

УДК 621.316

EDN ZGDHUK

ОЦЕНКА ДОЛЕВЫХ ВКЛАДОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

А.Н. Скамьин

ORCID: 0000-0001-7738-7539 e-mail: skamin_an@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург, Россия

Предложено решение задачи по определению долевого вклада источников искажений в напряжении и токе при наличии подключенных в сети пассивных и активных фильтров гармоник. Приведена классификация существующих методов и способов определения долевого вклада источников искажений. Показано, что для большинства существующих способов определение долевого вклада при наличии скомпенсированных гармоник токов или напряжений в узле нагрузки затруднено. Предложен способ определения долевого вклада источников искажений на основе применения активных фильтров параллельного типа. Он позволяет оценить остаточный уровень гармоник в напряжении и токе при наличии подключенных фильтрокомпенсирующих устройств, что важно оценивать на этапе их эксплуатации для мониторинга изменения уровней высших гармоник в напряжении и токе, а также долевого вклада в случае модернизации или изменения состава нелинейной нагрузки у потребителя. Представлено математическое описание на основе аналитических исследований с применением метода наложения и схемы замещения на частотах высших гармоник. Получены выражения, позволяющие проводить оценку долевого вклада в напряжении при компенсации влияния внутренних источников искажений, а также долевого вклада в токе при компенсации влияния внешних источников искажений. Проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях при наличии распределенных нелинейных нагрузок и параллельного активного фильтра, способного компенсировать гармоники в токе и в напряжении. В качестве внешнего источника искажений применялся шестипульсный тиристорный выпрямитель, в качестве внутреннего источника искажений применялся тиристорный регулятор мощности без нулевого провода.

Ключевые слова: активный фильтр; высшие гармоники; долевого вклада; качество электроэнергии; несинусоидальность; пассивный фильтр.

Для цитирования: Скамьин А.Н. Оценка долевого вклада в электрических сетях с фильтрокомпенсирующими устройствами // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 1. С. 103-116. EDN ZGDHUK

ASSESSMENT OF HARMONIC SHARE CONTRIBUTIONS IN ELECTRIC NETWORKS WITH FILTER-COMPENSATING DEVICES

A.N. Skamyin

ORCID: 0000-0001-7738-7539 e-mail: skamin_an@pers.spmi.ru

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The paper proposes a solution to the problem of determining the harmonic contribution of distortion sources to voltage and current in the presence of passive and active harmonic filters connected to the grid. A classification of existing methods and techniques for determining the harmonic contributions of distortion sources is presented. It is shown that for most existing methods, determining the harmonic contributions in the presence of compensated harmonics of currents or voltages at the load node is difficult. A method for determining the harmonic contributions of distortion sources based on the application of parallel-type active harmonic filters is proposed. This method allows for estimating the residual level of harmonics in voltage and current in the presence of connected filter-compensating devices, which is important to assess at the stage of their operation for monitoring changes in the levels of voltage and current harmonics, as well as harmonic contributions in the event of modernization or changes in the composition of the nonlinear load at the consumer. A mathematical description is presented based on analytical studies using the superposition method and an equivalent circuit at harmonic frequencies. Expressions were derived for estimating the harmonic contributions to voltage when compensating for the influence of internal distortion sources, as well as the harmonic contributions to current when compensating for the influence of external distortion sources. Experimental studies were conducted under laboratory conditions with distributed nonlinear loads and a parallel active filter capable of compensating for harmonics in current and voltage. A six-pulse thyristor rectifier was used as an external distortion source, while a thyristor power regulator without a neutral conductor was used as an internal distortion source.

Keywords: active harmonic filter; harmonics; share contributions; power quality; non-sinusoidality; passive harmonic filter.

