

КАЧЕСТВО ТОКА: АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ И НОРМИРОВАНИЯ

С.И. Макашева, П.С. Пинчуков

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия*

Проблемы качества электроэнергии касаются абсолютно всех сфер человеческой деятельности – от экономики и науки до медицины и искусства, ведь невозможно представить жизнь современного человека без использования электрической энергии. Стандартизация, мониторинг, управление и координация качества электрической энергии крайне важны для обеспечения электромагнитной совместимости в системе электроснабжения и поэтому являются предметом постоянных, непрекращающихся исследований в большинстве стран мира. Для привлечения внимания к проблемам качества тока в различных точках системы электроснабжения проведено исследование степени искажения гармонического состава кривых тока у городских потребителей жилищно-коммунального хозяйства. В статье рассматриваются актуальные аспекты консолидации терминологии и структуры показателей качества электроэнергии. Систематизированы и представлены в виде единой блок-схемы принятые в мировой практике показатели качества электроэнергии. Детально рассмотрены принципы расчёта и оценки степени искажения формы тока и напряжения в соответствии с существующими отечественными и зарубежными нормативными документами. На основе измерений показателей качества электрической энергии, проведенных на существующих объектах городской инфраструктуры, был проведен сравнительный анализ с требованиями стандарта IEEE 519-2014. В результате анализа натурных измерений отмечено неудовлетворительное положение дел в области гармонических искажений кривых тока, выявлены наиболее вероятные причины и описаны последствия низкого качества электрической энергии.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, показатели качества электрической энергии (ПКЭ), качество электрической энергии (КЭ), мониторинг, стандарт, IEEE 519, искажение формы кривой.

Введение

Электрическая энергия (ЭЭ) является непременным условием успешного осуществления различных видов человеческой деятельности. Причем качество и стоимость производимых промышленных товаров и услуг, эффективность производственных процессов и, наконец, уровень комфорта повседневной жизни современного человека во многом зависят от качества электроэнергии (КЭ). Термин «качество электрической энергии» согласно п. 3.1.38 ГОСТ 32144–2013 трактуется как степень соответствия характеристик электрической энергии в рассматриваемой точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ [1]. Иначе говоря, КЭ – это совокупность характеристик электрической энергии, которую следует сравнивать с нормированными значениями. Вопросы КЭ относятся к области электромагнитной совместимости систем и объектов электроэнергетики с техническими средствами и окружающей средой, иными словами, связаны с вопросами обеспечением электромагнитного баланса между источниками и приемниками электромагнитных воздействий.

Для работы электроприборов или любых других технических средств, которые производят пре-

образование ЭЭ в другой вид энергии – механическую, тепловую и т. п., требуется ряд параметров (частота, напряжение, ток и т. п.), которым должна соответствовать питающая их электрическая энергия. В этом случае электроприемник в соответствии с заложенным в него заводом-изготовителем сроком службы может нормально работать. Однако общеизвестно, что отличительной особенностью ЭЭ от других видов энергии является то, что в процессе её производства, потребления, передачи и распределения происходит постоянное изменение этих параметров. В ряде случаев отклонение от заданных номинальных параметров ЭЭ приводит к проблемам в работе технических средств, питающихся такой ЭЭ: снижению функциональности, срока службы и уменьшению эффективности работы оборудования. Перебои и перерывы в электроснабжении потребителей электрической энергии, снижение производительности и рост брака среди выпускаемой продукции, возникающие неисправности оборудования и избыточное энергопотребление – все это общеизвестные признаки низкого качества электрической энергии [2–6].

За последние 10–15 лет значительно возросло количество установленных фактов негативного

влияния низкого КЭ на работу потребителей ЭЭ [4–8]. К примеру, экономический ущерб от низкого КЭ в промышленности ряда европейских стран оценивается в размере до 4 % от годового оборота этой отрасли [6]. Экономические потери из-за неудовлетворительного КЭ в европейской экономике превышают 150 млрд евро в год, а в Соединенных Штатах Америки они оцениваются в размере от 119 до 188 млрд американских долларов в год [6, 7]. Таким образом, поддержание параметров ЭЭ в пределах допустимого стандартами «коридора», где отклонения от номинальных значений не несут значительных последствий для работы технических средств, будет обеспечивать нормальную работу электроустановки и заложенную в неё заводом-изготовителем выработку ресурса, что имеет огромный финансовый потенциал для промышленных компаний. С точки зрения повышения энергоэффективности промышленных предприятий вопросы КЭ также актуальны, так как повышение КЭ является ключевым фактором энергосбережения. В настоящее время КЭ становится не только важным аспектом деятельности производителей электрической энергии и организаций, занимающихся её передачей и распределением, но и сферой растущего беспокойства для большого числа потребителей [2, 3, 9, 10]. Причиной является не только возросшая чувствительность современного оборудования потребителей к электромагнитным воздействиям. Дело в том, что ЭЭ, проходя от генерирующих станций по линиям электропередачи до конечных потребителей, претерпевает множественные трансформации и постоянно изменяет свое качество вследствие взаимного электромагнитного влияния других электроприемников, подключенных к электрической сети. В такой сложной ситуации особую важность приобретают вопросы мониторинга КЭ, стандартизации требований к КЭ и аспекты координации между всеми объектами энергосистемы: от электростанций до конечного потребителя.

Постановка цели и задач исследования

Целью настоящего исследования является оценка качества тока в точке передачи электроэнергии 0,4 кВ на примере объектов городского жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ).

Для достижения поставленных целей необходимо:

- выполнить анализ отечественных и зарубежных нормативных документов в области КЭ;
- систематизировать информацию о нормируемых по току показателях качества электрической энергии (ПКЭ) в точках общего присоединения;
- произвести натурные замеры на объектах ЖКХ и расчёт значений ПКЭ по току;
- сравнить значения ПКЭ, полученные расчётным путём, с нормируемыми величинами и

дать оценку качеству тока в расчетных точках системы электроснабжения

– оценить целесообразность применения лимитов гармонических составляющих кривых тока, рекомендованных зарубежными стандартами на КЭ в точках общего присоединения, для производства инженерных расчетов на отечественных объектах (для оценки энергоэффективности, потенциала энергосбережения и т. п.).

Методы и объект исследования

Объектами исследования являются точки передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц, от которых осуществляется электроснабжение предприятий городского жилищно-коммунального хозяйства. Предметом исследования являются показатели качества тока, а именно коэффициенты гармонических составляющих кривых тока.

