

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.311.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154



ВКЛАД ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТОЧКЕ ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Дзюба М.А., Сафонов В.И.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Определение фактического вклада потребителя в ухудшение качества электрической энергии важно для определения мест установки и параметров оборудования для улучшения качества электроэнергии в конкретной точке общего присоединения. Для определения наиболее целесообразного места установки фильтров высших гармоник проведено экспериментальное исследование взаимного влияния электрической сети 220 кВ и дуговых сталеплавильных печей металлургического предприятия на качество электроэнергии на одной из понизительных подстанций и на ее шинах 35 кВ. **Используемые методы.** В эксперименте приборами «Ресурс UF2М» и «Энерготестер ПКЭ-А» регистрировались фазные токи, напряжения и мощности, а также коэффициенты гармоник на низком и высоком напряжении трансформатора ТДЦНМ-100000/160000/220-У. **Результаты.** На основании исследования оценен вклад питающей сети и электроприемников предприятия в несинусоидальность напряжения и восстановлена схема замещения рассматриваемой системы для k -й гармоники. Обосновано, что проведение исследований качества электроэнергии в широком диапазоне нагрузок предприятия является очень важным при принятии любого решения по установке оборудования для улучшения качества электроэнергии. Показано, что в рассмотренном случае установка фильтров высших гармоник на секциях шин 35 кВ недостаточно эффективна для улучшения качества электроэнергии на секциях шин 220 кВ. **Практическая значимость.** Сделанный вывод противоречит существующим рекомендациям в «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей» пункт 3.2.17 об обязательной установке фильтрокомпенсирующих устройств и запрете работы дуговых сталеплавильных печей без них. Обсуждаются причины возникших противоречий и необходимость корректировки нормативной базы для предотвращения неэффективного использования ресурсов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, сети высокого напряжения, дуговые сталеплавильные печи, фильтрокомпенсирующие устройства

© Дзюба М.А., Сафонов В.И., 2022

Для цитирования

Дзюба М.А., Сафонов В.И. Вклад питающей сети и промышленного предприятия в качество электроэнергии в точке поставки электроэнергии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 147-154. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

CONTRIBUTION OF A SUPPLY NETWORK AND AN INDUSTRIAL SITE TO THE ELECTRIC POWER QUALITY AT THE POINT OF DELIVERY

Dziuba M.A., Safonov V.I.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Relevance and Objectives. It is important to determine how consumers actually affect the quality of electric power in order to decide where equipment should be installed for power quality optimization, as well as the parameters of such equipment. To determine the most appropriate place for installing higher harmonic filters, an experimental study was carried out to understand the mutual effect of a 220 kV power grid and electric arc furnaces of a steel plant on the electric power quality at one of the step-down stations and on its 35 kV buses. **Methods Applied.** The experiment relied on *Resurs UF2M* and *Energotester ПКЭ-А* meters that registered phase currents, voltages and powers, as well as low and high voltage harmonic factors at the transformer *ТДЦНМ-100000/160000/220-У*. **Findings.** The results of the study helped analyze how much the supply mains and the plant consumers contributed to the voltage non-sinusoidality. They also helped restore the equivalent circuit of the considered system for k harmonic. The authors reason why it is crucial to conduct studies on power quality within a wide range of loads before deciding on the installation of optimization equipment. It is showed that in the considered case the higher harmonic filters installed on the 35 kV buses failed to deliver the required optimization of the 220 kV bus power quality. **Practical Relevance.** The conclusion drawn contradicts Item 3.2.17 of the Code for Consumer Electrical Installations that stipulates that filter compensating devices must be used and that electric arc furnaces cannot be operated without them. The paper discusses why the above discrepancy occurred and the fact that it would be necessary to review the applicable regulations in order to optimize the utilization of resources.

