемым фазам.

Опуская результаты анализа для ТК2 ввиду их схожести с результатами для ТК1 по количеству и распределению по фазам, перей-

Табл. 1. Положительное отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$

Table 1. Positive voltage deviation $\delta U_{(+)}$

Точки контроля	$\delta U_{вс (+)}$		$\delta U_{сa (+)}$		$\delta U_{aв (+)}$	
	Процент выхода	Соответствие ГОСТ 32144-2013 (да/нет)	Процент выхода	Соответствие ГОСТ 32144-2013 (да/нет)	Процент выхода	Соответствие ГОСТ 32144-2013 (да/нет)
1	0	Да	4,788	Нет	7,356	Нет
2	0	Да	4,441	Нет	6,731	Нет
3	0,069	Нет	2,428	Нет	2,914	Нет

дем к детальному анализу несинусоидальности кривых напряжения ТКЗ. Здесь искажения КЭ проявляются для большего, чем у предыдущих ТК1 и ТК2, числа высших гармонических составляющих напряжения. Результаты анализа для ТКЗ представлены на рис. 2 и 3.

Анализируя данные рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что качество электрической энергии на ТКЗ (тяговая подстанция Волочаевка на рис. 1) не соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013 в отношении коэффициента гармонических составляющих $K_{u(n)}$ для ВГС напряжения с номерами 2, 4, 9 по фазе А, для гармоник с номерами 2, 3, 11 по фазе В и для гармоник с номерами 9, 11 и 13 по фазе С.

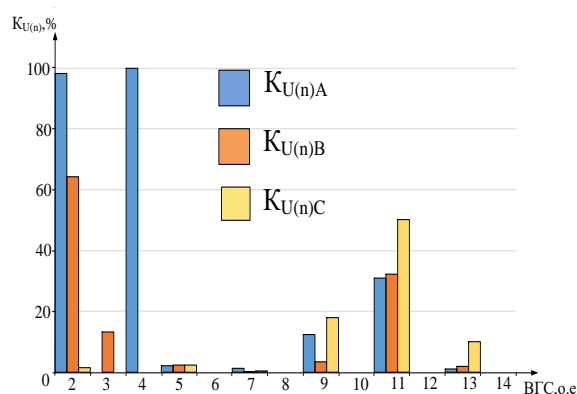


Рис. 2. Количество значений $K_{u(n)}$ в третьей точке контроля, которые превышают значения для 95 % времени замера по [2]

Fig. 2. Number of $K_{u(n)}$ values exceeding the 95 % values of the sampling time according to [2]

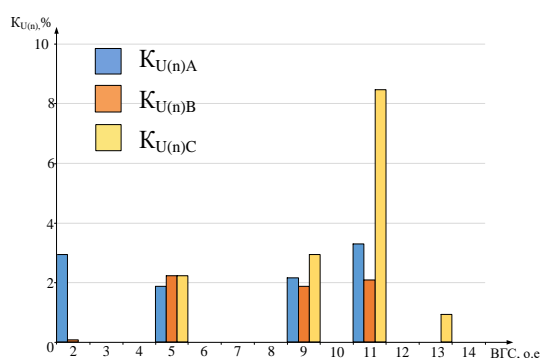


Рис. 3. Количество значений $K_{u(n)}$ в третьей точке контроля, которые превышают значения для 100 % времени замера по [2]

Fig. 3. Number of $K_{u(n)}$ values exceeding the 100 % values of the sampling time according to [2]

В результате расчета суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U выявлено, что значения K_U превышает требования для всех трех точек контроля [2].

Таким образом, для точек контроля КЭ, расположенных в системе внешнего электроснабжения с присоединенными тяговыми подстанциями фиксируется неудовлетворительное качество электрической энергии в отношении положительного отклонения напряжения и искажения синусоидальности кривых напряжения (причем искажения синусоидальности фиксируются по всем трем фазам напряжения).