For citation: A.N. Skamyin, "Assessment of harmonic contributions in electric networks with filter-compensating devices", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 103-116, 2026. EDN ZGDHUK

I. Введение

В настоящее время осуществляется интенсивное внедрение полупроводниковых преобразовательных устройств в электрических сетях и электротехнических комплексах предприятий, что приводит к искажению форм напряжения и тока и появлению высших гармоник (ВГ) [1, 2]. При этом на

предприятиях в основном внедряются электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками, в том числе, электроприводы с преобразователями частоты, нагревательные устройства с регулируемыми тиристорными преобразователями, электровозный транспорт, электросварочные установки, светодиодные системы освещения и др. Со стороны электрических сетей внедряются источники электроэнергии на базе полупроводниковых устройств, в том числе, возобновляемые источники энергии, накопители электрической энергии и др. [3, 4]. Следует отметить, что со стороны электрических сетей гармонические искажения также возникают вследствие работы нелинейной нагрузки (НН) сторонних потребителей, подключенных в одну точку общего присоединения. В условиях наличия распределенных источников искажений в разных точках сети и на разных уровнях напряжения значительно усложняется оценка режимов ВГ и выбор параметров корректирующих устройств. При этом в настоящее время эту оценку необходимо проводить как в токе, так и в напряжении [5, 6], учитывая также оценку долевых вкладов источников искажений для понимания картины происхождения гармонических искажений в рассматриваемой точке сети. Проблеме выявления долевых вкладов источников искажений и оценке их влияния на потребителей посвящено большое количество как зарубежной, так и отечественной литературы [7-11]. Указанные задачи не теряют своей значимости на протяжении последних десятилетий. Основные методы определения долевых вкладов можно разделить на четыре основные группы, которые основаны на определении: потоков мощности на частотах ВГ [12-14], векторов тока и напряжения на частотах ВГ [15, 16], сопротивлений сети и потребителей на частотах ВГ [17-20], корреляции параметров электропотребления и качества электроэнергии [3, 21, 23]. Классификация таких методов представлена на рис. 1.

Большое количество работ базируется на анализе потоков мощности на частотах ВГ. Наиболее обоснованным и практичным является метод на основе анализа активной мощности ВГ [12, 13]. Однако он не позволяет корректно определить вклады потребителей в искажения напряжения и тока. К другим методам относятся: метод реактивной мощности, метод неактивной мощности, метод мощности искажений [9, 22], но они имеют ограниченное применение и недостаточную теоретическую обоснованность при несинусоидальных режимах работы сети.

Методы другой группы базируются на определении параметров сети и потребителей на частотах ВГ с применением метода активных двухполюсников [17, 18, 20]. В его допущениях отмечается, что необходимо изменение параметров сети или нагрузки для двух следующих друг за другом измерений для определения сопротивления на частотах ВГ, что используется при

определении долевых вкладов. При одновременном изменении таких параметров значительно возрастает погрешность метода.



Рис. 1. Классификация методов определения долевых вкладов источников искажений:

K_U – суммарный коэффициент гармонической составляющих напряжения,
 K_I – суммарный коэффициент гармонической составляющих тока, h – порядок ВГ,
 S_{load} – полная мощность нагрузки

Fig. 1. A classification of harmonic share contribution methods:

K_U – total harmonic distortion in voltage, K_I – total harmonic distortion in current,
 h – harmonic order, S_{load} – load apparent power

Известны работы, основанные на определении закономерностей изменения параметров электропотребления от показателей качества электроэнергии [3, 21]. Однако они не дают возможность оценки взаимосвязанных долевых вкладов по току и напряжению в процентном соотношении. Также существует ряд методов, суть которых основана на анализе векторов токов и напряжения на частотах ВГ [15, 16]. При этом линейная нагрузка в виде конденсаторных батарей может быть интерпретирована как источник искажений, что ведет к необъективной оценке вклада потребителей.