Keywords: electric power quality, voltage non-sinusoidality, high-voltage grids, electric arc furnaces, filter compensating devices

For citation

Dziuba M.A., Safonov V.I. Contribution of a Supply Network and an Industrial Site to the Electric Power Quality at the Point of Delivery. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 147-154. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154>

Введение

Улучшение качества электрической энергии – это один из ключевых вопросов энерго- и ресурсосбережения на промышленных предприятиях [1]. Этому вопросу посвящено большое количество исследований по методике определения параметров качества и проведению необходимых измерений [2-5]. Несмотря на наличие нормативных документов по качеству электроэнергии [6], вопрос продолжает активно обсуждаться.

Один из наиболее дискуссионных вопросов, связанных с качеством электроэнергии, – это определение фактического вклада каждого источника (потребителя) в качество электроэнергии в конкретной точке общего подключения. Метод отключения потребителя [7] несомненно дает точный результат, но достаточно трудоемок и не всегда реализуем особенно для предприятий металлургии, имеющих непрерывный график производства. Метод баланса вторичных мощностей [8] позволяет не отключать потребителей,

но, как показали дальнейшие исследования [9], дает хорошую точность только когда вклад одного из потребителей существенно больше остальных. Наибольшую популярность получил метод оценки влияния потребителей на качество электроэнергии по мощности потребителей [10-12]. Эти исследования легли в основу рекомендаций [13], применяемых в РФ для анализа причин ухудшения качества электроэнергии в точке общего присоединения.

Вклад потребителей и электрической сети в ухудшение качества электроэнергии в точке присоединения к сети является предметом давнего спора между энергетиками предприятий и представителями электросетевых компаний. В п. 3.2.17 «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» [14] сказано, что «работа дуговых печей без фильтрокомпенсирующих устройств не допускается». Таким образом, всю вину за ухудшение качества возлагают на предприятие, имеющее характерные электроприемники, без проведения исследова-

ний реальной ситуации с качеством электроэнергии. Результатом этого является требование установки фильтров высших гармоник на шинах 35 (10) кВ таких предприятий.

Однако данное достаточно дорогостоящее мероприятие может не дать эффекта, если существенный вклад в ухудшение качества электроэнергии в точке разграничения балансовой принадлежности вносит питающая сеть. Поэтому перед установкой такого оборудования должен проводиться детальный анализ источников высших гармоник напряжения. В данной работе обсуждается методика и результаты такого исследования на примере металлургического предприятия.

Материалы и методы исследования

Схема исследуемого участка электрической сети, состоящая из трансформатора ТДЦНМ-100000/160000/220-У, секций шин 35 кВ и подключенных к ним дуговых сталеплавильных печей, показана на рис. 1.

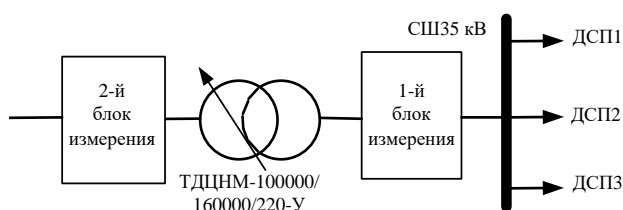


Рис. 1. Схема участка электрической сети
Fig. 1. Diagram of a power grid section

На схеме показаны места установки измерительных приборов «Ресурс UF2М» и «Энерготестер ПКЭ-А». Приборы позволяли измерять стандартные величины (фазное и линейное напряжение, фазный ток, активную и реактивную мощность каждой фазы и т.д.) и основные показатели качества электрической энергии (коэффициенты гармоник, коэффициенты несимметрии и т.д.). Измерения проводились с интервалом 1 мин в течение суток на разных стадиях производственного процесса на металлургическом предприятии.

Полученные результаты и их обсуждение

Для экспериментального определения параметров электрической сети был проведен анализ нагрузочных характеристик на шинах 220 кВ. Зависимости напряжения нагрузки от тока нагрузки показаны на рис. 2 после усреднения по фазам.