Краткий обзор вопроса стандартизации КЭ в мировой практике

Правовое регулирование является одной из важных составляющих развития любой отрасли человеческой деятельности, и электроэнергетика не является исключением. Стандартизация и координация КЭ в большинстве развитых стран мира происходит в соответствии с нормативными актами в виде федеральных законов, стандартов, кодексов, руководств и т. п. В вопросах стандартизации КЭ различают нормирование условий в точках передачи/поставки электрической энергии пользователям электрических сетей (и/или точках общего присоединения) и нормы эмиссии, вносимые отдельными техническими средствами при подключении к электрическим сетям (низкого напряжения). В настоящем исследовании рассматривается КЭ в точках передачи ЭЭ пользователям электрических сетей.

Ученые всего мира стали наиболее активно заниматься проблемой КЭ в середине 60-х – начале 70-х гг. XX в. [9], в результате чего к настоящему времени большинство стран мира имеют сформированную нормативно-правовую базу документов в области КЭ. В разных странах мира эта база имеет свои особенности, определяющим в которых является нормативный документ (заимствованный или разработанный внутри страны), положенный в ее основу. Существуют несколько международных организаций, приведенных в табл. 1, нормативные разработки которых становятся основой в вопросах стандартизации КЭ для многих стран мира [8–12].

Стандарты по качеству электрической энергии в точках её передачи в большинстве развитых стран мира базируются на стандартах IEEE или IEC (МЭК). Отметим, что стандарты IEEE не имеют

Таблица 1

Международные организации, занимающиеся вопросами стандартизации КЭ

Аббревиатура (место штаб-квартиры)	Полное название		Сайт организации
	англоязычное	русскоязычное	
IEEE (Нью-Йорк, США)	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Институт инженеров по электротехнике и электронике	www.ieee.org
IEC (Женева, Швейцария)	International Electrotechnical Commission	Международная электротехническая комиссия	www.iec.com
CIGRE (Франция)	International Council on Large Electric Systems	Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения	www.cigre.org
CENELEC (Брюссель, Бельгия)	European Committee for Electrotechnical Standardization	Европейский комитет электротехнической стандартизации	www.cenelec.eu
UIE (Брюссель, Бельгия)	International Union for Electricity Applications	Международный Союз по применению электричества	www.uie.org
EASC (Минск, Белорусия)	Euro-Asian Council for Standardization, Metrology and Certification	Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации Содружества Независимых Государств	www.easc.org.by

такого структурированного и всеобъемлющего набора положений, как документы ИЕС (МЭК). Тем не менее стандарты IEEE приводят более практический и более подробный теоретический обзор для рассматриваемых явлений в области КЭ, что делает эту группу документов очень востребованной и полезной даже за пределами США [11, 12].

Кроме того, некоторые страны мира следуют по пути создания, разработки и применения собственных стандартов, примерами такой стратегии являются бывший СССР и нынешний Китай. К примеру, первый советский государственный стандарт, устанавливающий перечень показателей и норм качества электроэнергии – ГОСТ 13109–67, – являлся отечественной разработкой и использовался с незначительными изменениями (ГОСТ 13109–87, а затем ГОСТ 13109–97) на протяжении почти 50 лет, вплоть до 2014. [2, 3]. Только впоследствии в соответствии с рекомендациями Европейского сообщества его содержание трансформировалось в группу стандартов, основанных на стандарте EN 50160: 2010 [13]. В странах Европейского Союза этот стандарт является основным нормативным документом для оценки качества электроэнергии [2, 3, 6, 10, 11].

В Китайской Народной Республике в 1998 г. Государственная сетевая корпорация Китая разработала требования к техническому контролю энергосистем, что потребовало стандартизации и КЭ. Серия стандартов на КЭ изначально разрабатывалась Управлением по стандартизации Китая (China Standardization Authority, SAC), а в настоящее время представляет собой группу стандартов GB/T 15543-2008, SAC/TC1 и SAC/TC246 [14].

Указанные стандарты имеют основу, схожую со стандартами ИЕС (МЭК), включая методы измерения, приемлемые уровни индикаторов и требования к мониторингу КЭ [4, 9]. Таким образом, структура и положения современных китайских, российских и европейских стандартов похожи и очень близки по своему содержанию.

Важно, что в некоторых странах мира структура национальных стандартов может быть аналогична международным стандартам, но сами величины нормируемых значений могут значительно отличаться от норм первоисточника (они могут быть более лояльными или, наоборот, более жесткими). Например, такие страны, как Российская Федерация, Норвегия и Венгрия имеют свои собственные стандарты качества электроэнергии, где требования к некоторым ПКЭ более строгие, чем приведенные в EN50160 [15, 16].

Южная Африка начала с разработки и внедрения в 1993 г. своих собственных стандартов на КЭ, а в 2013 г. приняла в качестве основы для новой стандартизации и измерений КЭ стандарт ИЕС 61000-4-30 [17]. КЭ в Австралии и Новой Зеландии регулируется стандартом AS/NZS 61000.3.6: 2001, который основан на стандарте ИЕС 61000-3-6: 1996 «Электромагнитная совместимость» [12].

В США стандарты на КЭ разрабатываются объединением американских промышленных и деловых групп, называемым Американским национальным институтом стандартизации (American National Standards Institute, ANSI), а также международной некоммерческой ассоциацией специалистов в области электротехники и радиоэлектрони-

Электроэнергетика

ки, носящей название Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) [6, 9, 16].

Важно отметить, что некоторые развивающиеся страны, такие как Индия и Таиланд, все ещё не имеют чётко определенной системы национальных стандартов по КЭ, но имеющиеся экспертные оценки дают основание предполагать, что их формирование будет опираться на IEEE 519-2014 [6, 16, 18, 19].

