

УДК 621.31

EDN MALQMH

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ
ЭКОНОМИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ
И НЕСИММЕТРИЧНЫМИ НАГРУЗКАМИ
К СНИЖЕНИЮ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

Д.С. Федосов

ORCID: 0000-0001-5989-9549 e-mail: fedosov_ds@istu.edu
Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

В.В. Романова

ORCID: 0000-0002-3465-4315 e-mail: romanova181@mail.ru
Забайкальский государственный университет
Чита, Россия

Филиал Национального исследовательского университета
«Московский энергетический институт» в г. Волжском
Волжский, Волгоградская область, Россия

Е.В. Зубова

ORCID: 0000-0002-0914-2027 e-mail: zubova@istu.edu
Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Обосновывается переход от компенсационного подхода к системе штрафных надбавок для искажающих потребителей, их величина определяется на основе коэффициента влияния, рассчитанного с использованием способа оценки влияния потребителя на уровень высших гармоник и несимметрии в точке общего присоединения. Представлен научно обоснованный подход экономического стимулирования искажающих потребителей к выполнению мероприятий по уменьшению эмиссии искажений синусоидальности и симметрии напряжений в электрической сети и нормализации показателей качества электрической энергии. Предложенный подход основан на коэффициенте влияния, определяемом по автономному напряжению искажения в точке общего присоединения, что учитывает неаддитивность напряжений искажения. Метод реализован в среде *MATLAB* с использованием стохастического моделирования режимов. Разработана система штрафных надбавок к тарифу, пропорциональных объему потребленной электроэнергии и степени влияния потребителя на искажения. Показано, что взимание штрафов способствует формированию фонда для внедрения средств нормализации качества электроэнергии. Моделирование на примере точки общего присоединения 6 кВ подтвердило экономическую целесообразность установки фильтрокомпенсирующих устройств с окупаемостью до 8,25 лет из фонда штрафов. Предложенный подход создает прямые экономические стимулы

для искажающих потребителей, обеспечивает справедливое распределение ответственности за искажение напряжения и может стать основой для нормативного регулирования в сфере качества электроэнергии.

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент влияния; напряжение искажения; нелинейные нагрузки; несимметричные нагрузки; точка общего присоединения; экономическое стимулирование.

Для цитирования: Федосов Д.С., Романова В.В., Зубова Е.В. Разработка методики экономического стимулирования потребителей с нелинейными и несимметричными нагрузками к снижению искажений напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 1. С. 22-47. EDN MALQMH

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR ECONOMIC INCENTIVES FOR POWER CONSUMERS WITH NONLINEAR AND UNBALANCED LOADS TO REDUCE VOLTAGE DISTORTIONS

D.S. Fedosov

ORCID: **0000-0001-5989-9549** e-mail: **fedosov_ds@istu.edu**

Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

V.V. Romanova

ORCID: **0000-0002-3465-4315** e-mail: **romanova181@mail.ru**

Trans-Baikal State University
Chita, Russia

Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
in Volzhsky
Volzhsky, Volgograd region, Russia

E.V. Zubova

ORCID: **0000-0002-0914-2027** e-mail: **zubova@istu.edu**

Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

Abstract. This paper justifies a transition from a compensatory approach to a system of penalty surcharges for distorting consumers, the size of which is determined based on an influence coefficient calculated using a method that assesses a consumer's impact on the level of higher harmonics and asymmetry at the point of common coupling. The objective of this work is to develop a scientific approach to economically incentivize distorting consumers to implement measures reducing the emission of voltage waveform and symmetry distortions in the electrical network and to normalize power quality indicators.

A method based on the influence coefficient, determined by the consumer's autonomous distortion voltage at the point of common coupling, is proposed, which correctly accounts for the non-additive nature of distortion voltages. The method is implemented in MATLAB using stochastic mode simulation. A system of penalty surcharges to the tariff has been developed, proportional to the volume of consumed electricity and the degree of consumer influence on distortions. It is shown that penalty collection facilitates the formation of a fund for implementing power quality normalization equipment. Modeling based on a 6 kV point of common coupling confirmed the economic feasibility of installing filter-compensation devices, with a payback period of up to 8.25 years from penalty funds. The proposed approach creates direct economic incentives for distorting consumers, ensures a fair distribution of responsibility for voltage distortion, and can serve as the basis for regulatory frameworks in the field of power quality.

Keywords: power quality; influence coefficient; voltage distortion; nonlinear loads; unbalanced loads; point of common coupling; economic incentive.

For citation: D.S. Fedosov, V.V. Romanova and E.V. Zubova, "Development of methodology for economic incentives for power consumers with non-linear and unbalanced loads to reduce voltage distortions", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 22-47, 2026. EDN MALQMH

I. Введение

Качество электрической энергии (КЭ) как товара является ее важнейшим свойством. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 устанавливает нормы показателей качества электроэнергии (ПКЭ), обязательные для выполнения в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей. Известно, что несоответствие ПКЭ требованиям стандарта приводит к значительному экономическому ущербу, вызванному сокращением срока службы и выходом из строя электрооборудования, увеличением потерь электроэнергии, неправильной работой устройств защиты и т. д. [1-3]. При этом в [4, 5] показано, что во многих электроэнергетических системах (ЭЭС) России нарушение требований стандарта носит систематический характер.

Решение проблем с важнейшей характеристикой электроэнергии как товара должно находиться в плоскости экономических взаимоотношений потребителей и энергоснабжающей организации (ЭСО). Однако в настоящее время вопрос влияния потребителей на ПКЭ упоминается главным образом в контексте выполнения технических условий для заключения договора на электроснабжение. Ответственность потребителя с уже подключенными к электрической сети электроприемниками за влияние на КЭ в эксплуатации практически не рассматривается. При этом в ЭЭС страны десятилетиями работают мощные нелинейные и несимметричные нагрузки – выпрямительные агрегаты электролизеров металлургических производств, электровозы на переменном и постоянном токе и прочие электроприемники

потребителей, подключенных к электрической сети еще до ввода в действие первого стандарта на ПКЭ (ГОСТ 13109-67) и на которых формально не распространяются требования «Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям». При этом искажающее влияние на КЭ электроприемников, показанных в [6, 7], является очень существенным на всех уровнях напряжения смежной электрической сети.

В данной работе внимание сосредоточено на реализации методики экономического стимулирования потребителей с нелинейными и несимметричными нагрузками к уменьшению эмиссии токов искажений в электрическую сеть с целью приведения ПКЭ в соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013. Предлагаемый подход рассматривается как переходный, служащий временным решением для приведения к нормам недопустимых уровней эмиссии искажений, вызванных работой указанных электроприемников. После приведения ПКЭ к требованиям ГОСТ 32144-2013 за счет выполнения технических и организационных мероприятий дальнейшее применение данной методики не потребуется.

Цель исследования заключается в разработке подхода экономического стимулирования потребителей и ЭСО к выполнению мероприятий по улучшению КЭ, поскольку данный вопрос не решен в настоящее время.

Научная значимость исследования состоит в создании методической базы для организации экономических взаимоотношений между ЭСО и потребителями электроэнергии с искажающими электроприемниками в области КЭ, учитывающей специфику электроэнергии как товара.

Практическая значимость исследования заключается в улучшении ПКЭ в электрических системах с нелинейными и несимметричными нагрузками, позволяющей снизить экономический ущерб ЭСО и потребителей, связанный с низким КЭ.

II. Литературный обзор

Обзор источников показал, что на сегодняшний день в России отсутствует законодательно утвержденный механизм стимулирования потребителей к выполнению мероприятий по нормализации ПКЭ. Мировая практика показывает, что действенным способом улучшения КЭ является ограничение эмиссии тока искажения еще на стадии подключения потенциально искажающих потребителей в электрическую сеть [8]. В случае отказа от выполнения данных мероприятий необходимо вводить штрафные санкции к искажающим потребителям.