Из графика на рис. 2 видно, что во время наблюдения состояние системы изменялось, и все экспериментальные точки можно объединить в три группы (режим 1 – черные точки, режим 2 – серые точки, режим 3 – бледно-серые точки). Анализ временных зависимостей подтверждает, что изменения параметров сети происходят в определенные моменты времени, а не хаотичным образом и, следовательно, эти изменения связаны с переключениями в сети.

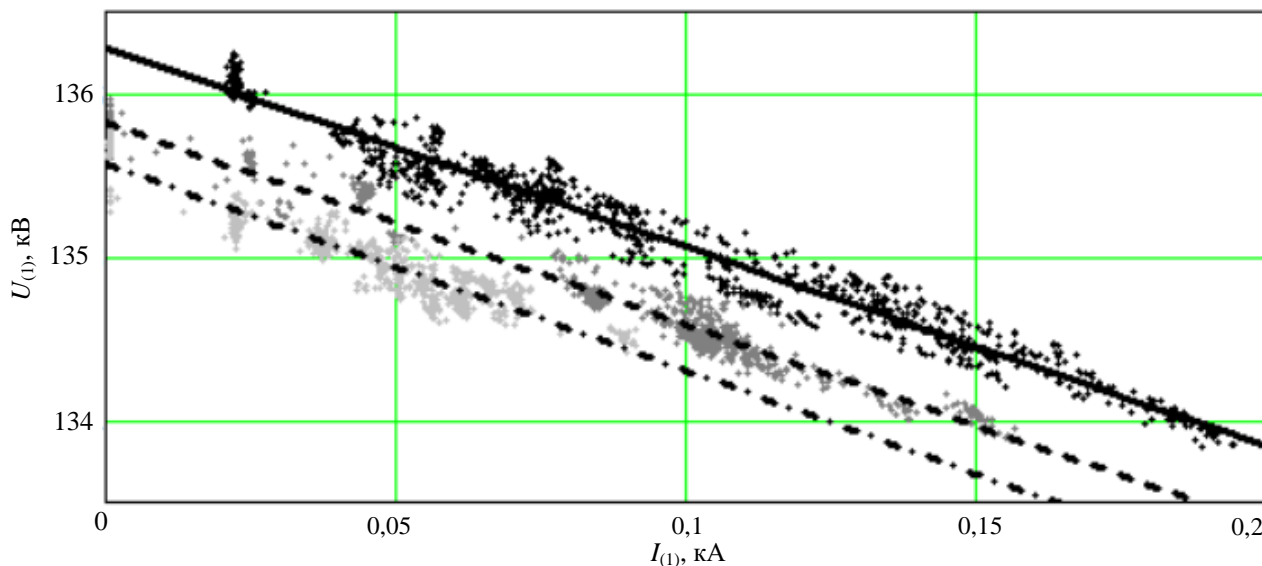


Рис. 2. Зависимость напряжения от тока 1-й гармоники на шинах 220 кВ: экспериментальные данные (точки) и аппроксимационные зависимости (линии)
Fig. 2. Voltage versus 1st harmonic current on 220 kV buses: Experimental data (points) and approximation dependences (lines)

Аппроксимация данных для каждого из состояний сети была выполнена в виде

$$U_{(1)} = E_{(1)} - X_{(1)} I_{(1)},$$

где $U_{(1)}$, $I_{(1)}$ – напряжение и ток в точке измерения; $E_{(1)}$, $X_{(1)}$ – ЭДС и внутреннее индуктивное сопротивление сети (индекс в скобках обозначает номер гармоники).

Параметры $E_{(1)}$ и $X_{(1)}$ были определены методом наименьших квадратов для каждого из состояний сети для шин 220 кВ (прибор 1 на **рис. 1**) и 35 кВ (прибор 2 на **рис. 1**) и приведены в **табл. 1**. Для удобства сравнения параметры для шин 220 кВ приведены к напряжению 35 кВ. Аппроксимационные зависимости для 220 кВ показаны на **рис. 1** (сплошная линия – режим 1, пунктир – режим 2, штрих-пунктир – режим 3).