Действующие в мировой практике стандарты, нормы, кодексы и правила в области КЭ в точках передачи ЭЭ характеризуются разнообразием, обилием специальной терминологии и широким

кругом рассматриваемых проблем – от качества заземления до надежности электроснабжения потребителей. Несмотря на имеющуюся тенденцию систематизации и координации нормативных документов в области КЭ в различных странах мира, в настоящее время специальная терминология для описания качества электроэнергии вряд ли может считаться единообразной и упорядоченной, поскольку она не устраняет такие недостатки терминов, как двусмысленность и синонимия [12, 16, 19, 20]. Именно поэтому различные международные комиссии (такие как группы IEC, SIGRE и IEEE SCC) на

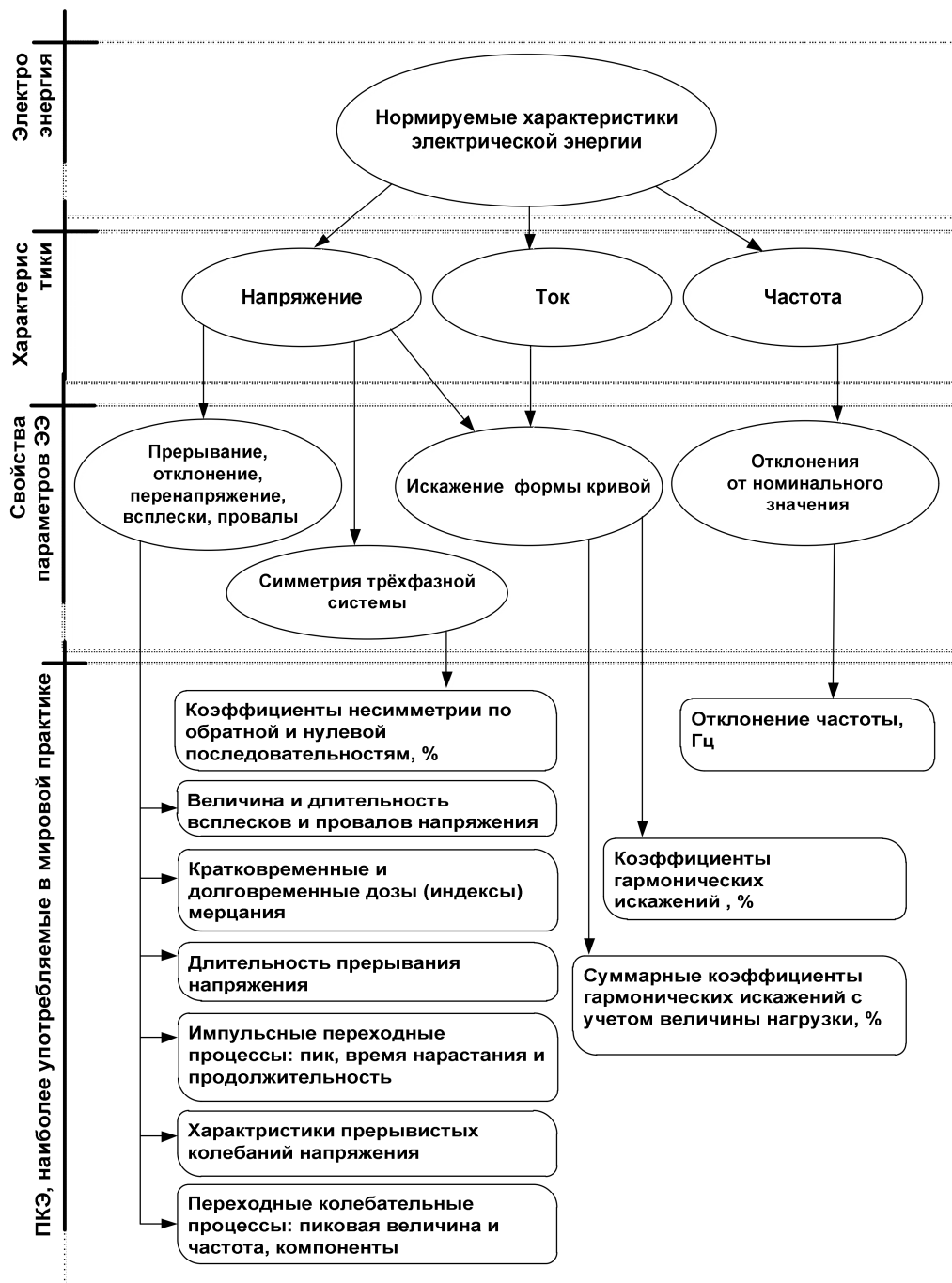


Рис. 1. Система нормирования качества электроэнергии в точках передачи электроэнергии, принятая в мировой практике

протяжении последних 5 лет особенно активно ведут работы над улучшением терминологии. Создание новых (или обновление существующих) стандартов требует практического и научного толкования терминов, а также их координации и упорядочения, что позволит объединить синонимичные термины и сделать их единообразными, удобными и универсальными для использования.

Важно отметить, что стандарты КЭ используются в некоторых энергетических, транспортных или промышленных компаниях для определения влияния низкого качества электроэнергии на элемент системы и оборудование потребителей. В дополнение к имеющимся государственным стандартам, регламентирующим КЭ для всех отраслей народного хозяйства, некоторые компании разрабатывают свои внутренние, отраслевые стандарты, основываясь на своем собственном опыте. Применение специального стандарта Китая серии GB/T 24337, установленного исключительно для систем электроснабжения железнодорожного транспорта в Китае, является примером такого специализированного подхода, используемого при нормировании ПКЭ [14, 16].

На рис. 1 представлена структурная схема свойств и нормируемых показателей качества электрической энергии в точках передачи электрической энергии, принятая в мировой практике, составленная на основании произведенного анализа литературных источников [1–3, 6, 8, 9, 10–20].

Как следует из рис. 1, стандарты, применяемые в мировой практике и определяющие КЭ в точках её передачи потребителям электрических сетей общего назначения, регламентируют показатели по току, напряжению и частоте. В стандартах США, Австралии, Новой Зеландии, Индии и европейских стран качество тока оценивается и является предметом контроля [3, 6–8, 10–12, 16]. Однако в настоящее время в таких странах, как Россия, Беларусь, Молдова и других странах СНГ качество тока в точках передачи ЭЭ не оценивается, что отличает отечественную систему оценки КЭ от мировых стандартов [1–3, 19, 20]. В указанных странах имеется система стандартов, регламентирующая гармонические составляющие тока, ин-

жектируемые в низковольтные распределительные электрические сети, однако их применение не правомочно для оценки качества тока в точках передачи электрической энергии пользователям распределительных сетей.

Ввиду отсутствия требований по гармоническим составляющим тока в точках передачи ЭЭ пользователям электрических сетей в действующих отечественном ГОСТ 32144–2013 и группе европейских стандартов EN50160B для оценки гармонического состава кривых тока воспользуемся положениями действующего международного стандарта IEEE 519-2014 [21], где требования к гармоническим составляющим тока приведены для точек общего присоединения.

Искажение формы кривой тока или напряжения: краткие сведения

Искажения формы тока или напряжения в электрической сети являются общей проблемой всех элементов цепи электропитания – от источника до конечного потребителя, так как они снижают качество электрической энергии со всеми вытекающими из этого проблемами, описанными выше.