Существовавшая ранее в СССР и России и законодательно закрепленная в РД 153-34.0-15.502-2002 методика оценки влияния потребителей

на искажение напряжения, базировавшаяся на расчете фактического вклада (ФВ) потребителя или ЭСО в напряжение искажения, решала задачу экономического стимулирования потребителей к нормализации КЭ за счет изменения тарифа на электроэнергию. По рассчитанным для потребителей ФВ определялись коэффициенты скидок или надбавок к тарифу на электроэнергию согласно инструкции Роскомцен №01-17/1443-11, Минтопэнерго РФ №ВК-7539 от 30.11.1993 г. «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию». Таким образом, несмотря на неоднозначность самого подхода к определению ФВ, существовавшая методика все же позволяла стимулировать потребителей, имеющих, согласно методике расчета ФВ, искажающие электроприемники и потребляющих ввиду этого электроэнергию по штрафному тарифу, выполнять мероприятия по нормализации ПКЭ. В свою очередь, участники системы электроснабжения (СЭС), не имеющие источников искажений и потребляющие электроэнергию, качество которой не соответствовало требованиям ГОСТ, получали электроэнергию по льготной цене.

На сегодняшний день в соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 58289-2018 обязательная сертификация КЭ предусматривает подтверждение соответствия ГОСТ 32144-2013 только двух характеристик ПКЭ – отклонения частоты и медленных изменений напряжения. ПКЭ, связанные с несинусоидальностью и несимметрией напряжений, при сертификации не учитываются, несмотря на их значительное влияние на надежность работы электрооборудования и электроснабжения в целом [9]. Вместе с тем, на данный момент нет действующих нормативно-технических документов, которые устанавливали бы порядок определения степени влияния участников СЭС на несимметрию и несинусоидальность напряжений в электрической сети. По этой причине отсутствует имеющий юридическую силу способ экономического регулирования отношений поставщиков и потребителей электроэнергии в части вышеупомянутых ПКЭ.

Таким образом, для реального использования методики оценки влияния потребителей на искажение напряжения необходимы пересмотр и доработка не только нормативно-технических документов, но и правовых, в том числе Гражданского кодекса РФ. Так, в статье 542 Гражданского кодекса РФ «Качество энергии» указано, что в случае нарушения энерго-снабжающей организацией требований, предъявляемых к КЭ, абонент вправе отказаться от оплаты такой энергии. Из данной формулировки видно, что в настоящее время априори устанавливается вина ЭСО перед потребителем за ухудшение КЭ без учета возможного отрицательного влияния самого потребителя на КЭ. Тем самым игнорируется специфика электрической энергии как товара, качество которого зависит не только от поставщика, но и от потребителя. Правовая база в подавляющем большинстве случаев защищает

интересы потребителей электроэнергии, независимо от характера их нагрузок, что подтверждается обзором судебной практики по искам о неудовлетворительном КЭ [10]. Очевидно, что без отказа от существующих в Гражданском кодексе РФ и Законе РФ «О защите прав потребителей» подходов, практически исключая отрицательное влияние потребителя на КЭ, невозможно введение штрафных санкций в отношении искажающих потребителей. Эти санкции могут быть следующими.

Единовременно взимаемые штрафы за ухудшение КЭ по результатам инспекционного контроля КЭ с периодичностью, указанной в ГОСТ 33073-2014. Данный подход отличается невысокой затратностью и требует наличия у контролирующей организации измерительного прибора, позволяющего определить параметры исследуемого потребителя и оценить степень его влияния на искажение напряжения. Однако большой интервал времени между контролем КЭ (1 раз в 2 года) является причиной низкой достоверности периодической оценки влияния потребителей на КЭ.

Надбавка к тарифу на потребляемую электроэнергию по аналогии с ранее существовавшим подходом, установленным инструкцией «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию» и Правилами применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии, утвержденным 14.05.1991 г. Надбавка может быть либо определенной априорно (например, по результатам инспекционного контроля КЭ и оценки степени влияния искажающего потребителя на КЭ), либо меняющейся во времени в зависимости от меры влияния потребителя на КЭ. В таком случае необходима установка измерительных приборов, одновременно осуществляющих учет потребляемой электроэнергии и определяющих параметры искажающих потребителей в реальном времени с расчетом надбавки к тарифу.

Штрафование ухудшающих КЭ потребителей на сумму исков, заявленных пострадавшими от неудовлетворительного КЭ потребителями. Данный подход, как и в предыдущем варианте, требует установки измерительных приборов, с помощью которых можно доказать недопустимые искажения, вносимые нелинейной или несимметричной нагрузкой отдельных потребителей. Указанный подход мог бы хорошо зарекомендовать себя при массовом выходе из строя электрооборудования потребителей, например, из-за резонансных процессов на высших гармониках (ВГ). В таком случае потребители могут однозначно указать сумму иска, равную стоимости ремонта или замены оборудования и технологического ущерба, в том числе, и упущенной выгоды. Однако, если выхода из строя оборудования не произошло, потребителям сложно оценить ущерб от неудовлетворительного КЭ, связанный с увеличением потерь электроэнергии и уменьшением срока службы ввиду отсутствия единой методики для такой оценки. Некоторые исследования данного вопроса представлены в [11, 12].

По указанным в последнем пункте причинам затруднителен не только сбор штрафов с искажающих потребителей, но и компенсация ущерба неискажающим участникам СЭС даже при привязке механизма компенсации к объему учтенной электроэнергии. Кроме этого, возможны расхождения в оценке электромагнитной и технологической составляющих ущерба по уже названной причине отсутствия для этого единой методики. Указанные факторы могут привести к отсутствию баланса между выплаченными компенсациями и взысканными штрафами.

Также проведен анализ подхода к нормализации КЭ, действующего в некоторых зарубежных странах. В них действуют и выполняются требования директив и стандартов *IEC 61000-3-2*, *IEC 61000-3-4*, *IEC 61000-3-12*, *IEC/TR 61000-3-6*, *IEEE Std 519-2022*, ограничивающих эмиссию токов ВГ электроустановками и техническими средствами (ТС) напряжением как до 1 кВ, так и выше. Для перехода к подобному нормированию КЭ в России делаются шаги за счет принятия отечественных стандартов по ограничению эмиссии токов ВГ (ГОСТ *IEC 61000-3-2-2021*, ГОСТ Р 51317.3.4-2006, ГОСТ 30804.3.12-2013), распространяющихся, однако, только на низковольтные ТС малой мощности. Источниками же самых больших искажений напряжения во многих ЭЭС были и остаются мощные электроприемники потребителей, подключенные напрямую к сетям высокого напряжения. Принятые в этой связи ГОСТ *IEC/TR 61000-3-6-2020* и ГОСТ Р 72176-2025 введены относительно недавно, поэтому на настоящий момент отсутствуют практические примеры его применения к участникам СЭС. Также важным шагом стало утверждение «Требований к КЭ, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии» (приказ Минэнерго РФ от 28.08.2023 г. № 690), которые закрепили обязанности потребителей с нелинейными и несимметричными нагрузками по соблюдению норм КЭ. Однако названный документ также не содержит методики распределения ответственности и экономического стимулирования потребителей к выполнению этих требований.

Таким образом, проведенный обзор существовавших ранее подходов подтверждает актуальность цели исследования – разработки подхода экономического стимулирования потребителей и ЭСО к выполнению мероприятий по улучшению КЭ, поскольку данный вопрос не решен в настоящее время.