Общим недостатком для всех представленных методов является большая погрешность при определении долевых вкладов источников искажений при наличии подключенных в узле нагрузки фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). При этом значительно снижается вводной ток ВГ и напряжение ВГ в узле нагрузки, что используется при определении долевых вкладов во всех представленных методах. Сравнительный анализ различных методов показал, что многие из них определяют долевые вклады с большой погрешностью [24]. Такая оценка необходима, поскольку в рамках эксплуатации ФКУ может иметь место увеличение долевых вкладов источников ВГ при модернизации, реконструкции и изменении режимов работы НН.

Таким образом, представленный анализ показал, что в настоящее время не существует устоявшегося и однозначного метода выявления источника ВГ в сетях, что подчеркивает актуальность исследований в данной области. Целью данной работы является выявление закономерностей определения долевых вкладов источников искажений и разработка способа их оценки при наличии подключенных ФКУ.

II. Методы исследования

В работе проводятся аналитические исследования на основе построения схемы замещения электрической сети на частотах ВГ с применением метода наложения для расчета токов и напряжений. Результаты аналитических исследований подтверждаются на основе экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Таким образом, методология исследования состоит из следующих этапов.

1. Аналитические исследования по определению долевых вкладов на основе применения ФКУ.

В рамках данного этапа проводятся исследования по определению долевых вкладов источников искажений на основе применения ФКУ. При этом рассматриваются пассивные ФКУ шунтирующего типа и активные ФКУ параллельного типа. В работе [24] разработан способ на основе применения пассивных ФКУ шунтирующего типа, а также представлены экспериментальные исследования в лабораторных условиях. В рамках данной работы рассматриваются исследования при наличии подключенного активного ФКУ параллельного типа. Рассматриваемая схема замещения представлена на рис. 2.

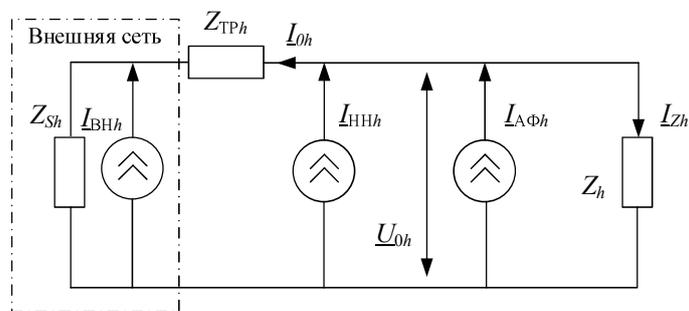


Рис. 2. Схема замещения сети с активным фильтром

Fig. 2. A circuit diagram with active harmonic filter

Приняты следующие обозначения: Z_{Sh} – сопротивление системы порядка h ; Z_{TPh} – сопротивление трансформатора порядка h ; Z_h – сопротивление линейной нагрузки порядка h ; U_{0h} – напряжение ВГ в узле нагрузки

порядка h ; I_{0h} – ток ВГ вводного присоединения узла нагрузки порядка h ; $I_{ВНh}$ – ток ВГ НН порядка h , подключенной во внешней сети; $I_{ННh}$ – ток ВГ НН порядка h , подключенной во внутренней сети; $I_{АФh}$ – ток ВГ активного фильтра порядка h .

При этом рассматриваются следующие допущения: НН представляется идеальным источником тока; активный фильтр параллельного типа представляется идеальным источником тока с компенсируемыми параметрами, равными значениям ВГ тока и напряжения внутренних и внешних НН; сопротивление системы на частоте компенсируемой ВГ значительно меньше сопротивления линейной нагрузки.

2. Экспериментальные исследования по определению долевых вкладов на основе применения параллельного активного фильтра.

В рамках данного этапа проводятся экспериментальные исследования по определению долевых вкладов источников искажений на основе применения параллельного активного фильтра. При этом активный фильтр компенсирует либо гармоники тока внутренней НН, либо гармоники напряжения, создаваемые внешней НН (за счет генерации тока ВГ, который создает падение напряжения на сопротивлении системы, противоположное напряжению ВГ внешней НН). Исследования данного этапа проводятся на лабораторном стенде (рис. 3).