В зарубежной литературе приводятся сведения о шести основных типах искажений формы тока или напряжения: смещение постоянного тока (DC offset), высшие гармонические составляющие (harmonics), интергармоники (interharmonics), субгармоники (subharmonics), прерывание (notching) и шум (noise) [6, 7, 9, 11, 12, 22, 23].

Гармонические составляющие, включающие в себя высшие гармонические составляющие (ВГС), субгармоники и интергармоники являются теми «инструментами», при помощи которых общепринято описывать отклонения кривых тока и напряжения от синусоидальной формы. Все гармонические составляющие – это альтернативные компоненты рассматриваемой кривой (тока или напряжения), которые имеют частоты, отличные от основной частоты, и присутствуют в сигналах напряжения или тока.

Названия гармонических составляющих на русском и английском языках и их характеристики представлены в табл. 2. В российских ГОСТах

Таблица 2

Гармонические составляющие кривых тока и напряжения

Название гармонической составляющей (на англ. яз.)	Обозначение номера гармоники	Определение частоты гармонической составляющей		
		Частота	Расчетная формула	Пример расчета
Основная / первая гармоника (Fundamental)	1	f_1	$f_1 = f_{\text{ном сети}}$	В РФ: $f_1 \text{ РФ} = f_{\text{ном сети РФ}} = 50$; в США: $f_1 \text{ США} = f_{\text{ном сети США}} = 60$
Высшие гармонические составляющие (Harmonics)	n	$f_n > f_1$	$f_n = n f_1$	$f_3 = 3 \cdot 50 = 150$ (в РФ)
Субгармонические составляющие (Subharmonics)	h	$f_h < f_1$		$0,6 \cdot 50 = 30$ (в РФ)
Интергармонические составляющие (Interharmonics)	m	$f_m > n$, не целое кратное n		$3,5 \cdot 50 = 175$ (в РФ)

на КЭ в настоящее время отсутствует информация о расчетных методиках и нормах в отношении интергармонических и субгармонических составляющих кривых напряжения. В отечественном ГОСТ 32144–2013 п. 4.2.4.2. записано: «уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования, а допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении» [1]. Поэтому при составлении табл. 2 были использованы порядковые номера этих составляющих, рекомендованные иностранными стандартами IEC(МЭК) и IEEE [13, 21].

Порядковые номера высших гармонических составляющих в отечественном ГОСТ 32144–2013 обозначаются литерой «n», а в стандартах IEEE и IEC (МЭК) – литерой «h».

Нормы показателей качества тока

Действующие отечественные ГОСТы [1] и европейские стандарты на КЭ в точках передачи ЭЭ пользователям не содержат информации по нормированию гармонических искажений тока. Рекомендованные значения пределов гармонических искажений тока (Recommended Current Distortion Limits) упоминается в стандарте IEEE 519-2014 [21].

Ранее в отечественных ГОСТах на КЭ в точках общего присоединения была сделана попытка нормирования качества тока. Так, ещё в 1988 г. в ГОСТ 23875–88 было дано определение коэффициенту гармонических составляющих тока $K_{I_{(n)i}}$, %, который рассчитывался по формуле

$$K_{I_{(n)i}} = \frac{I_{(n)i}}{I_{1i}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $I_{(n)i}$ – действующее значение тока n -й гармоники для i -го наблюдения, А; I_{1i} – действующее значение тока основной частоты на i -м наблюдении, А.

Выражение (1) по своему физическому смыслу близко определению действующего стандарта IEEE 519-2014 [21] для точек общего присоединения: «Maximum harmonic current distortion in % of current at rated load», что на русский язык можно

перевести как «максимальное искажение гармонических составляющих тока от номинального тока нагрузки в процентах». Числовое значение максимального искажения гармонической составляющей понимается как предельное значение коэффициента гармонических составляющих тока (сокращенно – предел) и дается в упомянутом стандарте в табличной форме для четных и нечетных гармонических составляющих тока. Рекомендуемые стандартом IEEE 519-2014 [21] значения пределов искажений тока различаются в зависимости от номинального напряжения объекта исследования и соотношения токов в точке общего присоединения по выражению:

$$\frac{I_{SC}}{I_L}, \quad (2)$$

где I_{SC} – максимальный ток короткого замыкания в точке общего присоединения, А; I_L – максимальный потребляемый ток в этой точке, А.

Пределы гармонических искажений тока в стандарте IEEE 519-2014 [21] приведены в табличной форме в зависимости от напряжения рассматриваемой системы электроснабжения и включают три диапазона: 1) от 120 В до 69 кВ; 2) от 69 кВ до 161 кВ; 3) свыше 161 кВ. Таблицы приводятся для нечетных гармоник, а в отношении четных сделано пояснение, что их нормируемые значения на 25 % выше, чем для нечетных гармоник.

В таблице также приводится нормируемое значение коэффициента TDD (Total Demand Distortion), которое определяется как корень квадратный из суммы квадратов n -х гармонических составляющих тока $I_{(n)i}$, отнесенный к максимальному потребляемому току в этой точке I_L .

Приведем пример оценки качества тока на исследуемом объекте, взяв за основу формулы (1) и (2), а также нормируемые значения стандарта IEEE 519-2014 [21], приведенные в табл. 3.

Пример расчёта показателей качества тока для городских подстанций

В 2019 г. при проведении энергоаудита в целях разработки мер по повышению энергоэффективности производства на МУП «Горводоканал» г. Хабаровска была проведена комплексная оценка

Таблица 3

Пределы гармонических составляющих кривых тока нелинейной нагрузки в точке общего присоединения для напряжения 120–69 000 В по IEEE 519-2014

Максимальное искажение в % от тока при номинальной нагрузке, нечетные гармонические составляющие тока						
I_{SC}/I_L	< 11	11 < 17	17 < 23	23 < 35	35	TDD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	< 5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

КЭ на предмет соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 32144–2013 [1]. Измерения ПКЭ в точках передачи ЭЭ потребителям распределительных сетей 0,4 кВ проводились сертифицированным измерителем марки «Ресурс-UF2М» в соответствии с требованиями действующих ГОСТ 30804.4.30 и ГОСТ 30804.4.7 (что идентично стандартам IEC 61000-4-7, IEC 61000-4 и IEEE 519-2014).