III. Материалы и методы

Очевидным недостатком способа регулирования отношений между потребителями и ЭСО в части КЭ путем определения ФВ, рассмотренного в РД 153-34.0-15.502-2002 и Правилах применения скидок и надбавок к та-

рифам за качество электроэнергии, является то, что скидки и надбавки к тарифу начислялись некорректно, поскольку напряжение искажения не обладает свойством аддитивности [13, 14]. Кроме того, величина скидки или надбавки зависит только от характера влияния потребителя на КЭ (искажающий или неискажающий потребитель), но не от количественной меры этого влияния, которая косвенно учитывается только количеством потребленной электроэнергии. Также в нормативных документах и ссылочных материалах отсутствуют обоснования выбора значений коэффициентов скидок и надбавок. При решении задач оценки вклада потребителей в несинусоидальность и несимметрию напряжения общепринятым подходом является представление каждого из питающих и нагрузочных присоединений на рассматриваемой гармонике или для обратной последовательности основной частоты в виде эквивалентного двухполюсника – параллельно включенных источника тока и проводимости. Такие схемы замещения (СЗ), основанные на теоремах Нортона или Тевенина, приняты в международных стандартах и отчетах (*IEC 61000-3-6*, *CIGRE/CIREN C4.109*) и широко применяются в отечественной практике (ГОСТ *IEC/TR 61000-3-6-2020*) и исследованиях [5, 6, 11, 13, 14]. Данные СЗ позволяют упростить подробные модели [15, 16], учитывающие внутреннюю структуру искажающей нагрузки, влияние угла коммутации и режима основной частоты, и сосредоточиться на системных аспектах КЭ.

В [13, 14, 17] предложен способ выявления искажающих КЭ потребителей и оценке степени их влияния на недопустимое искажение напряжения в точке общего присоединения (ТОП) при помощи коэффициента влияния, для чего решена вспомогательная задача экспериментального определения параметров СЗ потребителей [14, 18].

Предложенный способ оценки влияния основан на концепции коэффициента влияния и автономного напряжения искажения, что позволяет избежать некорректного использования понятия ФВ, поскольку напряжение искажения не обладает свойством аддитивности. Вместо некорректного и лишнего физического смысла разделения вектора напряжения искажения между участниками СЭС предлагается оценивать допустимость влияния потребителя с применением его автономного напряжения искажения. Условие допустимости вносимых искажений имеет вид:

$$U_{\Pi}^{\text{авт.}} \leq U_{\text{иск.доп.}}, \quad (1)$$

где $U_{\Pi}^{\text{авт.}} = \frac{I_{\Pi}}{Y_{\Pi}}$ – автономное напряжение искажения, создаваемое потребителем, представленным в СЗ на рис. 1 в виде активного двухполюсника, где

наличие искажающих нагрузок характеризуется током искажения I_{Π} , а неискажающих электроприемников – проводимостью Y_{Π} ; $U_{\text{иск.доп}}$ – допустимое напряжение искажения согласно ГОСТ 32144-2013.

Питающая ЭЭС вместе с иными потребителями данной ТОП представлена в СЗ аналогичным двухполюсником в общем виде с параметрами I_C и Y_C .

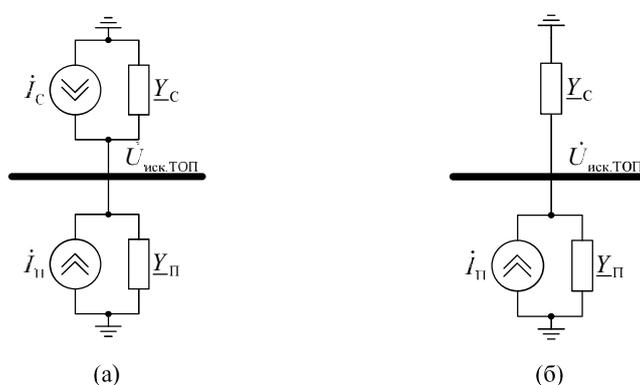


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения нагрузок потребителя, подключенного к точке общего присоединения с энергосистемой, содержащей источники искажений (а) и не содержащей источники искажений (б)

Fig. 1. Equivalent circuit diagram of a consumer's load connected to the point of common coupling with a power system containing distortion sources (a) and without distortion sources (b)

Для количественной оценки влияния k -го потребителя на искажение напряжения в ТОП введено понятие коэффициента влияния:

$$K_{\text{вл.}k} = \frac{U_{\text{иск.доп.}} - U_k^{\text{авт.}}}{U_{\text{иск.доп.}}} = 1 - \frac{U_k^{\text{авт.}}}{U_{\text{иск.доп.}}} . \quad (2)$$

Разработаны алгоритмы экспериментального определения параметров СЗ нагрузок потребителя в реальном времени [14, 18] по измеряемым токам и напряжениям без выполнения специальных коммутаций в сети. Это позволяет автоматизировать процесс оценки и использовать его в системах мониторинга КЭ. Результаты натурных испытаний подтверждают работоспособность метода и его применимость для выявления искажающих потребителей. Данный способ оценки влияния взят за основу для формирования системы экономических взаимоотношений между участниками СЭС в области КЭ. Для организации постепенного перехода к ЭЭС с требуемым по

ГОСТ 32144-2013 КЭ за счет реализации искажающими потребителями мер по уменьшению эмиссии токов искажения предложен компромиссный вариант регулирования отношений между ЭСО и искажающими КЭ потребителями. Предлагается ввести систему штрафных надбавок к тарифу на электроэнергию за ухудшение КЭ, при этом, в отличие от подхода в РД 153-34.0-15.502-2002 и [19], выплата компенсаций в виде скидок неискажающим потребителям не предполагается. Вместо этого создается фонд штрафных средств в ЭСО, расходуемый целевым образом только на мероприятия по улучшению ПКЭ.

Для такого решения есть несколько обоснований. Во-первых, баланс при выплате компенсаций (например, в виде скидки к тарифу на электроэнергию) будет невозможен, поскольку коэффициент влияния не обладает свойством аддитивности, что в совокупности с тем фактом, что искажающие и неискажающие потребители в ТОП в общем случае имеют неодинаковую мощность и потребляют разное количество электроэнергии, приведет к небалансу штрафов и компенсаций. Во-вторых, в реалиях большинства ЭЭС России проблемы КЭ вызывают не отдельные бытовые и промышленные потребители малой мощности, а мощные нелинейные и несимметричные нагрузки (например, выпрямительные агрегаты металлургических производств, железнодорожная тяга и т.п.). Собственники этих производств лишь в редких случаях заинтересованы в улучшении ПКЭ за счет установки фильтров ВГ, симметрично-компенсирующих устройств (СКУ), схемных решений и т.д. ввиду отсутствия нормативных документов, ограничивающих эмиссию токов искажения. Взимание штрафов с таких искажающих потребителей позволит решить задачу улучшения ПКЭ в рамках целой ЭЭС, в том числе, и в тех случаях, когда установка средств нормализации ПКЭ у каждого из искажающих потребителей нецелесообразна. Так, в [20] приведен пример, когда установка всего двух СКУ на тяговых ПС Байкало-Амурской магистрали (БАМ) позволит решить проблему с несимметрией напряжений во всей схеме внешнего электроснабжения БАМа. Данный вариант намного выгоднее установки СКУ на каждой ПС. Задачу проектирования и выбора узлов сети для установки средств нормализации ПКЭ на переходном этапе предлагается возложить на ЭЭС в лице ЭСО или сетевой компании. Затраты на нормализацию ПКЭ предлагается компенсировать полностью или частично из средств фонда, формируемого за счет взимания штрафов с искажающих потребителей через надбавку к тарифу. Следует еще раз отметить, что такое решение для нормализации ПКЭ является паллиативным, поскольку единственным обоснованным вариантом исключения проблем с КЭ в ЭЭС является ограничение эмиссии токов ВГ и ОП, широко применяемое за рубежом для электроустановок всех уровней напряжения.