Таблица 1. Параметры электрической сети
Table 1. Power grid parameters

Шины, кВ	Режим сети	$E_{(1)}$, кВ	$X_{(1)}$, Ом
220	1	22,213	0,325
220	2	22,139	0,329
220	3	22,097	0,336
35	1	22,342	1,8
35	2	22,244	1,81
35	3	22,183	1,653

Из **табл. 1** видно, что при переходе от шин 220 кВ трансформатора к шинам 35 кВ относительное сопротивление сети увеличилось в 5,5 раза, что соответствует добавлению сопротивления трансформатора.

Целью эксперимента было определение источников высших гармоник в рассматриваемой системе и оценка степени влияния каждого из источников: дуговых сталеплавильных печей и электрической сети. Анализ экспериментальных данных показал, что на шинах 35 и 220 кВ наибольшие значения имеют токи и напряжения 2, 3, 4 и 5-й гармоник. Поскольку для всех гармоник результаты качественно совпадают, то далее приведены результаты только для 5-й гармоники, вносящей наибольший вклад в несинусоидальность напряжения.

Зависимости напряжения 5-й гармоники от тока для шин 220 и 35 кВ показаны на **рис. 3** для 3-х режимов работы сети. Для шин 220 кВ результаты сразу приведены к напряжению 35 кВ для удобства дальнейшего анализа.

Кроме экспериментальных точек для трех состояний сети (аналогично **рис. 2** режим 1 – черные точки, режим 2 – серые точки, режим 3 – бледно-серые точки) на **рис. 3** показаны значения ЭДС сети (аналогично **рис. 2** сплошная линия – режим 1, пунктир – режим 2, штрих-пунктир – режим 3) и напряжение (точечная линия), создаваемое дуго-

выми сталеплавильными печами. ЭДС сети для 5-й гармоники было рассчитано как среднее значение для малых (менее 1 А) токов гармоник.

Для рассматриваемого случая схема замещения участка сети (см. **рис. 1**) для 220 кВ (при $X_{T(5)}=0$) и для 35 кВ для 5-й гармоники имеет вид, показанный на **рис. 4**. В нее входят: ЭДС сети $E_{c(5)}$; индуктивные сопротивления сети $X_{c(5)}$ и трансформатора $X_{T(5)}$; источник тока $J_{п(5)}$, моделирующий дуговые сталеплавильные печи. По схеме можно определить напряжения $U_{1(5)}$ в месте установки измерительного блока 1 и приведенное к 35 кВ напряжение $U_{2(5)}$ в месте установки измерительного блока 2.

Параметры $E_{c(5)}$, $X_{c(5)}$ или $X_{c(5)}+X_{T(5)}$ были определены для каждого из состояний сети для шин 220 и 35 кВ и приведены в **табл. 2**. Для удобства сравнения параметры для шин 220 кВ также приведены к напряжению 35 кВ.

От стандартной ситуации, рассматриваемой во многих учебниках [3], схема на **рис. 4** отличается наличием ЭДС сети. При этом из расчетов и **рис. 3** видно, что ЭДС сети не является малой поправкой по сравнению с остальными напряжениями. Из **рис. 3, а** видно, что на шинах 220 кВ основным источником 5-й гармоники является питающая сеть. На шинах 35 кВ вклад сети и нагрузки становится сравнимым при токах 5-й гармоники печей в 10-15 А, что соответствует мощности нагрузки около 10 МВт на фазу. Только при мощности нагрузки более 15 МВт на фазу можно говорить, что дуговые сталеплавильные печи формируют несинусоидальность напряжения на шинах 35 кВ. Однако такие состояния составляют только 4,7% от времени наблюдения. Измерения показали, что электрическая сеть и дуговые сталеплавильные печи могут ослаблять (черные точки на **рис. 3** для режима 1) или усиливать (серые точки на **рис. 3** для режима 2) действие друг друга.