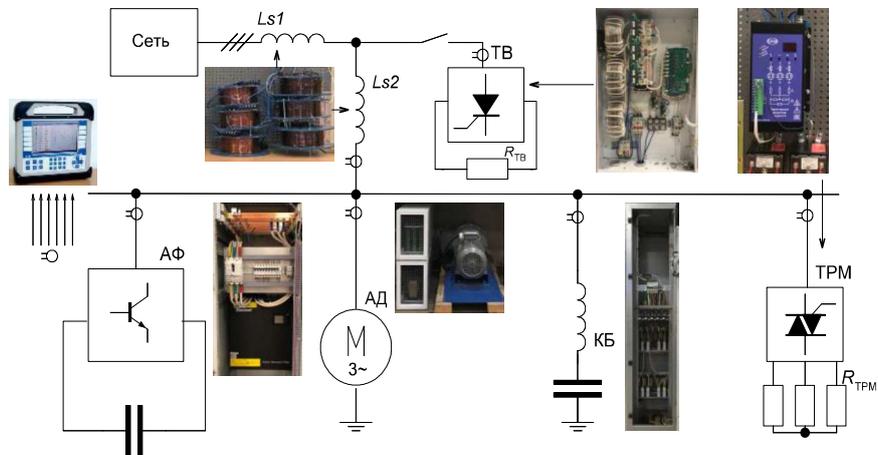


Рис. 3. Схема лабораторного стенда с активным фильтром

Fig. 3. A laboratory test bench with active harmonic filter

Параметры оборудования представлены в табл. 1.

Таблица 1.
 Параметры оборудования стенда

Table 1.
 The equipment parameters of the laboratory test bench

Элемент схемы	Параметры и значения
Сеть	$U_0 = 0,4$ кВ, $L_{S1} = 1,1$ мГн
Эквивалентное сопротивление	$L_{S2} = 4,0$ мГн
Асинхронный двигатель (АД)	$P_{АД} = 0,75$ кВт, $Q_{АД} = 1,5$ квар, $U_{АД} = 220/380$ В
Тиристорный выпрямитель (ТВ)	$U_{ТВ} = 220/380$ В, $S_{ТВ} = 5,4$ кВА, $m = 6$
Тиристорный регулятор (ТРМ)	$U_{ТРМ} = 220/380$ В, $S_{ТРМ} = 2,5$ кВА
Конденсаторная установка (КБ)	$Q_{КБ} = 0,5$ квар, частота расстройки – 134 Гц
Активный фильтр (АФ)	тип АФК-У5-400-150-IP21-УХЛ4

В рамках эксперимента моделировались три режима, которые включают подключение внутренних и внешних НН, подключение АД и КБ, а также режимы работы активного фильтра: без подключения, с компенсацией гармоник тока (КГТ), с компенсацией гармоник напряжения (КГН). Токоизмерительные цепи активного фильтра подключены на вводное присоединение узла нагрузки. Измерения параметров электропотребления и качества электроэнергии проводились с помощью анализатора качества электроэнергии Ресурс PQA с периодом осреднения 3 с.

III. Результаты исследования

В соответствии с указанными этапами работы были получены следующие результаты.

1. Аналитические исследования по определению долевых вкладов на основе применения ФКУ.

В соответствии со схемой замещения, представленной на рис. 2 в общем виде можно записать:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{0h} &= \underline{I}_{ВНh} \cdot Z_{Sh} \cdot A + \underline{I}_{ННh} \cdot Z_{СТPh} \cdot A + \underline{I}_{АФh} \cdot Z_{СТPh} \cdot A; \\ \underline{I}_{0h} &= -\underline{I}_{ВНh} \cdot Z_{Sh} \cdot A / Z_h + \underline{I}_{ННh} \cdot A + \underline{I}_{АФh} \cdot A; \\ A &= Z_h / (Z_h + Z_{Sh} + Z_{ТPh}), Z_{СТPh} = Z_{Sh} + Z_{ТPh}. \end{aligned}$$