Для обоснования величины штрафной надбавки к тарифу, взимаемой

с искажающих потребителей, необходимо оценить величину ущерба, наносимого такими потребителями другим участникам СЭС. В [21] указано, что ущерб от несоответствия КЭ требованиям ГОСТ принято делить на электромагнитную и технологическую составляющие. Согласно экспертным оценкам [11, 21], технологическая составляющая ущерба, обусловленная порчей материалов и оборудования, расстройством технологического процесса, ухудшением качества выпускаемой продукции, снижением производительности труда, на порядок больше электромагнитной составляющей, вызванной дополнительными потерями, уменьшением срока службы оборудования и т. д. Кроме того, технологическая составляющая индивидуальна для каждого типа производства и с трудом поддается оценке. По этой причине при расчете штрафных санкций она не будет учитываться.

Для анализа ущерба от неудовлетворительного КЭ по причине несинусоидальности и/или несимметрии напряжений рассмотрим СЗ на рис. 1б, представляющую собой ЭСО без источников искажений и искажающего потребителя, подключенного к ТОП. Для упрощения примем, что в схеме на рис. 1б параметры СЗ остаются практически неизменными во времени, что обуславливает неизменность параметров режима. Также условно будем считать, что $Y_C \ll Y_{\Pi}$, в результате чего напряжение искажения в ТОП будет практически полностью определяться параметрами СЗ исследуемого потребителя:

$$U_{\text{иск.ТОП}} = \frac{I_{\Pi}}{|Y_{\Pi} + Y_C|} \approx \frac{I_{\Pi}}{Y_{\Pi}} = U_{\Pi}^{\text{авт.}}, \quad (3)$$

где $U_{\Pi}^{\text{авт.}}$ – автономное напряжение искажения исследуемого потребителя.

Также для упрощения анализа и формирования принципиального подхода к определению штрафных санкций примем, что в схеме на рис. 1 присутствует лишь один источник искажения напряжения: только одна ВГ или только источник тока ОП.

Электромагнитный ущерб от несинусоидальности и несимметрии напряжений включает в себя три составляющие [11]:

- составляющая, обусловленная дополнительными потерями активной мощности;
- составляющая, обусловленная снижением срока службы электрооборудования;
- составляющая, обусловленная снижением эффективности использования передающих элементов электрической сети.

Последняя составляющая ущерба с трудом поддается количественной оценке, поэтому при приближенных расчетах ей пренебрежем.

Принципиальный подход к определению штрафной санкции состоит

в том, что с потребителя, виновного в недопустимом ухудшении ПКЭ, необходимо взимать такую сумму штрафа, которая будет компенсировать дополнительные потери электроэнергии и увеличение амортизационных отчислений, связанное с уменьшением срока службы оборудования по вине недопустимого КЭ. Ввиду неизвестного (в общем случае) характера и мощности нагрузок других потребителей, подключенных к данной ТОП, и ЭЭС, ограничимся оценкой ущерба только для исследуемого потребителя, условно работающего автономно, что позволяет сделать схема на рис. 1б с принятыми в ней допущениями. Интерпретировать такой подход к взиманию ущерба можно тем, что штрафные санкции накладываются в объеме ущерба для той части мощности генерирующего и сетевого оборудования ЭЭС, которую использует данный потребитель. Оценка ущерба для смежных потребителей в данной ТОП и для ЭСО представляется нецелесообразной, поскольку в общем случае искажающему потребителю ничего не известно о составе и мощности оборудования прочих участников СЭС, а, следовательно, зависимость ущерба от данных факторов будет считаться им необоснованной.

Рассмотрен подход к расчету штрафных санкций на примере несинусоидальности напряжения. Согласно [21], расчетное выражение для оценки ущерба от ВГ, обусловленного дополнительными потерями электроэнергии и сокращением срока службы изоляции электрооборудования:

$$Y = \beta (AT\Delta P_{\text{ном}} + BK) \frac{U_{n*}^2}{n\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где β – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; $\Delta P_{\text{ном}}$ – номинальные потери в электрооборудовании; T – время работы электрооборудования; K – капитальные затраты на электрооборудование; A и B – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа электрооборудования; U_{n*} – напряжение ВГ с номером n , отнесенное к напряжению основной частоты.

Номинальные потери активной мощности в электрооборудовании могут быть выражены через установленную мощность электрооборудования $P_{\text{уст.}}$ с использованием соответствующего коэффициента $k_{\Delta P}$:

$$\Delta P_{\text{ном}} = k_{\Delta P} P_{\text{уст.}}. \quad (5)$$

Аналогично могут быть выражены и капитальные затраты на электрооборудование:

$$K = k_{\text{уд.}} P_{\text{уст.}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{уд.}}$ – удельные капиталовложения на установку 1 кВт мощности электрооборудования.

С учетом (4)-(6):

$$Y = \beta P_{\text{уст.}} (ATk_{\Delta P} + Bk_{\text{уд.}}) \frac{U_{n^*}^2}{n\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Величина взимаемого за то же время T штрафа рассчитывается как доля оплаченной потребителем электроэнергии по выражению:

$$\text{Ш} = \alpha \beta \int_0^T P dt, \quad (8)$$

где α – штрафной коэффициент надбавки к тарифу за ухудшение КЭ, о.е.

Исходя из условия равенства ущерба и штрафа, определена величина штрафного коэффициента:

$$\alpha = P_{\text{уст.}} (ATk_{\Delta P} + Bk_{\text{уд.}}) \frac{U_{n^*}^2}{n\sqrt{n}} \bigg/ \int_0^T P dt. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет рассчитать штрафной коэффициент надбавки к тарифу при недопустимом уровне n -й ВГ.

Далее представлен пример расчета численного значения штрафного коэффициента и проверка подхода на математической модели ТОП. Согласно [21], среднегодовой коэффициент использования установленной мощности принят $K_u = 0,65$. Выражение (9) можно представить в виде:

$$\alpha = \frac{P_{\text{уст.}} (ATk_{\Delta P} + Bk_{\text{уд.}})}{K_u P_{\text{уст.}} T} \cdot \frac{U_{n^*}^2}{n\sqrt{n}} = 1,538 \left(Ak_{\Delta P} + \frac{Bk_{\text{уд.}}}{T} \right) \frac{U_{n^*}^2}{n\sqrt{n}}. \quad (10)$$

Средняя величина потерь активной мощности в электрооборудовании, отнесенная к его номинальной мощности, с «запасом» принята равной 10 % [22]. Согласно [21], для наиболее распространенных синхронных и асинхронных машин коэффициенты A и B находятся в диапазонах от 250 до 490 и от 4 до 15 соответственно. Принимая, $A = 490$ и $B = 15$:

$$\alpha = \left(7,536 + \frac{2,307k_{\text{уд.}}}{T} \right) \cdot \frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

где $K_{U(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения по ГОСТ 32144-2013, %.

Ввиду отсутствия в литературе актуальных и достоверных данных по укрупненным показателям стоимости установленной мощности обобщенной нагрузки, которая, очевидно, дифференцирована по типам потребителей (максимальный $k_{\text{уд}}$ соответствует цифровому оборудованию), по уров-

ням напряжения потребителей и по мощности единицы электрооборудования, коэффициент $k_{уд}$ в (11) показан без числовой интерпретации. Из (11) видно, что значение штрафного коэффициента зависит от времени работы потребителя при текущем значении коэффициента $K_{U(n)}$. Эта зависимость обусловлена уменьшением срока службы оборудования при несоответствии ПКЭ требованиям ГОСТ и необходимостью увеличивать амортизационные отчисления на реновацию оборудования [21]. Чтобы избежать ситуации, в которых необходимо неограниченно увеличивать штрафной коэффициент при малых временах воздействия ВГ, составляющую, обусловленную дополнительным снижением срока службы электрооборудования, учитывать не будем.