Замеры проводились на 37 объектах городского водоканала, большинство потребителей которых составили насосные и канализационные станции. Насосная станция предназначена для поддержания давления в магистральном трубопроводе тепловой сети. Характерной особенностью работы насосной станции является наличие такого способа регулирования давления в сети водоснабжения города, который подразумевает сочетание ступенчатого регулирования и применения преобразователя частоты. Ступенчатое регулирование подразумевает запуск насосного агрегата при недостаточном значении давления в магистрали сети. Плавное регулирование давления обеспечивается за счет изменения частоты вращения рабочего колеса при изменении частоты электродвигателя насоса.

На рассматриваемой в качестве примера насосной станции СНС2 установлен преобразователь частоты VAT3FDV-ATC производства GENERAL ELECTRIC. Привод каждого насоса из этой группы может быть подключены в схему с преобразователем частоты, для подключения насоса из регулирующей группы используется устройство плавного пуска, до этого момента автоматически открываются задвижки. Преобразователи частоты находят применение на многих объектах, где тре-

буется плавное изменение частоты вращения асинхронного двигателя (электропривод транспортеров, вентиляторов, насосов и пр.). Наиболее широкое применение в современных частотно-регулируемых приводах нашли преобразователи со звеном постоянного тока, которые являются мощными источниками гармонических составляющих. По свидетельству ряда источников [24–30], в ряде случаев их совокупный уровень значительно превосходит уровень искажений, создаваемый другими преобразователями, однако ряд других серьезных преимуществ этих преобразователей обеспечивает их доминирующую роль в современном промышленном и транспортном электроприводе.

Далее, следуя методике расчета, изложенной в IEEE 519-2014 [21], было рассчитано значение трехфазного тока короткого замыкания для рассматриваемой системы с удаленным источником питания, которое составило 5,0 кА. Значение максимального потребляемого тока в исследуемой точке за время проведения измерений составило 200,6 А.

По формуле (2) найдем соотношение

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{5000}{200,6} = 24,925.$$

Таким образом, сравнивать измеренные значения гармонических составляющих тока в нашем случае следует со значениями, указанными для строки (20 < 50) табл. 3 из IEEE 519-2014 [27].

Произведем сравнение измеренных значений коэффициентов гармонических составляющих тока с нормируемыми по [21] значениями и представим результаты в виде табл. 4. Выделим жирным шрифтом те значения, которые превышают нормируемые по [21] значения.

Таблица 4

Проверка качества тока на соответствие требованиям стандарта IEEE 519-2014

Значения коэффициента гармонических составляющих $K_{I(n)}$				
Номер ВГС тока, n	Нормируемое значение по IEEE 519-2014	Фаза А	Фаза В	Фаза С
2	1,750	0,491	0,514	0,588
3	7,000	15,998	11,812	9,435
4	1,750	0,295	0,336	0,345
5	7,000	29,713	33,866	32,533
6	1,750	0,205	0,257	0,170
7	7,000	19,074	20,055	19,119
8	1,750	0,160	0,150	0,192
9	7,000	2,127	2,998	2,582
10	0,875	0,089	0,102	0,137
11	3,500	4,290	5,357	5,798
12	0,875	0,060	0,102	0,089
13	3,500	3,803	3,757	3,611
14	0,875	0,045	0,069	0,067
15	3,500	1,553	1,362	1,119
16	0,625	0,041	0,059	0,062
17	2,500	1,831	2,264	2,438
18	0,625	0,034	0,049	0,041

Значения коэффициента гармонических составляющих $K_{I(n)}$				
Номер ВГС тока, n	Нормируемое значение по IEEE 519-2014	Фаза А	Фаза В	Фаза С
19	2,500	1,763	1,775	1,778
20	0,625	0,042	0,045	0,049
21	2,500	1,012	1,125	0,856
22	0,250	0,032	0,044	0,055
23	1,000	1,091	1,441	1,766
24	0,250	0,030	0,035	0,038
25	1,000	1,241	1,211	1,167
26	0,250	0,039	0,050	0,033
27	1,000	0,718	0,958	0,625
28	0,250	0,027	0,040	0,036
29	1,000	0,880	1,158	1,374
30	0,250	0,030	0,050	0,029
31	1,000	0,749	0,834	0,669
32	0,250	0,034	0,045	0,033
33	1,000	0,572	0,715	0,481
34	0,125	0,029	0,036	0,037
35	0,500	0,564	0,803	1,025
36	0,125	0,044	0,043	0,036
37	0,500	0,643	0,676	0,578
38	0,125	0,022	0,027	0,046
39	0,500	0,483	0,602	0,408
40	0,125	0,035	0,049	0,054

В ходе сравнения результатов измерений коэффициентов гармонических составляющих тока с допустимыми значениями по IEEE 519-2014 было выявлено, что 25,6 % значений из приведенных в табл. 4 (30 значений из 117) не соответствуют требованиям [21], что свидетельствует о неудовлетворительной ситуации по качеству тока на рассматриваемом объекте. Расчетные значения коэффициентов TDD для фазного тока согласно табл. 4 составили:

- фаза А: $I_{A\ TDD} = 19,67\ %$;
- фаза В: $I_{B\ TDD} = 20,92\ %$;
- фаза С: $I_{C\ TDD} = 19,86\ %$.

Таким образом, в рассматриваемом примере значения TDD для каждой фазы значительно превышают норму, указанную в табл. 3 ($TDD_{норм} = 8\ %$), следовательно, качество тока в исследуемой точке не соответствует требованиям IEEE 519-2014 [21].

На рис. 2 и 3 приведены результаты оценки качества тока для двух других объектов городского водоснабжения, где значения коэффициентов гармонических составляющих тока, превышающие рекомендованные по [21] значения, представлены в виде диаграмм.

Обобщая результаты оценки качества тока, можно заключить, что в точках передачи электрической энергии потребителям распределительной сети для 80 % от общего количества всех обследованных объектов городского водоканала качество тока не отвечает значениям, рекомендованным стандартом IEEE 519-2014 [21]. Превышение рекомендуемых значений наблюдается как по отдельным гармоническим составляющим, так и по результирующему, суммарному коэффициенту искажения гармонических составляющих тока.