Все остальные анализируемые ПКЭ в рассматриваемых точках контроля находятся в пределах установленных норм [2].

Важно отметить, что среди гармонических составляющих, по которым были выявлены превышения требований ГОСТ, третья гармоника напряжения практически не фигурирует. Ее превышение требованиям норм зафиксировано только по одной фазе и только для одной ТКЗ. Как правило, именно третьей гармонике напряжения, фиксируемой на шинах высшего напряжения тяговых подстанций, соответствует наибольшее (или второе – третье) по величине амплитудное значение из всех высших гармонических составляющих напряжения, поэтому ее нередко называют в числе преобладающих гармоник [25, 26]. В проведенном анализе, как можно заключить, третья гармоника напряжения преобладающей с точки зрения ухудшения КЭ не является.

Результатирующая сводка по ПКЭ не удовлетворяющим требованиям ГОСТ 32144-2013, для трех точек контроля, к которым подключаются тяговые подстанции, приведена в табл. 2.

Табл. 2. Результаты анализа качества электрической энергии

Table 2. Power quality analyses summary

Точки контроля	Наименование показателей качества электрической энергии, не удовлетворяющих требованиям ГОСТ 32144-2013
1	$\delta U_{ca(+)}$, $\delta U_{ab(+)}$, K_{UA} , K_{UB} , K_{UC} , $K_{UA(5)}$, $K_{UA(9)}$, $K_{UB(5)}$, $K_{UB(9)}$, $K_{UC(5)}$, $K_{UC(9)}$
2	$\delta U_{ca(+)}$, $\delta U_{ab(+)}$, K_{UA} , K_{UB} , K_{UC} , $K_{UA(5)}$, $K_{UA(9)}$, $K_{UB(5)}$, $K_{UB(9)}$, $K_{UC(5)}$, $K_{UC(9)}$
3	$\delta U_{bc(+)}$, $\delta U_{ca(+)}$, $\delta U_{a(+в)}$, K_{UA} , K_{UB} , K_{UC} , $K_{UA(2)}$, $K_{UA(5)}$, $K_{UA(9)}$, $K_{UA(11)}$, $K_{UB(2)}$, $K_{UB(5)}$, $K_{UB(9)}$, $K_{UC(5)}$, $K_{UC(9)}$, $K_{UC(11)}$, $K_{UC(13)}$

Как следует из результатов анализа ПКЭ для трех точек контроля, сама неудовлетворительная ситуация по КЭ наблюдается в ТКЗ, где подключается тяговая подстанция Волочаевка.

Можно предположить, что дополнительными факторами, ухудшающими качество электрической энергии, помимо основного искажающего фактора – наличия мощных тяговых нагрузок железнодорожного транспорта являются особенности схемы питания трех тяговых подстанций от сети внешнего электроснабжения и близость специфического крупного узла – ПС Хабаровская 500 кВ, через которую проходят транзитные потоки мощности.

Заключение

В результате проведенного анализа правовых и экономических аспектов в области качества электрической энергии выявлена потребность в нормативно-правовом урегулировании ряда вопросов касательно доли вклада участников электроснабжения в ухудшение КЭ, определения и закрепления в российском законодательстве мер для активизации сил производителей, поставщиков, и потребителей, направленных на повышение КЭ.

Произведенный анализ показателей качества электрической энергии для трех точек магистральной электрической сети с присоединенными тяговыми подстанциями показал отсутствие проблем с симметрией напряжения в точках контроля, но выявил неудовлетворительную ситуацию с гармоническими искажениями фазных напряжений и положительным отклонением напряжения. КЭ в точках контроля с подключенными тяговыми подстанциями признано неудовлетворительным по трем ПКЭ – положительному отклонению напряжения $\delta U_{(+)}$, коэффициенту n -ной гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ и суммарному коэффициенту искажения кривой напряжения K_U .