Получено выражение для штрафного коэффициента α надбавки к тарифу, который зависит только от текущего значения ПКЭ в ТОП. Для учета влияния потребителя на ПКЭ расчет штрафного коэффициента проведен с использованием коэффициента влияния данного потребителя на искажение напряжения. Окончательно, без учета составляющей ущерба, обусловленной дополнительным снижением срока службы электрооборудования, получено выражение для k -го потребителя:

$$\alpha_k = 7,536 \cdot K_{вл.k} \cdot \frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

где $K_{вл.k}$ – коэффициент влияния исследуемого k -го потребителя на искажение напряжения.

Следует отметить, что физический смысл имеет только положительный $K_{вл.k}$, указывающий на недопустимое влияние данного потребителя на искажение напряжения и на необходимость взыскания штрафных санкций. Если $K_{вл.k} \leq 0$, штрафная надбавка к тарифу не применяется.

Эмпирические коэффициенты в (12) для расчета штрафного коэффициента не являются окончательными и могут быть уточнены для отдельных групп потребителей в ходе самостоятельного исследования ущербов от несоответствия КЭ требованиям ГОСТ 32144-2013. Составляющая, обусловленная дополнительным снижением срока службы электрооборудования, также может быть учтена при использовании адекватной модели оценки ресурса электрооборудования при неудовлетворительном КЭ. Составляющие ущерба при воздействии несимметрии напряжений носят характер, аналогичный составляющим ущерба от ВГ. По этой причине расчет штрафного коэффициента для несимметрии напряжений может быть выполнен по аналогичной схеме, если принять за основу методику оценки ущерба от несимметрии напряжений, приведенную, например, в [12].

Введение штрафного коэффициента позволяет выполнить привязку величины штрафа к объему потребленной электроэнергии. Такой подход,

как отмечалось ранее, является логичным, поскольку позволяет избежать ситуации, когда, к примеру, маломощный искажающий потребитель, работающий по вине ЭСО в сети с эквивалентной относительно потребителя проводимостью, близкой к нулю, вызывает недопустимое ухудшение КЭ в узле сети и вынужден возмещать ущерб остальным потребителям в данной ТОП. Для этого в нормативно-правовых документах также необходимо закрепление ответственности ЭСО за поддержание режима без резонанса [14, 23]. В предложенном подходе потребитель выплачивает штраф, пропорциональный потребленной им электроэнергии и тому ПКЭ, на увеличение которого он оказал недопустимое влияние.

Кроме того, в представленном примере рассмотрен только один источник искажения (одна гармоника). Одновременный учет действия нескольких гармоник и несимметрии в общем случае требует отдельного исследования, а в качестве одного из вариантов без дополнительного обоснования учет одновременного действия нескольких ПКЭ может быть выполнен аналогично инструкции «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию», а именно простым суммированием независимо рассчитанных штрафных санкций по каждому ПКЭ.

IV. Результаты и обсуждение

Для проверки возможности применения предложенного подхода применения штрафных санкций в виде надбавки к тарифу в системе *MATLAB* создана математическая модель ТОП с искажающими нелинейными нагрузками. Схемы ТОП представлены на рис. 2.

Номинальное напряжение ТОП – 6 кВ. Установленные мощности нагрузок потребителей представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Установленные мощности нагрузок потребителей

Table 1.
Installed load capacities of power consumers

Индекс присоединения	Характеристика нагрузки на присоединении		Установленная мощность, МВА
1	Осветительная нагрузка		$2 + j0,3$
2	Выпрямительная нагрузка		$6 + j1$
3	Асинхронная нагрузка		$3 + j2$
4	Смешанная выпрямительная и активно-емкостная нагрузка	Выпрямительная нагрузка	$10 + j2$
		Линейная нагрузка	$1 - j2$
5	ЭСО без источников искажения		–

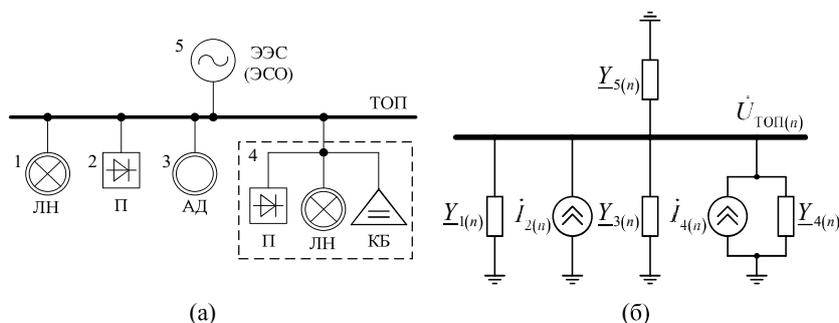


Рис. 2. Расчетная схема точки общего присоединения (а) и схема замещения точки общего присоединения на высших гармониках (б) для анализа метода применения штрафных санкций:

ЛН – лампы накаливания; П – преобразователи; АД – асинхронные двигатели; КБ – конденсаторные батареи

Fig. 2. Calculation diagram of the point of common coupling (a) and equivalent impedance of the point of common coupling at higher harmonics (b) for the analysis of the penalty sanctions method:

ЛН – incandescent lamps; П – converters; АД – asynchronous motors; КБ – capacitor banks

Принято, что мощность каждого потребителя меняется случайно с равномерным законом распределения каждые 10 мин в диапазоне от 70 до 100 % установленной мощности $S_{\text{уст}}$. Исходное значение тока трехфазного короткого замыкания (КЗ) на шинах ТОП $I_{\text{К исх}}^{(3)}$ составляет 20 кА. Изменение конфигурации внешней сети моделируется случайным изменением за каждые 10 мин по равномерному закону тока КЗ на шинах ТОП в диапазоне от 0,7 до 1,0 от исходного тока КЗ $I_{\text{К исх}}^{(3)}$.

Для анализа выбрана гармоника с номером $n = 7$. По ГОСТ 32144-2013 нормально допустимое и предельно допустимые значения ПКЭ для данной гармоники в сети 6 кВ равны, соответственно, $K_{U(7)\text{нд}} = 3\%$ и $K_{U(7)\text{пд}} = 4,5\%$. Параметры СЗ для ВГ оценены приближенно по формулам из [24-26]. Так, активная, индуктивная и емкостная проводимости на ВГ могут быть найдены по следующим выражениям через известные составляющие полной проводимости на основной частоте:

$$G_{(n)} = \frac{G_{(1)}}{\sqrt{n}}; B_{L(n)} = \frac{B_{L(1)}}{n}; B_{C(n)} = nB_{C(1)}. \quad (13)$$

Модуль задающего тока n -й ВГ согласно [21, 24] может быть приближенно выражен как отношение тока на основной частоте к номеру ВГ:

$$I_{(n)} = \frac{I_{(1)}}{n}. \quad (14)$$

Проводимости потребителей на основной частоте, в свою очередь, найдены по закону Ома, а проводимость ЭЭС (ЭСО) – по известному значению тока трехфазного КЗ на шинах 6 кВ согласно РД 153-34.0-20.527-98.

По (13) и (14) рассчитаны параметры СЗ на рис. 2б для n -й ВГ, меняющиеся во времени каждые 10 ми. Данный интервал времени соответствует минимальному интервалу для оценки соответствия КЭ требованиям ГОСТ, связанным с несинусоидальностью и несимметрией напряжений. Общее время моделирования составляет 1 год, или 52560 интервалов по 10 мин. Результаты моделирования приведены на рис. 3-5 и в табл. 2 с необходимыми комментариями.