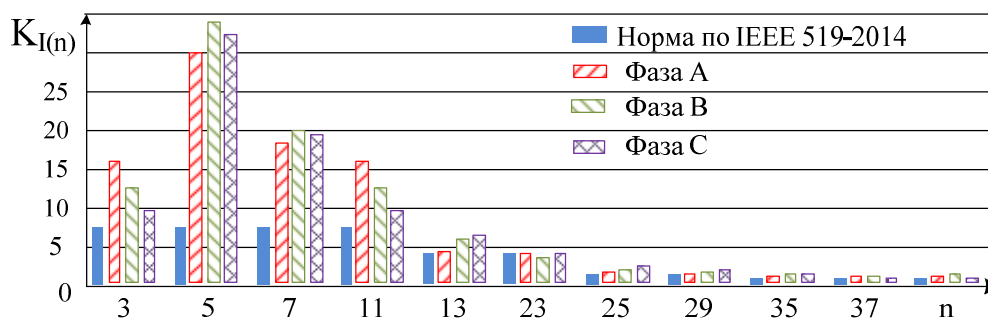


Рис. 2. Гармонический состав тока насосной станции

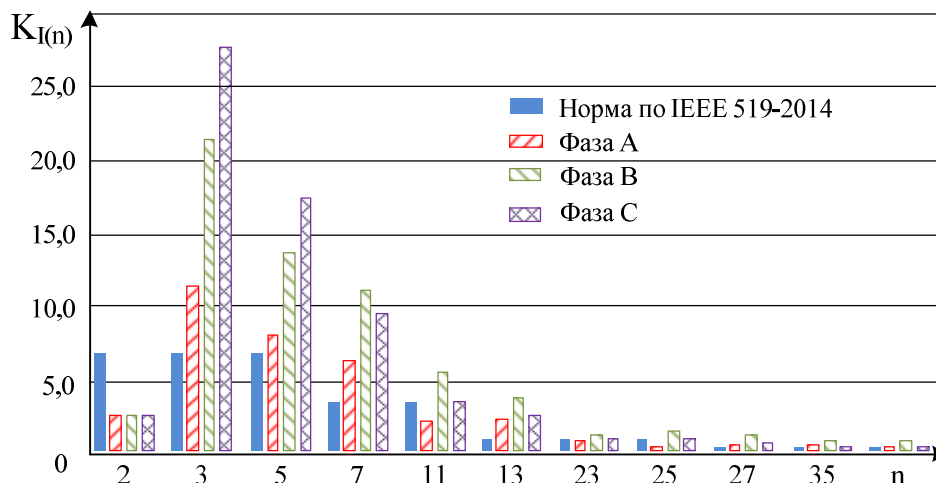


Рис. 3. Гармонический состав тока канализационной станции

Заключение

В результате произведенных исследований можно заключить следующее:

- произведены анализ отечественных и зарубежных нормативных документов в области КЭ для точек передачи электроэнергии пользователям электрических сетей, систематизирована и дана в виде структурной схемы структура свойств и нормируемых показателей качества электрической энергии в точках передачи электрической энергии, принятая в мировой практике и регламентируемая стандартами ИЕС, IEEE и отечественными ГОСТ;

- наряду с единством требований вышеуказанных стандартов к средствам и методикам измерений ПКЭ выявлены расхождения в терминологии, используемой различными странами в вопросах оценки КЭ;

- на основании натурных замеров КЭ на объектах ЖКХ в точках передачи электрической энергии потребителям распределительной сети 0,4 кВ выполнена оценка качества тока по IEEE 519-2014, отмечено значительное превышение рекомендованных по IEEE 519-2014 пределов гармонических составляющих тока для большинства исследуемых объектов ЖКХ;

- вопрос целесообразности использования в инженерных расчетах для оценки качества тока значений пределов гармонических искажений тока, рекомендованных в IEEE 519-2014, требует дальнейшего изучения, так как при натурных замерах ПКЭ на реальных объектах выявлены значительные превышения рекомендованных зарубежным стандартом IEEE 519-2014 значений.

Представляется целесообразным разработку отечественных нормативных значений допустимых пределов гармонических составляющих кривых тока в точках передачи электрической энергии, что облегчило бы производство инженерных расчетов в области энергосбережения и энергоэффективности;

- отсутствие в отечественной энергетике в течение длительного времени системы нормирования и оценки качества тока наряду с ростом количества и разнообразия нелинейных нагрузок в электрических сетях стали наиболее вероятными причинами неудовлетворительного состояния качества тока в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей общего назначения, что обостряет проблемы электромагнитной совместимости.

Авторы считают, что привлечение внимания к проблеме качества тока в электрических сетях РФ будет способствовать развитию более детальных и обширных исследований, направленных на изучение причин, экономическую оценку последствий и, главное, на разработку отечественных норм и стандартов показателей качества тока. Такой комплексный подход позволит ускорить разработку и внедрение столь необходимых мероприятий по корректировке гармонического спектра тока в точках передачи электрической энергии, что позволит повысить эффективность управления качеством электрической энергии в системах электроснабжения различных объектов и систем – от жилищно-коммунального хозяйства до транспорта и промышленности.

Литература

1. 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. – 39 с.

2. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2017. – 347 с.