При компенсации гармоник тока ($\underline{I}_{АФh} = -\underline{I}_{ННh}$):

$$\underline{U}_{0h} = \underline{I}_{ВНh} \cdot Z_{Sh} \cdot A, \underline{I}_{0h} = -\underline{I}_{ВНh} \cdot Z_{Sh} / (Z_{СТPh} + Z_h).$$

При отсутствии линейной нагрузки в виде Z_h напряжение ВГ в узле нагрузки $\underline{U}_{0h} = \underline{U}_{Sh}$, а ток ВГ вводного присоединения узла нагрузки $\underline{I}_{0h} = 0$. Практически, при $Z_h / Z_{Sh} \geq 20$ погрешность расчета напряжения ВГ в узле нагрузки не превышает 5 %, а ток ВГ вводного присоединения узла нагрузки

принимает очень малое значение в сравнении со значением до компенсации ВГ с помощью активного фильтра. Кроме этого, с помощью активного фильтра можно компенсировать ток ВГ вводного присоединения узла нагрузки (его значение близко к значению тока НН на частотах ВГ), что приводит к тому, что $\underline{U}_{0h} = \underline{U}_{Sh}$, $\underline{I}_{0h} = 0$.

Тогда долевым вкладом внешней НН в напряжение ВГ узла нагрузки можно рассчитать по следующему выражению:

$$D_{ВНh} = U_{0h_КГТ} / U_{0h}, \quad (1)$$

где $U_{0h_КГТ}$ – напряжение ВГ в узле нагрузки при КГТ с помощью активного фильтра; U_{0h} – напряжение ВГ в узле нагрузки до подключения активного фильтра.

При компенсации гармоник напряжения в узле нагрузки ($\underline{I}_{АФh} = -(\underline{I}_{ННh} + \underline{I}_{ВНh} \cdot Z_{Sh} / Z_{СТPh})$) получается, что:

$$\underline{U}_{0h} = 0, \underline{I}_{0h} = -\underline{I}_{ВНh} \cdot Z_{Sh} / Z_{СТPh} = \underline{U}_{Sh} / Z_{СТPh}.$$

При этом токи ВГ всех присоединений с линейной нагрузкой становятся равными нулю вследствие того, что $\underline{U}_{0h} = 0$. Тогда разность токов ВГ вводного присоединения и активного фильтра при КГН равна эквивалентному гармоническому току всех внутренних НН. При этом долевым вкладом внутренних НН в суммарный ток ВГ всех НН можно рассчитать по следующему выражению:

$$D_{ННh} = I_{ННh} / I_{\Sigma ННh_КГН}, I_{\Sigma ННh_КГН} = |\underline{I}_{0h} - \underline{I}_{АФh}|, \quad (2)$$

где $I_{\Sigma ННh_КГН}$ – суммарный ток ВГ всех внутренних НН при КГН.

Таким образом, по выявленным выражениям можно определить вклад внешних источников искажений в напряжение ВГ в узле нагрузки при компенсации влияния внутренних НН, а также вклад внутренних источников искажений в ток ВГ в узле нагрузки при компенсации влияния внешних НН. Проведение такого рода измерений способствует выявлению изменений долевого вклада распределенных источников искажений на этапе эксплуатации ФКУ.

2. Экспериментальные исследования по определению долевого вклада на основе применения параллельного активного фильтра.

Для подтверждения работоспособности способа с применением активного фильтра, реализующего метод с применением ФКУ, был проведен эксперимент в лабораторных условиях в соответствии со схемой на рис. 3. В табл. 2 представлены результаты измерений для различных режимов работы оборудования для порядка гармоники $h = 5$.