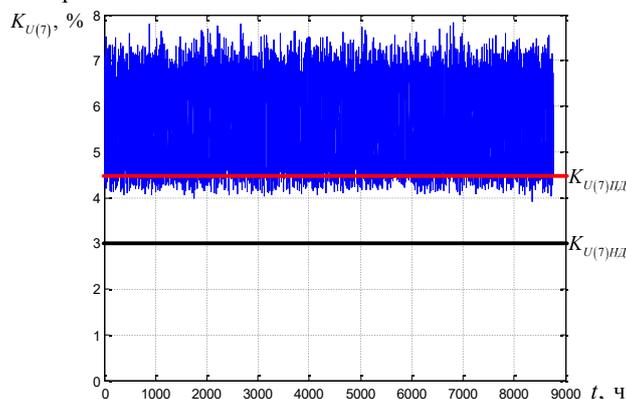


Рис. 3. График изменения во времени коэффициента 7-й гармонической составляющей напряжения прямой последовательности на шинах точки общего присоединения

Fig. 3. Time variation graph of the 7th harmonic component of the positive-sequence voltage at the point of common coupling buses

По параметрам СЗ на рис. 2б, которые в действующей СЭС могут быть определены в реальном времени с использованием метода, рассмотренного в [14, 18], рассчитываются коэффициенты влияния каждого участника СЭС, подключенного к ТОП. Для исключения чрезмерно больших по модулю значений коэффициентов влияния в СЗ чисто линейных потребителей искусственно введен ток искажения величиной 1 А, не меняющий характера их влияния на КЭ ($K_{вл.} < 0$).

По рассчитанным коэффициентам влияния и значению ПКЭ $K_{U(7)}$ в ТОП, по (12) можно рассчитать штрафные коэффициенты надбавок к та-

рифу для каждого потребителя. Еще раз необходимо отметить, что штрафной коэффициент для k -го потребителя α_k рассчитывается только при выполнении двух условий: положительного $K_{вл,k}$ данного потребителя и наличия ПКЭ, превышающего нормально допустимое значение по ГОСТ 32144-2013. В противном случае $\alpha_k = 0$.

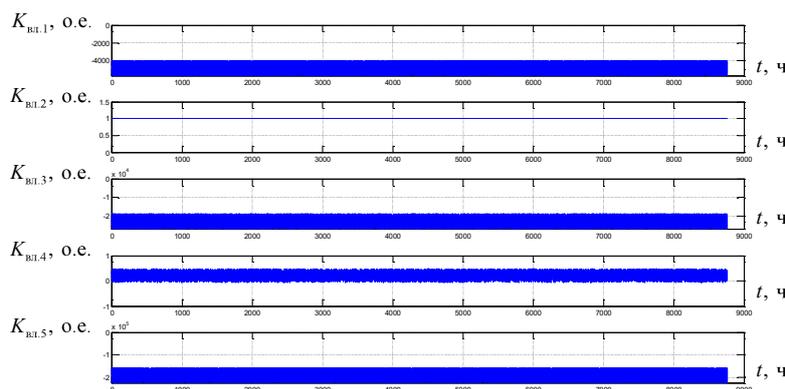


Рис. 4. Графики изменения во времени коэффициентов влияния каждого участника системы электроснабжения

Fig. 4. Time variation graphs of the influence coefficients of each participant in the power supply system

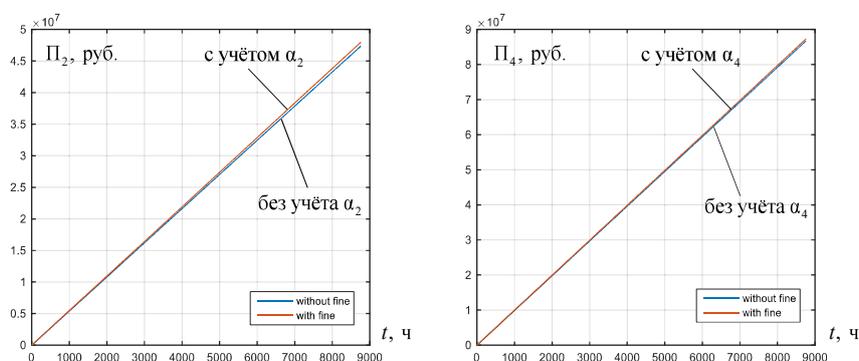


Рис. 5. Результаты расчёта стоимости электроэнергии Π_2 , потреблённой искажающими участниками системы электроснабжения на присоединении 2 (а), и стоимости электроэнергии Π_4 для присоединения 4 (б) без учёта и с учётом штрафного коэффициента в виде нарастающего итога

Fig. 5. Calculation results of Π_2 electricity cost consumed by distorting loads at feeder 2 (a), and Π_4 electricity cost at feeder 4 (b), without and with consideration of the penalty factor, presented as a cumulative total

Таблица 2.
Результаты расчета годовых переоплат
за ухудшение качества электроэнергии искажающими потребителями

Table 2.
Results of the calculation of annual overpayments
for deterioration of power quality caused by distorting consumers

Индекс потребителя	Сумма штрафа за год, руб.
2	612 701
4	574 504
Итого в пользу ЭСО:	1 187 205

На рис. 5 приведены результаты расчета стоимости потребленной искажающими участниками СЭС электроэнергии без учета и с учетом штрафного коэффициента. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии упрощенно принята в соответствии с экономически обоснованным одноставочным тарифом в Иркутской области для организаций в диапазоне напряжений СН1 на второе полугодие 2025 г. и составляет 1,05965 руб./кВт·ч, согласно приказу службы по тарифам Иркутской области № 79-684-спр от 29.11.2022 г. (в ред. приказа №79-344-спр от 30.11.2024 г.).

Результаты расчета штрафа, взимаемого с искажающих потребителей (с положительными $K_{вл}$) в течение года, приведены в табл. 2. Как указывалось ранее, полученные ЭСО в виде штрафа средства нецелесообразно использовать для снижения тарифа неискажающим потребителям ввиду неаддитивности коэффициента влияния и несоответствия количества и мощности искажающих и неискажающих потребителей. Предлагается из полученных средств создать фонд в ЭСО, которой будет расходоваться на улучшение ПКЭ и выплату компенсаций по возможным искам от потребителей. Такая мера является превентивной, поскольку ЭСО заранее получает дополнительные средства для нормализации КЭ и возможности компенсировать иски по КЭ, число которых обязательно будет расти ввиду роста количества чувствительного к КЭ оборудования [27] (особенно микропроцессорного) и повышения юридической и технической грамотности потребителей [10, 28].

Кроме этого, и потребители при введении системы штрафов получают стимул к уменьшению эмиссии токов искажения и нормализации ПКЭ. Так, согласно сайту Единой информационной системы в сфере закупок, стоимость фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) с номинальным напряжением 6 кВ составит около 9,8 млн руб. по ценам, приведенным к 2025 году. При условии постоянства ежегодного штрафа (табл. 2) срок окупаемости установки ФКУ при условии установки его ЭСО, а не каждым потребителем в отдельности, составит 8,25 года. Этот показатель для объектов энергетики довольно мал [29], что делает установку устройств норма-

лизации ПКЭ экономически целесообразной для искажающих потребителей. Следует отметить, что данный срок окупаемости получен при цене за 1 кВт·ч, являющейся самой низкой в стране. В других регионах России с большим тарифом на электроэнергию срок окупаемости установки ФКУ будет значительно меньше. Данный экономический эффект достигается только при учете ущерба, вызванного дополнительными потерями от токов ВГ. Учет снижения срока службы и уточнение штрафного коэффициента по (9) приведет к увеличению последнего и, как следствие, к дополнительному стимулированию потребителей к нормализации ПКЭ.

V. Выводы

В работе представлен концептуальный подход, касающийся решения задачи экономического стимулирования искажающих потребителей к выполнению мероприятий по уменьшению эмиссии токов искажения и нормализации ПКЭ. Рассмотрено правовое положение ЭСО и потребителей в вопросах КЭ. Отмечено, что в настоящее время к потребителям, недопустимо искажающим КЭ, не применяются штрафные санкции по нескольким причинам. Среди них – отсутствие корректной методики оценки их влияния на искажение напряжения, несовершенство нормативно-правовой базы, незаинтересованность большинства потребителей в улучшении ПКЭ. При этом в правовых документах не учитывается специфика электроэнергии как товара, качество которой зависит не только от ЭСО, но и от потребителей, причем в части несимметрии и несинусоидальности напряжений – только от последних.