3. Макашева, С.И. *Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: моногр.* / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. – 104 с.
4. Коверникова, Л.И. *Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем* / Л.И. Коверникова, А.В. Серков, Р.Г. Шамонов // *Энергетическая политика*. – 2018. – № 1. – С. 75–85.
5. Кононенко, В.Ю. *Задачи научно-технической политики в области качества электроэнергии на современном этапе формирования цифровой экономики РФ* / В.Ю. Кононенко, А.С. Мурачев, Д.О. Смоленцев // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2018. – № 2 (47). – С. 28–31.
6. Eberhard, A. *Power Quality: Monograph*, InTech Publ., Rijeka, Croatia. – 2011. – P. 3–24.
7. Ignatova, V. *Simple Indicators for an Effective Power Quality Monitoring and Analysis* / V. Ignatova, D. Villard, J.-M. Hypolite // *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. – 2015. – P. 1104–1108. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165321
8. Alsayyed, B. *Review of Power Quality Monitoring Systems* / B. Alsayyed, H. El-Sheikh, A. Fadoun // *IEOM 2015 – 5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Proceeding*. – 2015. DOI: 10.1109/IEOM.2015.7093825
9. Bollen, M.H.J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions* / M.H.J. Bollen // *Wiley-IEEE Press*. – 2000. – P. 1–34.
10. *Nationwide Real-Time Monitoring System for Electrical Quantities and Power Quality of the Electricity Transmission System* / T. Demirci et al. // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2011. – Vol. 5, no. 5. – P. 540–550. DOI: 10.1049/iet-gtd.2010.0483
11. *Power Quality Techniques Research Worldwide: A Review* / F. Manzano-Agugliaro, M. Montoya, A. García-Cruz, F. Montoya // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.091
12. McGranaghan, M.F. *Challenges and Trends in Analysis of Electric Power Quality Measurement Data* / M.F. McGranaghan, S. Santoso // *EURASIP J. Adv. Signal Process.* – 200. – 057985. DOI: 10.1155/2007/57985
13. *BS EN 50160:2000. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*. – <https://ru.scribd.com/document/371321677/BS-EN-50160-2000> (дата обращения: 25.04.2020).
14. *Chinese Standard. GB; GB/T; GBT; JB; JB/T; YY; HJ; NB; HG; QC; SL; SN; SH; JF; JJG; CJ; TB; YD; YS; NY; FZ; JG; QB; SJ; SY; DL; AQ; CB; GY; JC; JR; JT: Product catalog – China National Standards & Industry Standards. February 2020*. – www.Chinesestandard.net (дата обращения: 25.04.2020).
15. Савина, Н.В., *Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы* / Н.В. Савина, Н.С. Бодруг // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2016. – № 5–6. – С. 19–26.
16. Bhuvaneshwari, G. *Survey of Power Quality Standards and Regulations in India and Abroad* / G. Bhuvaneshwari, B. Singh // *APQI Survey*. – 2011. – P. 13. – <http://www.apqi.org> (дата обращения: 12.04.2020).
17. *The Evolution of Power Quality in Eskom, the Past, the Present and the Future* / B. Peterson, U. Minnaar, R. Koch et al. // *7th Southern Africa Regional Conference, Somerset West*. – 2013. – https://www.researchgate.net/publication/281741345_The_evolution_of_Power_Quality_in_Eskom_the_Past_the_Present_and_the_Future (дата обращения: 10.04.2020).
18. *Mitigation of Power Quality Problems in PMSG-based Power Generation System Using Quasi-Newton-Based Algorithm* / A.K. Giri, S.R. Arya, R. Maurya, B.C. Babu // *Int. Transactions on Electrical Energy System*. – 2019. – Vol. 29, iss. 11. DOI: 10.1002/2050-7038.12102
19. Бушуева, О.А. *Анализ зарубежных и отечественных стандартов на качество электроэнергии* / О.А. Бушуева, Н.С. Иванова, Н.Н. Ковалева // *Промышленная энергетика*. – 2019. – № 3. – С. 38–45.
20. Белицын, И.В. *Проблемы контроля и анализа показателей качества электрической энергии и способы их решения* / И.В. Белицын, Д.В. Рысев // *Омский научный вестник*. – 2017. – № 6 (156). – С. 53–57.
21. *IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems* // *IEEE P519.1/D12*. – 2012. – P. 1–124. – https://standards.ieee.org/project/519_1.html (дата обращения: 25.04.2020).
22. *Harmonic Effects of Power System Loads: An Experimental Study* / C. Kocatepe et al. – 2012. – <https://www.intechopen.com/books/power-quality-issues/harmonic-effects-of-power-system-loads-an-experimental-study> (дата обращения: 15.04.2020). DOI: 10.5772/53108
23. *Critical PQ Phenomena and Sources of PQ Disturbances in PE Rich Power Systems*. – 2018. – <https://www.h2020-migrate.eu/> (дата обращения: 20.04.2020).
24. Савина, Н.В. *Разработка модели электрической сети для управления качеством электрической энергии* / Н.В. Савина, Н.С. Бодруг // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 23–31. DOI: 10.14529/power160403
25. *Экспериментальное исследование влияния электроприемников частного жилого фонда сельской местности на уровень искажения синусоидальности напряжения и тока в сети 0,38 кВ* / П.В. Терентьев, Д.А. Филатов, М.В. Чесноков, А.А. Кораблев // *Инженерный вестник Дона*. – 2020. – № 1 (61). – С. 12.

26. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков, А.Р. Мамаев, С.Г. Терлецкий // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 3 (88). – С. 11–20. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-11-20

27. Макашѐва, С.И. Автоматизированная система мониторинга как инструмент бережливого производства системы тягового электроснабжения / С.И. Макашева // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 52–55. DOI: 10.3103/S1068371216020139

28. Костинский, С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока бытовых электроприемников, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения / С.С. Костинский // Промышленная энергетика. – 2018. – № 8. – С. 29–39.

29. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения / Д.Ю. Руди, А.И. Антонов, М.Г. Вишнягов и др. // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125

30. Intermittent Current Unsymmetry in an Electric Grid and its Assessment for Busbars of Traction Substations / M.A. Silaev, V.N. Tulskaa, S. Palis et al. // Russ. Electr. Engin. – 2019. – Vol. 90, no. 1. – P. 66–72. DOI: 10.3103/S1068371219010140

Макашева Светлана Игоревна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; smakasheva@gmail.com.

Пинчуков Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», директор Электроэнергетического института, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; pinchukov-pavel@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/power200403

CURRENT QUALITY: ASSESSMENT AND STANDARDIZATION ASPECTS

S.I. Makasheva, smakasheva@gmail.com,

P.S. Pinchukov, pinchukov-pavel@mail.ru

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation

Power quality issues concern absolutely all spheres of human activity, from household to economy and transportation. Standardization, monitoring, management, and coordination to ensure electromagnetic compatibility in the power supply system are the subject of constantly ongoing research in most countries. In order to attract attention to issues of the harmonic current, this study focused on the harmonic current distortions observed on the level of urban electricity users. The paper considers the aspects of consolidating terminology and structure of power quality indicators. We carefully reviewed the current and voltage waveform distortions and related harmonic components. We also summed up the power quality indicators currently used around the world as a flowchart. Based on the results of measurements of quality indicators at the existing urban infrastructure facilities, a comparative analysis with the IEEE 519-2014 standard requirements was performed. As a result of the field measurements analysis, an unsatisfactory situation in terms of harmonic current distortions was revealed; the most probable causes and consequences of poor current quality are described.

Keywords: electromagnetic compatibility, power quality indices (PQI), power quality (PQ), monitoring, standard, IEEE 519, waveform distortion.

References

1. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost` tehnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 39 p.

2. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Hamonov R.G., Sharov Yu.V., Nasyrov R.R. *Upravlenie kachestvom elektroenergii: uchebnoe posobie* [Power Quality Management]. Moscow, MPEI Publishing House, 2017. 347 p.
3. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. *Kachestvo elektricheskoy energii: monitoring, prognoz, upravlenie: monografiya* [Power Quality: Monitoring, Forecast, Management: Monograph]. Khabarovsk, FESTU Publ., 2020. 104 p.
4. Kovernikova L.I., Serkov A.V., Shamonov R.G. [About Power Quality Management in Russia in the Past, Present and Future]. *Energeticheskaya politika* [Electrical policy], 2018, no. 1, pp. 75–85. (in Russ.)
5. Kononenko V.Yu., Murachev A.S., Smolencev D.O. [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. (in Russ.)
6. Eberhard A. *Power Quality: Monograph*, InTech Publ., Rijeka, Croatia, 2011, pp. 3–24.
7. Ignatova V., Villard D., Hypolite J.-M. Simple Indicators for an Effective Power Quality Monitoring and Analysis. *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 1104–1108. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165321
8. Alsayyed B., El-Sheikh H., Fadoun A. Review of Power Quality Monitoring Systems. *IEOM 2015 – 5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Proceeding*, 2015. DOI: 10.1109/IEOM.2015.7093825
9. Bollen M.H.J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. *Wiley-IEEE Press*, 2000, pp. 1–34.
10. Demirci T. et al. Nationwide Real-Time Monitoring System for Electrical Quantities and Power Quality of the Electricity Transmission System. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 540–550. DOI: 10.1049/iet-gtd.2010.0483
11. Manzano-Agugliaro F., Montoya M., García-Cruz A., Montoya F. *Power Quality Techniques Research Worldwide: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.091
12. McGranaghan M.F., Santoso S. Challenges and Trends in Analyses of Electric Power Quality Measurement Data. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 2007, 057985. DOI: 10.1155/2007/57985
13. BS EN 50160:2000. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems. Available at: <https://ru.scribd.com/document/371321677/BS-EN-50160-2000> (accessed 25.04.2020).
14. *Chinese Standard. GB; GB/T; GBT; JB; JB/T; YY; HJ; NB; HG; QC; SL; SN; SH; JFF; JJG; CJ; TB; YD; YS; NY; FZ; JG; QB; SJ; SY; DL; AQ; CB; GY; JC; JR; JT: Product catalog – China National Standards & Industry Standards*. February 2020. Available at: www.Chinesestandard.net (accessed 25.04.2020).
15. Savina N.V., Bodrug N.S. [The Problem of Normalizing Electrical Energy Quality While Transferring to Intellectual Electrical Energy Systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2016, no. 5–6, pp. 19–26. (in Russ.)
16. Bhuvaneshwari G., Singh B. Survey of Power Quality Standards and Regulations in India and Abroad. *APQI Survey*, 2011, p. 13. Available at: <http://www.apqi.org> (accessed 12.04.2020).
17. Peterson B., Minnaar U., Koch R., Mostert H., Ragoonanthun R. The Evolution of Power Quality in Eskom, the Past, the Present and the Future. *7th Southern Africa Regional Conference, Somerset West*, 2013. Available at: https://www.researchgate.net/publication/281741345_The_evolution_of_Power_Quality_in_Eskom_the_Past_the_Present_and_the_Future (accessed 10.04.2020).
18. Giri A.K., Arya S.R., Maurya R., Babu B.C. Mitigation of Power Quality Problems in PMSG-based Power Generation System Using Quasi-Newton-Based Algorithm. *Int. Transactions on Electrical Energy System*, 2019, vol. 29, iss. 11. DOI: 10.1002/2050-7038.12102
19. Bushueva O.A., Ivanova N.S., Kovaleva N.N. [Analysis of Foreign and Domestic Power Quality Standards]. *Industrial Power Engineering*, 2019, no. 3, pp. 38–45. (in Russ.)
20. Belicyn I.V., Rysev D.V. [Problems of Control and Analysis of Power Quality Indicators and Ways to Solve Them]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, no. 6 (156), pp. 53–57. (in Russ.)
21. *IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems*. IEEE P519.1/D12, July 2012, pp. 1–124. Available at: https://standards.ieee.org/project/519_1.html (accessed 25.04.2020).
22. Kocatepe C. et al. *Harmonic Effects of Power System Loads: An Experimental Study*, 2012. Available at: <https://www.intechopen.com/books/power-quality-issues/harmonic-effects-of-power-system-loads-an-experimental-study> (accessed 15.04.2020). DOI: 10.5772/53108
23. *Critical PQ phenomena and sources of PQ disturbances in PE rich power systems*, 2018. Available at: <https://www.h2020-migrate.eu/> (accessed 20.04.2020).
24. Savina N.V., Bodrug N.S. Development of Electrical Network Model for Control of Power Quality. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 23–31. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160403

25. Terent'ev P.V., Filatov D.A., Chesnokov M.V., Korablev A.A. [Experimental Study of the Influence of Electric Receivers of a Private Housing Stock in Rural Areas on the Level of Distortion of the Sinusoidal Voltage and Current in the Network of 0.38 kV]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don's Engineering Bulletin], 2020, no. 1 (61), 12 p. (in Russ.)
26. Makasheva S., Pinchukov P., Mamaev A., Terleckiy S. Estimate of voltage quality on traction substation buses of 27.5 kV with longitudinal capacitive compensation device. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2020, pp. 11–20. Available at: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-11-20> (accessed 25.04.2020).
27. Makasheva S.I. An automated monitoring system as an instrument of lean production of a traction power supply system. *Russ. Electr. Engin.*, 2016, vol. 87, no. 2, pp. 107–109. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1068371216020139> (accessed 25.04.2020).
28. Kostinskiy S.S. [Review and Results of Studies of the Harmonic Current Composition of Household Electric Receivers, as well as Methods and Devices for Reducing their Negative Impact on Power Supply Systems]. *Industrial Power Engineering*, 2018, no. 8, pp. 29–39. (in Russ.)
29. Rudi D.Yu., Antonov A.I., Vishnyagov M.G., Gorelov S.V., Zubanov D.A., Ruppel' A.A., Ruppel' E.Yu. [Research of Higher Harmonics in Low-Voltage Electrical Networks]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 6 (162), pp. 119–125. (in Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125
30. Silaev M.A., Tulsii V.N., Palis S., Kartashev I.I., Dvorkin D.V. Intermittent current unsymmetry in an electric grid and its assessment for busbars of traction substations. *Russ. Electr. Engin.*, 2019, vol. 90, no. 1, pp. 66–72. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1068371219010140> (accessed 25.04.2020).

Received 11 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Макашева, С.И. Качество тока: аспекты оценки и нормирования / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 23–35. DOI: 10.14529/power200403

FOR CITATION

Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Current Quality: Assessment and Standardization Aspects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 23–35. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200403