Таблица 2.
Результаты измерений для различных режимов работы стенда

Table 2.
The results of the laboratory test bench measurements

Оборудование	U_{0h} , В	I_{0h} , А	$I_{\Delta\Phi_{КГТh}}$, А	$I_{\Delta\Phi_{КГНh}}$, А	$D_{ТВ}$, %	$D_{ТРМ}$, %	$D_{КБ}$, %	$D_{\Delta\Phi}$, %
Режим 1								
ТВ вкл.	11,51	0,79	–	–	–	–	–	–
ТРМ вкл.								
АФ выкл.								
Режим 2								
ТВ вкл.	6,17	0,06	0,91	–	53,6	46,4	–	–
ТРМ вкл.								
АФ _{КГТ} вкл.								
Режим 3								
ТВ вкл.	0,27	0,78	–	1,78	–	100	0	0
ТРМ вкл.								
АФ _{КГН} вкл.								

Для наглядного представления результатов был построен график (рис. 4) для различных режимов работы оборудования, исходя из данных в табл. 2.

В режиме без активного фильтра создаются гармоники внутренними и внешними НН, которые достигают 11,5 В и 0,8 А в узле нагрузки. При работе активного фильтра в режиме КГТ компенсируется ток 5 гармоники, что приводит к снижению тока ВГ вводного присоединения узла нагрузки до 0,06 А. При этом напряжение ВГ в узле нагрузке составляет 6,17 В, что и является вкладом внешней НН в напряжение ВГ в узле нагрузки (составляет 53,6 % от напряжения ВГ в узле нагрузки до КГТ). Следовательно, 46,4 % – долевой вклад внутренних НН в напряжение ВГ в узле нагрузки. В режиме 3 параллельный активный фильтр работает в режиме КГН, что приводит к снижению уровня напряжения ВГ в узле нагрузки до 0,27 В, при этом ток ВГ вводного присоединения равен 0,78 А, что необходимо для создания компенсационного падения напряжения на индуктивности сети и исключения влияния внешней НН. Ток ВГ параллельного активного фильтра равен 1,78 А. Разность тока ВГ вводного присоединения и тока ВГ активного фильтра составляет около 1 А. Ток тиристорного регулятора мощности также равен 1 А на частоте 5 гармоники. Следовательно, его долевой вклад в суммарный ток НН равен 100 %, долевой вклад остальных присоединений узла нагрузки – 0 %. Тогда ТРМ вносит 100 % вклад в 46,4 % напряжения ВГ в узле нагрузки.

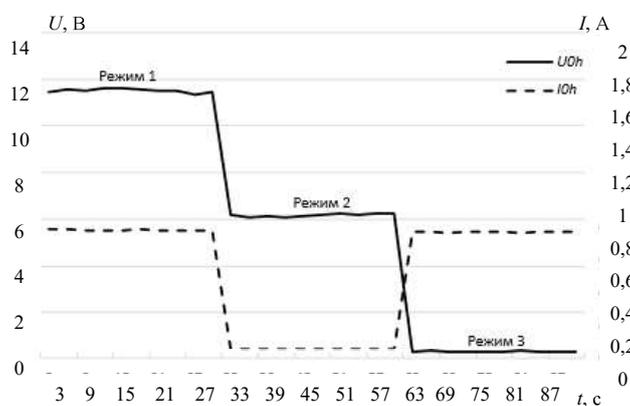


Рис. 4. Токи и напряжения ВГ в узле нагрузки для различных режимов работы активного фильтра

Fig. 4. Harmonic current and voltage for different modes of active harmonic filter