Отмечено, что в условиях невозможности одновременного перехода к нормированию токов искажения единственным рычагом воздействия на искажающих потребителей в вопросе улучшения ими КЭ может стать введенная в правовых и нормативных актах процедура взыскания штрафа на основе корректной автономной методики выявления искажающих потребителей независимо от их мощности. Штраф может взиматься по результатам инструментального контроля и анализа КЭ с выявлением искажающих потребителей периодически (на заранее установленную сумму), после подачи иска к ЭСО от неискажающих потребителей (на сумму иска) или непрерывно в виде надбавки к тарифу на электроэнергию.

Внедрение предлагаемого паллиативного подхода аккумулирования взимаемых штрафов в фонде ЭСО для выполнения организационно-технических мероприятий по улучшению ПКЭ позволит искажающим потребителям, вынужденно оплачивающим штраф за ухудшение КЭ, принять меры по установке средств нормализации ПКЭ (фильтров ВГ, симметрирующих устройств и др.), срок окупаемости которых, как показано в данной работе, даже при относительно низких тарифах на электроэнергию соответствует нормативному сроку окупаемости капиталовложений для энергетики

(около 8 лет). При этом штрафы за ухудшение КЭ исчезнут автоматически, как только параметры СЗ потребителя станут такими, что будет выполнено условие $U_{\text{П}}^{\text{авт.}} < U_{\text{иск. доп.}}$, и коэффициент его влияния станет отрицательным. Когда ЭСО установит групповое средство нормализации ПКЭ в ТОП или все искажающие потребители установят индивидуальные средства нормализации ПКЭ, предлагаемый подход будет устранен за ненадобностью, при этом автоматически перестанут взиматься штрафы. ПКЭ в ТОП в таком случае будет соответствовать требованиям ГОСТ 32144-2013.

Данный вывод в несколько иной форме подтверждает единственно обоснованный и логичный подход к нормализации ПКЭ – ограничение эмиссии токов искажения нелинейными и несимметричными нагрузками потребителей. В связи с этим, ввод в действие ГОСТ Р 72176-2025 создает нормативную основу для ограничения токов искажения и дает обоснованную надежду на системное улучшение ПКЭ в электрических сетях.

© Федосов Д.С., 2026

© Романова В.В., 2026

© Зубова Е.В., 2026

Поступила в редакцию 12.01.2026

Принята к публикации 12.01.2026

Received 16.02.2026

Accepted 16.02.2026

Библиографический список

- [1] Bai W., Zhuang G., Zhao X., Wei Z. High-precision intelligent identification of complex power quality disturbances based on improved KST and CNNs // IEEE Access. 2024. Vol. 12. С. 86434-86443. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3416684
- [2] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных ветрогенераторами // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2(62). С. 40-49. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-2-40-49
- [3] Kulikov A.L., Sevostyanov A.A., Plyushin P.V. Statistical sampling for power-quality monitoring in modern power-supply systems // Russian Electrical Engineering. 2022. Vol. 93, № 4. С. 254-260. DOI: 10.3103/S1068371222040071
- [4] Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Брежнев И.В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 2. С. 73-85. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86
- [5] Коверникова Л.И. [и др.]. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
- [6] Зубова Е.В., Федосов Д.С. Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку // Известия

- высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 3. С. 83-95. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95
- [7] Ray P., Ray P.K., Dash S.K. Power quality enhancement and power flow analysis of a PV integrated UPQC system in a distribution network // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Vol. 58, № 1. С. 201-211. DOI: 10.1109/TIA.2021.3131404
- [8] Pourarab M., Domianus O., Meyer J., Naef T., Rölli R., Ulrich M. Utilization of harmonic emission limits by customer installations in low and medium voltage networks // 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP); 2022; Naples, Italy. С. 1-6. DOI: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808630
- [9] Kusko A., Thompson M.T. Power quality in electrical systems. New York: McGraw-Hill, 2007. – 320 с.
- [10] Машкин А.Г., Якимов А.А., Машкин В.А. Ответственность за снижение качества электроэнергии. Обзор арбитражной практики // Новости электротехники. 2008. № 6(54). [Электронный ресурс]. URL: <https://news.elteh.ru/arh/2008/54/> (дата обращения 10.01.2026).
- [11] Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Качество электроэнергии. Анализ причин больших ущербов от низкого качества и рекомендации по их снижению // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 2. С. 81-87.
- [12] Балабанов А.М., Митрофанов С.В. Анализ эффективности систем СТАТКОМ в задачах повышения качества электроэнергии горнодобывающего предприятия // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 1(57). С. 68-79.
- [13] 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.
- [14] Федосов Д.С. Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети: дис. канд. техн. наук, ИргТУ, Иркутск, 2014. – 195 с.
- [15] Федотов А.И., Федотов Е.А., Чернова Н.В. Схемы замещения вентильных преобразователей для расчета гармоник тока и напряжения. Ч. II // Электричество. 2007. № 11. С. 38-45.
- [16] Федотов А.И., Чернова Н.В., Рылов Ю.А., Федотов Е.А. Схема замещения однофазного вентильного преобразователя для расчета гармоник тока // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 1-2. С. 94-99.
- [17] Баглейбгер О.И. Разработка математических моделей и методов для оценки влияния участников системы электроснабжения на качество электроэнергии: дис. канд. техн. наук, ИргТУ, Иркутск, 2006. – 213 с.
- [18] Федосов Д.С. Методы уменьшения погрешностей экспериментального определения параметров схем замещения потребителей на высших гармониках // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10(81). С. 254-261.
- [19] Tiguntsev S.G., Turdiev A.T., Akhmedov S.B. Research of the methodology for assessing the contribution of electricity supply participants to the quality of electric energy // Power Technology and Engineering. 2020. Vol. 54, № 4. С. 588-593. DOI: 10.1007/s10749-020-01256-1

- [20] Висящев А.Н., Каратаев Б.Н., Тигунцев С.Г., Федосов Д.С. Симметрирование режимов в системах электроснабжения железнодорожной тяги // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. № 1(46). С. 60-63.
- [21] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
- [22] Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Логачева А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23, № 3. С. 3-13. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13
- [23] Li Z., He Z., Song Y., Tang L., Wang Y. Stochastic assessment of harmonic propagation and amplification in power systems under uncertainty // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 36, № 2. С. 1149-1158. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3002890
- [24] Булагов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Кижин В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25, № 6. С. 3-13. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13
- [25] Wang Y., Zhou X., Tang J., Xiao X., Zhang S., Si J. Adaptive harmonic virtual impedance control for improving voltage quality of microgrids // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2024. Vol. 12, № 5. С. 1548-1558. DOI: 10.35833/MPCE.2023.000447
- [26] Domagk M., Blanco A.M., Meyer J., Todeschini G. Identification of equivalent impedance models of downstream networks for harmonic studies in extra high voltage systems // *21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2024, Chengdu, China*. С. 818-823. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768797
- [27] Namdev P., Singh R. Advances in power quality enhancement: a comprehensive review of custom power devices and mitigation strategies // *3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE), 2023, Wuhan, China*. С. 761-765. DOI: 10.1109/EPEE59859.2023.10352062
- [28] Shi S., Xiao M., Liu Y., Wang X., Lin S. Review of power quality standard system // *21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2024, Chengdu, China*. С. 677-683. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768767
- [29] Ivanova I.Yu., Shakirov V.A., Ivanov R.A. Feasibility of connecting consumers in isolated communities to the Irkutsk power system // *Energy Systems Research*. 2024. Vol. 7. С. 65-70. DOI: 10.25729/esr.2024.04.0008