Нужно отметить, что технические возможности используемой в настоящем времени АСМ на участке энергосистемы ПАО «ФСК ЕЭС», необходимо функционально расширить и оборудовать дополнительным расчетным блоком, чтобы стало возможным проводить проверку на степень соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 32144-2013 [2] непосредственно при мониторинге КЭ.

Список литературы

1. Карташов И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие. Москва: Издательский дом МЭИ. 2017. 347 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
3. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. 114 с.
4. Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54–59.
5. Висящев А.Н., Федосов Д.С. Оценка влияния потребителей на искажение напряжения в электрической сети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3 (48). С. 46–51.
6. Montoya F.G., García-Cruz A., Montoya M.G., Manzano-Agugliaro F. Power quality techniques research worldwide: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, Vol. 54, Pp. 846–856. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.091.
7. Makasheva S., Pinchukov P., Szoltysek J. The Power Quality as a Pretext for Developing Smart City Concepts // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
8. Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н. Эффективность снижения уровня несинусоидальности напряжения на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 6 (200). С. 121–128.
9. Mahela P., Shaik A.G., Gupta N. A critical review of detection and classification of power quality events // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 41. Pp. 495–505. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.070.
10. Hong W., Liu Z., Wu X. Power quality disturbance recognition based on wavelet transform and convolutional neural network // 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). 2021. Pp. 193–197. DOI: 10.1109/ICAICA52286.2021.9498060.
11. Кузнецов А.В., Чикин В.В. Управление качеством электроэнергии в электроэнергетической системе // Промышленная энергетика. 2021. № 5. С. 53–59. DOI: 10.34831/EP.2021.30.84.008.
12. André L., David T., Hugo V.N., Hugo F.V. Novelty detection and multi-class classification in power distribution voltage waveforms // Expert Systems with Applications. 45. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.09.048.

13. Кононенко В.Ю., Мурачев А.С., Смоленцев Д.О. Задачи научно-технической политики в области качества электроэнергии на современном этапе формирования цифровой экономики РФ // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. №2(47). С. 28–31.
14. Бартоломей П.И., Паздерин А.А., Паздерин А.В. Направления совершенствования системы оплаты услуг на передачу электроэнергии с учетом международного опыта // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. № 5 (56). С. 66–71.
15. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Качество тока: аспекты оценки и нормирования // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2020. Т. 20. № 4. С. 23–35. DOI: 10.14529/power200403.
16. Овсейчук В.А. Федеральный Закон «Об электроэнергетике»: о необходимости внесения изменений или разработки нового документа // *Новости электротехники*. 2015. № 1(91). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2015/91/03.php>.
17. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Cost reduction ability by electricity tariff selection for construction facilities located in non-price areas // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. DOI:10.1051/mateconf/20168605025.
18. Bulycheva E., Yanchenko S. Online determination of varying harmonic load contribution to grid voltage distortion // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020. Pp. 1–6, DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112017.
19. Gonzalez-Abreu A.-D., Delgado-Prieto M., Osornio-Rios R.-A., Saucedo-Dorantes J.-J., Romero-Troncoso R.-d.-J. A novel deep learning-based diagnosis method applied to power quality disturbances // *Energies*. 2021. No. 14. Pp. 2839. DOI: 10.3390/en14102839.
20. Mariscotti A.; Sandrolini L. Detection of harmonic overvoltage and resonance in AC railways using measured pantograph electrical quantities // *Energies*. 2021. № 14. С. 5645. DOI:10.3390/en14185645.
21. Тигунцев С.Г., Турдиев А.Т., Ахмедов С.Б. Исследование методики оценки вклада участников электроснабжения в качество электрической энергии // *Электрические станции*. 2020. № 6 (1067). С. 29–34.
22. Кудряшев Г.С., Селезнёв А.С., Федосов Д.С. Выявление источников искажения формы кривой напряжения в электроэнергетических системах // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т. 2. № 3. С. 59–65.
23. Макашева С.И. Автоматизированная система мониторинга как инструмент бережливого производства системы тягового электроснабжения // *Электротехника*. 2016. № 2. С. 52–55.
24. Klyuev R.V., Fomenko O.A., Gavrina O.A., Sokolova A.A., Dzeranov B.V., Morgoev I.D., Zaseev S.G. Analysis of non-sinusoidal voltage at metallurgical enterprises // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 663. Pp. 012032 DOI: 10.1088/1757-899X/663/1/012032.
25. Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мамаев А.Р., Терлецкий С.Г. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 3(88). С. 11–20.
26. Kaleybar H.J., Brenna M., Foiadelli F., Fazel S.S., Zaninelli D. Power quality phenomena in electric railway power supply systems: an exhaustive framework and classification // *Energies*. 2020. No. 13. Pp. 6662. DOI: 10.3390/en13246662.