Схемы с эквивалентными генераторами, заменяющими сеть и нагрузку, активно используются при анализе качества электроэнергии методом баланса вторичных мощностей [8, 9]. В рассматриваемом случае считалось, что нагрузку можно заменить идеальным источником тока. Измерения проводились на кабеле, соединяющем вторичные обмотки трансформатора и секции шин 35 кВ, поэтому влиянием линейной нагрузки предприятия (а следовательно, и ее проводимостью) можно пренебречь. Примерную ошибку, получаемую при пренебрежении проводимостью эквивалентного источника для нагрузки (см. **рис. 4**), можно оценить по изменению ЭДС сети для 35 и 220 кВ (приведенной к напряжению 35 кВ). Из **табл. 2** видно, что отличие этих величин составляет около 10%.

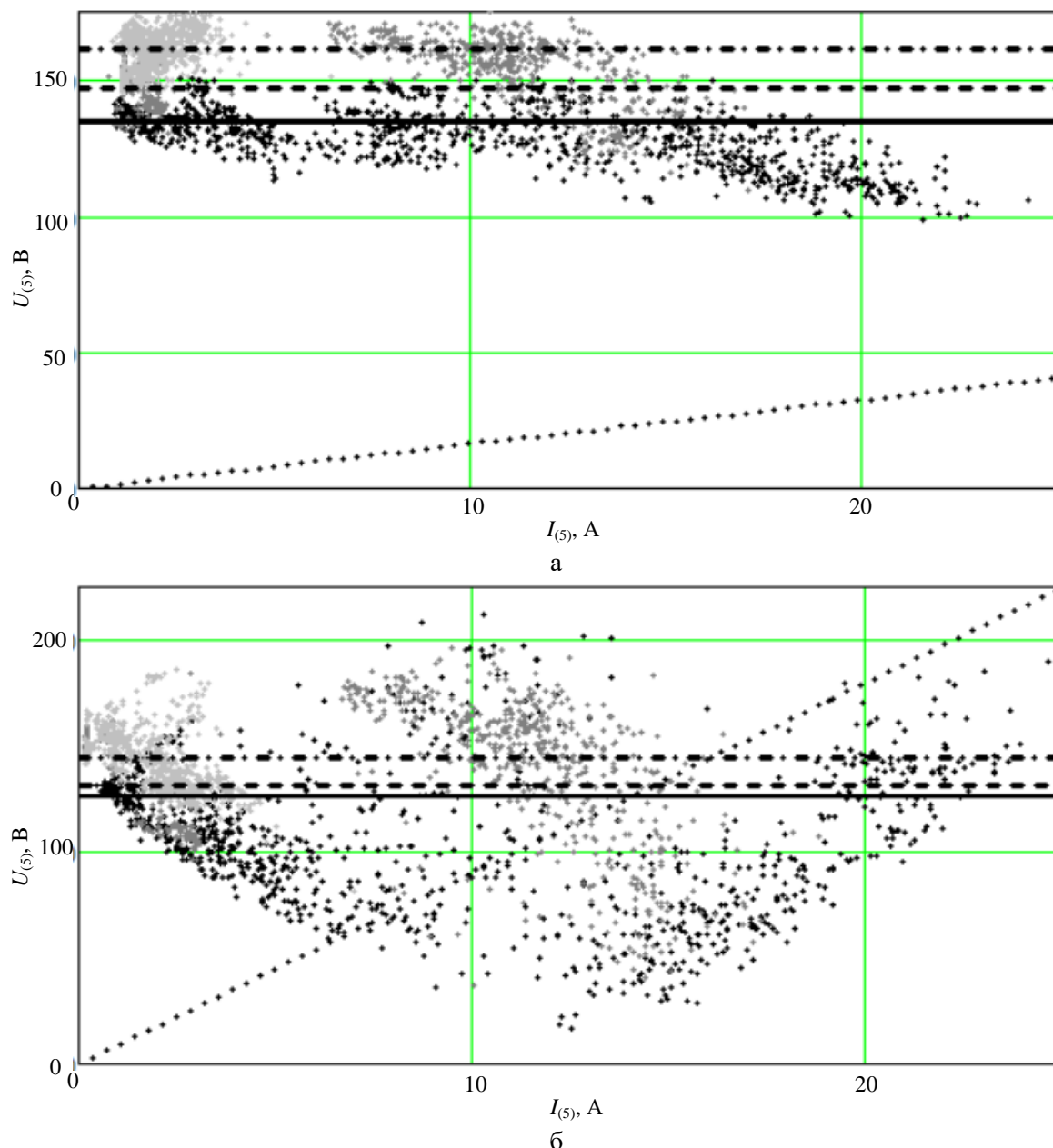


Рис. 3. Зависимость напряжения 5-й гармоники от тока для шин 220 кВ (а) и 35 кВ (б): экспериментальные данные (точки), ЭДС сети (линии) и вклад дуговых сталеплавильных печей (точечная линия)

Fig. 3. 5th harmonic voltage versus current for 220 kV (a) and 35 kV (b) buses: Experimental data (points), EMF of the grid (lines) and contribution of electric arc furnaces (dotted line)

Таблица 2. Параметры схемы замещения для 5-й гармоники

Table 2. 5th harmonic equivalent circuit parameters

Шины, кВ	Режим сети	$E_{c(5)}$, В	$X_{c(5)}$ или $X_{c(5)} + X_{T(5)}$, Ом
220	1	134,4	1,625
220	2	147,0	1,645
220	3	161,4	1,68