References

- [1] W. Bai, G. Zhuang, X. Zhao and Z. Wei, “High-precision intelligent identification of complex power quality disturbances based on improved KST and CNNs”, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86434-86443, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3416684
- [2] Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov, A.V. Cherepanov and A.E. Kryukov, “Modeling the modes of traction power supply systems equipped with wind generators”, *Systems. Methods. Technologies*, no. 2(62), pp. 40-49, 2024 (in Russian). DOI: 10.18324/2077-5415-2024-2-40-49
- [3] A.L. Kulikov, A.A. Sevostyanov and P.V. Ilyushin, “Statistical sampling for power-quality monitoring in modern power-supply systems”, *Russian Electrical Engineering*, vol. 93, no. 4, pp. 254-260, 2022. DOI: 10.3103/S1068371222040071

- [4] V.I. Biryulin and D.V. Kudelina, "Model development for the analysis of reducing voltage asymmetry methods in power supply systems", *Power engineering: research, equipment, technology*, vol. 24, no. 2, pp. 73-85, 2022 (in Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86
- [5] L.I. Kovernikova et al., *Kachestvo elektricheskoy energii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ikh resheniyu [Electric power quality: current state, problems and solution proposals]*. Novosibirsk: Nauka, 2017 (in Russian).
- [6] E.V. Zubova and D.S. Fedosov, "Study of resonance conditions on higher harmonics in an electrical network supplying a nonlinear load", *Power engineering: research, equipment, technology*, vol. 26, no. 3, pp. 83-95, 2024 (in Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95
- [7] P. Ray, P.K. Ray and S.K. Dash, "Power quality enhancement and power flow analysis of a PV integrated UPQC system in a distribution network", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 201-211, 2022. DOI: 10.1109/TIA.2021.3131404
- [8] M. Pourarab, O. Domianus, J. Meyer, T. Naef, R. Rölli and M. Ulrich, "Utilization of harmonic emission limits by customer installations in low and medium voltage networks", in *proc. 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, Naples, Italy, 2022, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808630
- [9] A. Kusko, M.T. Thompson, *Power quality in electrical systems*. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [10] A.G. Mashkin, A.A. Yakimov and V.A. Mashkin, "Otvetstvennost' za snizhenie kachestva elektricheskoy energii. Obzor arbitrazhnoy praktiki [Liability for deterioration of power quality: a review of arbitration practice]", *Novosti elektrotehniki*, no. 6(54), 2008 (in Russian). [Online]. Available at: *Novosti elektrotehniki*, <https://news.elteh.ru/arl/2008/54/>.
- [11] G.Ya. Vagin, A.L. Kulikov and A.A. Sevostyanov, "Power quality. Causes of major damages from poor power quality and recommendations on damage reduction", *Energy Safety and Energy Economy*, no. 2, pp. 81-87, 2023 (in Russian).
- [12] A.M. Balabanov and S.V. Mitrofanov, "Analysis of the efficiency of STATCOM systems in improving the quality of electricity in a mining enterprise", *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, vol. 15, no. 1(57), pp. 68-79, 2023 (in Russian).
- [13] A.N. Visyashev and D.S. Fedosov, "Estimation of consumer impact on voltage distortion in electric network", *Electric power. Transmission and distribution*, no. 3(48), pp. 46-51, 2018 (in Russian).
- [14] D.S. Fedosov, "Razrabotka metoda otsenki vliyaniya potrebitelyey na nesinusoidal'nost' i nesimmetriyu napryazheniy v elektricheskoy seti [Development of a method for assessing consumer impact on voltage non-sinusoidality and asymmetry in electrical networks]", Cand. of Tech. Sc. thesis, Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia, 2014 (in Russian).
- [15] A.I. Fedotov, E.A. Fedotov and N.V. Chernova, "The equivalent circuits of switched converters for calculating current and voltage harmonics. Part 2", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 38-45, 2007 (in Russian).
- [16] A.I. Fedotov, N.V. Chernova, Yu.A. Rylov and E.A. Fedotov, "Equivalent circuit of a single-phase AC converter for calculation of harmonics of the current", *Power engineering: research, equipment, technology*, no. 1-2, pp. 94-99, 2006 (in Russian).
- [17] O.I. Bagleybter, "Razrabotka matematicheskikh modeley i metodov dlya otsenki vliyaniya uchastnikov sistemy elektrosnabzheniya na kachestvo elektricheskoy energii [Development

- of mathematical models and methods for assessing the impact of power supply system participants on power quality*”, Cand. of Tech. Sc. thesis, Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia, 2006 (in Russian).
- [18] D.S. Fedosov, “Error minimization methods of experimental determination of power consumer equivalent circuit parameters for higher harmonics”, *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, no. 10(81), pp. 254-261, 2013 (in Russian).
- [19] S.G. Tiguntsev, A.T. Turdiev and S.B. Akhmedov, “Research of the methodology for assessing the contribution of electricity supply participants to the quality of electric energy”, *Power Technology and Engineering*, vol. 54, no. 4, pp. 588-593, 2020. DOI: 10.1007/s10749-020-01256-1
- [20] A.N. Visyashev, B.N. Karataev, S.G. Tiguntsev and D.S. Fedosov, “*Simmetrirovaniye rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznodorozhnoy tyagi [Symmetrization of operating modes in railway traction power supply systems]*”, *Electric power. Transmission and distribution*, no. 1(46), pp. 60-63, 2018 (in Russian).
- [21] I.V. Zhezelenko, *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [Higher harmonics in industrial power supply systems]*, 6th ed. Moscow: Energoatomizdat, 2010 (in Russian).
- [22] E.Yu. Abdullazyanov, E.I. Gracheva, A.N. Gorlov, Z.M. Shakurova and A.G. Logacheva, “Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks”, *Power engineering: research, equipment, technology*, vol. 23, no. 3, pp. 3-13, 2021 (in Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13
- [23] Z. Li, Z. He, Y. Song, L. Tang and Y. Wang, “Stochastic assessment of harmonic propagation and amplification in power systems under uncertainty”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 1149-1158, 2021. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3002890
- [24] Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov and V.V. Kizhin, “Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality”, *Power engineering: research, equipment, technology*, vol. 25, no. 6, pp. 3-13, 2023 (in Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13
- [25] Y. Wang, X. Zhou, J. Tang, X. Xiao, S. Zhang and J. Si, “Adaptive harmonic virtual impedance control for improving voltage quality of microgrids”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 12, no. 5, pp. 1548-1558, 2024. DOI: 10.35833/MPCE.2023.000447
- [26] M. Domagk, A.M. Blanco, J. Meyer and G. Todeschini, “Identification of equivalent impedance models of downstream networks for harmonic studies in extra high voltage systems”, in proc. *21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Chengdu, China, 2024, pp. 818-823. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768797
- [27] P. Namdev, R. Singh, “Advances in power quality enhancement: a comprehensive review of custom power devices and mitigation strategies”, in proc. *3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE)*, Wuhan, China, 2023, pp. 761-765. DOI: 10.1109/EPEE59859.2023.10352062
- [28] S. Shi, M. Xiao, Y. Liu, X. Wang and S. Lin, “Review of power quality standard system”, in proc. *21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Chengdu, China, 2024, pp. 677-683. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768767

- [29] I.Yu. Ivanova, V.A. Shakirov and R.A. Ivanov, "Feasibility of connecting consumers in isolated communities to the Irkutsk power system", *Energy Systems Research*, vol. 7, pp. 65-70, 2024. DOI: 10.25729/esr.2024.04.0008

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Федосов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

Романова Виктория Викторовна, кандидат технических наук, доцент Забайкальского государственного университета, г. Чита; доцент филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Волжском, г. Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация.

Зубова Екатерина Васильевна, ассистент Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

Denis S. Fedosov, Cand. Sci. (Eng.), head of a chair of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Viktoriya V. Romanova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Trans-Baikal State University, Chita; associate professor of the Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation.

Ekaterina V. Zubova, assistant of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.