References

1. Kartashov I.I., Tul'skiy V.N., Shamonov R.G. *Upravlenie kachestvom elektroenergii: uchebnoe posobie* [Quality control of electric power: textbook]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2017. 347 p.
2. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Normy kachestva ehlektricheskoy ehnergii v sistemakh ehlektrosnabzheniya obshhego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Introduced 2014-07-01. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.
3. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. *Kachestvo elektricheskoy energii: monitoring, prognoz, upravlenie* [The electric energy quality: monitoring, forecast, management]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2020. 114 p.
4. Vagin G.Y., Kulikov A.L. *Kachestvo elektricheskoy energii v sistemah ehlektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya* [The power quality in power supply systems. Analysis of the state of the methods of regulation and control] *Elektricheskije stantsii* [Power stations]. 2019, No. 6 (1055), pp. 54–59.
5. Visyashchev A.N., Fedosov D.S. *Otsenka vliyaniya potrebiteley na iskazhenie napryazheniya v elektricheskoy seti* [Estimation of consumer impact on voltage distortion in electric network]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution]. 2018, No. 3 (48), pp. 46–51.
6. Montoya F.G., Garcia-Cruz A., Montoya M.G., Manzano-Agugliaro F. Power quality techniques research worldwide: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 54. pp. 846–856. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.091.
7. Makasheva S., Pinchukov P., Szoltysek J. The Power Quality as a Pretext for Developing Smart City Concepts 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2020. pp. 1–7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
8. Kudryashev G.V., Tretyakov A.N. *Effektivnost' snizheniya urovnya nesinusoidal'nosti napryazheniya na sel'sko-hozyaystvennykh predpriyatiyakh Irkutskoy oblasti* [The effectiveness of reducing the level of nonsinusoidal voltage in agricultural enterprises of the Irkutsk region]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Agricultural University], 2021, No. 6 (200), pp. 121–128.
9. Mahela P., Shaik A.G., Gupta N. A critical review of detection and classification of power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. pp. 495–505. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.070.
10. Hong W., Liu Z., Wu X. Power quality disturbance recognition based on wavelet transform and convolutional neural network. *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. 2021. pp. 193–197. DOI: 10.1109/ICAICA52286.2021.9498060.