35	1	125,7	9,0
35	2	131,9	9,05
35	3	144,6	8,265

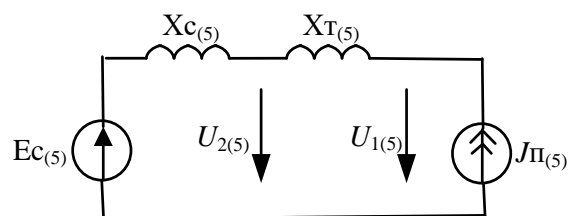


Рис. 4. Схема замещения системы электроснабжения для 5-й гармоники

Fig. 4. Power supply equivalent circuit for the 5th harmonic

Проведенные измерения показали, что требования п. 3.2.17 ПТЭЭП [14] не всегда оправданы и ситуация требует дополнительного исследования. Из рассмотренных экспериментальных данных следует, что установка фильтров высших гармоник на шинах 35 кВ несущественно изменила бы ситуацию с несинусоидальностью напряжения на шинах 35 кВ и совсем не изменила ее на шинах 220 кВ. Коэффициент 5-й гармоники на шинах 35 кВ, конечно, снизился бы при установке фильтров. Но шины 35 кВ – это собственность предприятия и решение об их установке должно быть продиктовано необходимостью улучшения качества электроэнергии для других нагрузок металлургического предприятия, а не внешними требованиями.

Причинами появления в сети 220 кВ высших гармоник могут быть полупроводниковые преобразователи. В случае, если их конструкция одинакова (например, популярные 6-пульсные выпрямители с мостовой схемой), то преобразователи неизбежно усиливают действие друг друга [15]. Также эмиссия высших гармоник тока других металлургических производств энергорайона могла создать такие условия в рассматриваемой точке электрической сети. Этот фактор никак не учитывался при формировании нормативных требований [14].