IV. Заключение

В работе проведен анализ существующих методов определения доле-вых вкладов. Показано, что определение доле-вых вкладов источников искажений существующими методами затруднено при наличии подключенных ФКУ, что определяется скомпенсированными значениями токов и напряжений ВГ в узле нагрузки. Представлен способ оценки доле-вого вклада источников искажений при наличии подключенных ФКУ. Предложены выражения для определения доле-вых вкладов при подключенном активном фильтре, способном компенсировать гармоники в токе и в напряжении. Подтверждение работоспособности способа проведено в рамках лабораторных исследований при наличии внешних и внутренних источников искажений. При этом определены значения токов и напряжений ВГ, которые остаются нескомпенсированными при отдельной компенсации гармоник тока и напряжения с помощью активного фильтра. Применение предложенного способа на основе активного фильтра параллельного типа возможно в электрических сетях, где присутствуют уже подключенные фильтры такого рода для снижения уровня ВГ (наиболее частое применение – сети 0,4-10 кВ). В рамках их эксплуатации изменение состава или модернизация НН приводит к снижению эффективности работы фильтра. При этом предложенные выражения позволяют использовать активный фильтр в режимах, при которых появляется возможность отдельной оценки доле-вых вкладов внешних и внутренних источников искажений для последующего анализа и принятия решений по нормализации режимов ВГ.

© Скамьин А.Н., 2026

Поступила в редакцию 29.12.2025

Принята к публикации 29.12.2025

Received 15.01.2026

Accepted 15.01.2026

Библиографический список

- [1] Коверникова Л., Тульский В., Шамонов Р. Качество электроэнергии в ЕЭС России. Текущие проблемы и необходимые решения // *Электроэнергия/ Передача и распределение*. 2016. № 2 (35). С. 28–38.
- [2] Соснина Е.Н., Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А. Тиристорное вольтодобавочное устройство для снижения колебаний напряжения в системах электроснабжения горно-рудных предприятий // *Записки Горного института*. 2025. Т. 272. С. 159-170.
- [3] Карташев И.И., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии. М.: МЭИ, 2017. – 347 с.
- [4] Аккад А.Ф., Соснина Е.Н. Применение нечеткой логики 2-го типа для управления D-STATCOM в ГЭС с ВИЭ // *Интеллектуальная электротехника*. 2025. № 4. С. 4-22.
- [5] ГОСТ Р 72176-2025. Электромагнитная совместимость. Нормы гармонических составляющих и составляющих обратной последовательности тока в сетях общего назначения среднего и высокого напряжения. Введ. 2025–08–01. М.: ФГБУ «РСТ», 2025. – 24 с.
- [6] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [7] Карташев И.И., Пономаренко И.С., Сыромятников С.Ю., Гук Л.Л. Способ инструментального выявления источников искажения напряжения и определения их влияния на качество электроэнергии // *Электричество*. 2001. № 3. С. 2-7.
- [8] Афанасенко А.С., Федосов Д.С. Оценка влияния потребителей и энергоснабжающей организации на искажение напряжения в точке общего присоединения // *Вестник ИрГТУ*. 2011. № 11 (58). С. 190-193.
- [9] Barbaro P.V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. A novel approach based on non-active power for the identification of disturbing loads in power systems // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. № 22 (3). P. 1782-1789. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899624
- [10] Kasemuana S.M., De Beer A.S., Pretorius J.H.C. A practical method to identify contributions of harmonics in power systems: Method and application // *International Review of Electrical Engineering*. 2021. № 16 (4). P. 304-315. DOI: 10.15866/iree.v16i4.19194
- [11] Pfajfar T., Blazic B., Papic I. Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. № 23 (1). P. 425-433. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.911165