11. Kuznetsov A.V., Chikin V.V. Upravlenie kachestvom elektroenergii v elektroenergeticheskoy sisteme [Power quality management in the electric power system] *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*. 2021, No. 5, pp. 53–59. DOI: 10.34831/EP.2021.30.84.008.
12. André L., David T., Hugo V.N., Hugo F.V. Novelty detection and multi-class classification in power distribution voltage waveforms. *Expert Systems with Applications*. 45. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.09.048.
13. Kononenko V.Yu., Murachev A.S., Smolentsev D.O. Zadachi nauchno-tehnicheskoy politiki v oblasti kachestva elektroenergii na sovremennom etape formirovaniya cifrovoy ekonomiki RF [The tasks of scientific and technical policy in the field of power quality at the present stage of digital economy development in the Russian Federation]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]*. 2018, No. 2(47), pp. 28–31.
14. Bartolomej P.I., Pazderin A.V., Pazderin A.A. Napravleniya sovershenstvovaniya sistemy oplaty uslug na peredachu elektroenergii s uchetom mezhdunarodnogo opyta [Directions of improving the electric energy transmission tariff system taking into account international experience]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]*. 2019, No. 5 (56), pp. 66–71.
15. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Kachestvo toka: aspekty ocenki i normirovaniya [Current quality: assessment and standardization aspects]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering]*. 2020. Vol. 20, No. 4, pp. 23–35. DOI: 10.14529/power200403.
16. Ovseichuk V.A. Federal'nyy Zakon «Ob elektroenergetike»: o neobходимosti vneseniya izmeneniy ili razrabotki novogo dokumenta [Federal Law «On Electric Power Industry»: On the need to amend or develop a new document]. *Novosti elektrotehniki [Electrical Engineering News]*. 2015, No. 1(91).
17. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Cost reduction ability by electricity tariff selection for construction facilities located in non-price areas *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. DOI:10.1051/mateconf/20168605025.
18. Bulycheva E., Yanchenko S. Online determination of varying harmonic load contribution to grid voltage distortion 2020 *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2020. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112017.
19. Gonzalez-Abreu A.-D., Delgado-Prieto M., Osornio-Rios R.-A., Saucedo-Dorantes J.-J., Romero-Troncoso R.-d.-J. A novel deep learning-based diagnosis method applied to power quality disturbances. *Energies*. 2021. No. 14. pp. 2839. DOI: 10.3390/en14102839.
20. Mariscotti A., Sandrolini L. Detection of harmonic overvoltage and resonance in ac railways using measured pantograph electrical quantities. *Energies*. 2021. No. 14. pp. 5645. DOI:10.3390/en14185645.
21. Tiguncev S., Turdiev A., Akhmedov S. Issledovanie metodiki ocenki vklada uchastnikov elektrosnabzheniya v kachestvo elektricheskoy energii. [Research of the methodology for assessing the contribution of electricity supply participants to the quality of electric energy]. *Elektricheskie stantsii [Electrical stations]*. 2020, No. 6 (1067), pp. 29–34.
22. Kudryashev G.V., Seleznev A.S., Fedosov D.S. Vyyavlenie istochnikov iskazheniya formy krivoy napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh [Identification of voltage waveform distortion sources in electric power systems]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]*. 2014. Vol. 2, No. 3, pp. 59–65.
23. Makasheva S.I. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa kak instrument berezhlivogo proizvodstva sistemy tyagovogo ehlektrosnabzheniya [An automated monitoring system as an instrument of lean production of a traction power supply system]. *Elektrotehnika [Electrotechnical]*. 2016. Vol. 87, No. 2, pp. 107–109.
24. Klyuev R.V., Fomenko O.A., Gavrina O.A., Sokolov A.A., Sokolova O.A., Dzeranov B.V., Morgoev I.D., Zaseev S.G. Analysis of non-sinusoidal voltage at metallurgical enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 663, pp. 012032 DOI: 10.1088/1757-899X/663/1/012032.
25. Makasheva S.I., Mamaev A.R., Pinchukov P.S., Terleckiy S.G. Otsenka kachestva napryazheniya na shinah 27,5 kV tyagovoy podstancii s ustroystvom prodol'noy emkostnoy kompensatsii [Estimate of voltage quality on traction substation buses of 27.5 kV with longitudinal capacitive compensation device]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]*. 2020, No. 3 (88), pp. 11–20. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-11-20.
26. Kaleybar H.J., Brenna M., Foadelli F., Fazel S.S., Zaninelli D. Power quality phenomena in electric railway power supply systems: an exhaustive framework and classification. *Energies*. 2020, No. 13. pp. 6662. DOI: 10.3390/en13246662.

Информация об авторах

Макашева Светлана Игоревна – канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: smakasheva@gmail.com.

Information about the authors

Svetlana I. Makasheva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: smakasheva@gmail.com.