Рассмотренный участок электрической сети имеет номинальное высокое напряжение 220 кВ и, следовательно, большую мощность короткого замыкания относительно мощности нагрузки. Поэтому вклад предприятия в ухудшение качества электроэнергии в такой сети существенно уменьшается по сравнению с электрическими сетями напряжением 110 кВ. В то же время совокупное количество других потребителей в сети 220 кВ больше, чем в сети 110 кВ, и они оказывают «синергетическое» воздействие на несинусоидальность напряжения. Как показали проведенные экспериментальные исследования, нельзя рассматривать отдельно взятую подстанцию, питающую дуговые электропечи потребителя, как безусловный источник высших гармоник, что утверждается в источнике [14]. Анализ необходимо проводить во всем энергорайоне для определения истинных источников помех и наиболее рациональных мест установки фильтрокомпенсирующих устройств.

Заключение

В статье рассмотрена методика исследования несинусоидальности напряжения на шинах 35 и 220 кВ для металлургического предприятия с большой долей дуговых сталеплавильных печей в электрической нагрузке. Методика представляет

собой комбинацию метода отключения потребителя и метода анализа качества электроэнергии по мощности потребителя и заключается в проведении измерений в широком диапазоне нагрузок.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в случае питания нагрузки по схеме глубокого ввода электрическая сеть также может быть существенным источником высших гармоник. Поэтому перед принятием любых решений об установке оборудования для улучшения качества электроэнергии необходим комплексный анализ взаимного влияния сети и электрической нагрузки предприятия. Существующие нормативные требования в условиях увеличения доли нелинейной нагрузки уже не могут быть безусловными.

Список источников

1. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии // Энергосбережение. 2004. №1. С. 66-69.
2. Управление качеством электроэнергии / Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Воробьев А.Ю. М.: Издат. дом МЭИ, 2017. 347 с.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
4. Моргунов Д.Н., Добрынин Е.В. Влияние нагрузки с импульсными источниками питания на несинусоидальность в сетях электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 5. С. 13-18.
5. Chattopadhyay S., Madhuhanda M., Sengupta S. Electric Power Quality: Springer Science + Business Media B.V. Netherlands: Springer, 2011. 182 p.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения 01.06.22).
7. Железко Ю.С., Кордюков Е.И., Курбацкий В.Г. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии // Промышленная энергетика. 1990. №11. С. 52-55.
8. Майер В.Я. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии // Электричество. 1994. № 49. С. 19-24.
9. Гамазин С.И., Петрович В.А. Определение фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии // Промышленная энергетика. 2003. №1. С. 32-38.
10. Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник / В.И. Сысун, О.В. Олещук, Н.В. Соболев и др. // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 2. С. 20-23.

11. Шклярский, Я.Э., Растворова Ю.В., Петров И.С. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1. С. 56-63.
12. Карагодин В.В., Рыбаков Д.В., Смирнов С.В. Оценка влияния потребителей на уровень электромагнитной совместимости в точке подключения к системе электроснабжения специальных комплексов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 681. С. 97-103.
13. ГОСТ IEC/TR 61000-3-6-2020. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-6. Нормы. Оценка норм электромагнитной эмиссии для подключения установок, создающих помехи, к системам электроснабжения среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=237332> (дата обращения 21.06.22).
14. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утв. Минэнерго и Минюстом РФ № 6 от 13.01.03 № 4145 от 22.01.03. http://pue7.ru/pte/pte_ep.php (дата обращения 01.06.22).
15. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 632 с.
7. Zhelezko Yu.S., Kordyukov E.I., Kurbatsky V.G. Rules for applying discounts and surcharges to tariffs for the electricity quality. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 1990, no. 11, pp. 52-55. (In Russ.)
8. Mayer V.Ya. A procedure for determining the contribution of the energy consumer and that of the energy supplier to the deterioration of electric power quality. *Elektrichestvo* [Electricity], 1994, no. 49, pp. 19-24. (In Russ.)
9. Gamazin S.I., Petrovich V.A. Determining the actual contribution of the consumer to the distortion of electric power quality parameters. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2003, no. 1, pp. 32-38. (In Russ.)
10. Sysun V.I., Oleshchuk O.V., Sobolev N.V. et al. Evaluating the contribution of a non-linear load to the higher harmonics of the network voltage when they are present in the supply voltage. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2019, no. 2, pp. 20-23. (In Russ.)
11. Shklyarsky Ya.E., Rastvorova Yu.V., Petrov I.S. Evaluating the contribution of consumers to the deterioration of electric power quality indicators. *Voprosy elektrotekhnologii* [Problems of electrical engineering], 2019, no. 1, pp. 56-63. (In Russ.)
12. Karagodin V.V., Rybakov D.V., Smirnov S.V. Assessing the impact of consumers on the level of electromagnetic compatibility at the point of connection to the power supply system feeding specialized complexes. *Trudy Voennno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the A.F. Mozhaysky Military Space Academy], 2022, no. 681, pp. 97-103. (In Russ.)
13. ГОСТ IEC/TR 61000-3-6-2020. *Elektromagnitnaya sovmestimost (EMS). Chast 3-6. Normy. Otsenka norm elektromagnitnoy emissii dlya podklyucheniya ustanovok, sozdayushchikh pomekhi, k sistemam elektrosnabzheniya srednego, vysokogo i sverhvyssokogo napryazheniya*. [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-6. Limits. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems]. <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=237332> (Accessed: 21.06.22) (In Russ.)
14. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej. Uverzhdeno Minenergo i Minyustom RF № 6 ot 13.01.03 № 4145 ot 22.01.03* [Code for Consumer Electrical Installations. Approved by the Ministry of Energy and the Ministry of Justice of the Russian Federation No. 6 dated January 13, 2003 No. 4145 dated January 22, 2003]. http://pue7.ru/pte/pte_ep.php (accessed 01.06.22). (In Russ.)
15. Rozanov Yu.K., Ryabchitsky M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika: uchebnik dlya vuzov* [Power electronics: Textbook for university students]. Moscow: Publishing House of MPEI, 2017, 632 p. (In Russ.)

References

1. Chapman D. The price of low quality electricity. *Energoberezhenie* [Energy saving], 2004, no. 1, pp. 66-69. (In Russ.)
2. Kartashev I.I., Tulskey V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorobyov A.Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Power quality management]. Moscow: Publishing house of MPEI, 2017, 347 p. (In Russ.)
3. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of production companies]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 160 p. (In Russ.)
4. Morgunov D.N., Dobrynin E.V. Relationship between the load with switch-mode power supply and non-sinusoidality in power supply networks of non-traction railway consumers. *Vestnik transporta Povolzhya* [Transport bulletin of the Volga region], 2021, no. 5, pp. 13-18. (In Russ.)
5. Chattopadhyay S., Madhuhanda M., Sengupta S. *Electric Power Quality*: Springer Science + Business Media B.V. Netherlands: Springer, 2011. 182 p.
6. ГОСТ 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>. (Accessed: 01.06.22). (In Russ.)

Поступила 12.07.2022; принята к публикации 12.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 12/07/2022; revised 12/09/2022; published 26/09/2022

Дзюба Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника управления научной и инновационной деятельности ЮУрГУ, доцент кафедры «Электрические станции сети и системы электроснабжения» ПИ ЮУрГУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: dziubama@susu.ru. ORCID 0000-0003-3270-6190

Сафонов Валерий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедр «Электрические станции сети и системы электроснабжения» ПИ ЮУрГУ и «Техника, технологии и строительство» ИОДО ЮУрГУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: safonovvi@susu.ru. ORCID 0000-0001-6452-9286

Mikhail A. Dziuba – PhD (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the SUSU Research & Innovation Services, Associate Professor at the Department of Electric Power Plants and Power Supply Systems, Institute of Engineering and Technology South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: dziubama@susu.ru. ORCID 0000-0003-3270-6190

Valery I. Safonov – PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electric Power Plants and Power Supply Systems, Institute of Engineering and Technology, and at the Department of Engineering, Technology and Civil Engineering, Institute of Open and E-Learning South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: safonovvi@susu.ru. ORCID 0000-0001-6452-9286