- [12] Коверникова Л. И., Суднова В.В., Шамонов Р. Г. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению. Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
- [13] Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети // *Электричество*. 1996. № 1. С. 58-64.
- [14] Смирнов С. С. Свойства активных мощностей гармоник искажающих нагрузок // *Электричество*. 2010. № 9. С. 45-49.
- [15] Pourarab M., Meyer J., Stiegler R. Assessment of harmonic contribution of a photovoltaic installation based on field measurements // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2017. № 1(15). P. 865-870. DOI: 10.24084/repqj15.498
- [16] Shklyarskiy Y., Dobush I., Carrizosa M.J., Dobush V., Skamyin A. Method for evaluation of the utility's and consumers' contribution to the current and voltage distortions at the PCC // *Energies*. 2021. № 14 (24). P. 8416. DOI: 10.3390/en14248416
- [17] Булычева Е.А., Кулешова Г.С., Янченко С.А. Идентификация высших гармоник в реальном времени в электрических сетях с переменным режимом работы // *Промышленная энергетика*. 2020. № 10. С. 28-38. DOI: 10.34831/EP.2020.62.73.004
- [18] Висящев А. Н., Тигунцев С. Г. Влияние потребителей на искажение напряжения // *Электрические станции*. 2002. № 7. С. 26-31.
- [19] Тульский В.Н., Дворкин Д.В., Силаев М.А., Палис Ш. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // *Электричество*. 2017. № 7. С. 12-19.
- [20] Янченко С.А., Булычева Е.А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 1. Методы отклонений измеряемых величин // *Промышленная энергетика*. 2019. № 6. С. 42-52.
- [21] 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. № 20 (3). С. 147-154.
- [22] Stošović M.A., Stevanović D.S., Petković P.M. Application of a standard power meter for detection source of harmonic pollution and reducing economic losses at power grid // *Electric Power Components and Systems*. 2020. № 48 (2). P. 42-55. DOI: 10.1080/15325008.2020.1731879
- [23] Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов // *Записки Горного института*. 2025. Т. 275. С. 5-17. EDN HPZAGK.
- [24] Skamyin, A. Method for determining the harmonic contribution of consumer installations based on the application of passive filters // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2024. № 18 (14). P. 2464-2479. DOI: 10.1049/gtd2.13209

References

- [1] L. Kovernikova, V. Tul'skiy and R. Shamonov, "Kachestvo ehlektroehnergii v EES Rossii. Tekushchie problemy i neobkhodimye resheniya [Power quality in the unified energy system of russia: current issues and necessary solutions]", *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 35, pp. 28–38, 2016 (in Russian).

-
- [2] E.N. Sosnina, A.A. Asabin, R.S. Bedretdinov, E.V. Kryukov, D.A. Gusev, “Thyristor booster device for voltage fluctuation reduction in power supply systems of ore mining enterprises,” *Journal of Mining Institute*, vol. 272, pp. 159-170, 2025.
- [3] I.I. Kartashev, V. N. Tul'skij, R. G. Shamonov, Y.V. Sharov and R.R. Nasyrov, *Upravlenie kachestvom ehlektroehnergii [Power quality management]*. Moscow: MPEI, 2017 (in Russian).
- [4] A.F. Akkad and E.N. Sosnina, “Application of type 2 fuzzy logic for D-STATCOM control in distributed energy networks with renewable energy sources”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 4, pp. 4-22, 2025.
- [5] Electromagnetic compatibility. Limits for harmonic current and negative sequence current emissions in the public electrical networks of medium and high voltage, GOST 72176-2025, August 2025.
- [6] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [7] I. I. Kartashev, I. S. Ponomarenko, S. Y. Syromyatnikov and L. L. Guk, “Sposob instrumental'nogo vyyavleniya istochnikov iskazheniya napryazheniya i opredeleniya ikh vliyaniya na kachestvo ehlektroehnergii [A method for identifying sources of voltage distortion and determining their impact on the power quality]”, *Ehlektrichestvo*, vol. 3, pp. 2-7, 2001 (in Russian).
- [8] A.S. Afanasenko and D.S. Fedosov, “Assessment of the influence of consumers and a power supplying organization on voltage distortion at the point of common connection”, *Vestnik IRGTU*, vol. 11, no. 58, pp. 190-193, 2011.
- [9] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino and S. Nuccio, “A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1782–1789, Jul. 2007. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899624.
- [10] S.M. Kasemuana, A.S. De Beer and J.H.C. Pretorius, “A practical method to identify contributions of harmonics in power systems: Method and application,” *International Review of Electrical Engineering*, vol. 16, no. 4., pp. 304-315, 2021. DOI: 10.15866/iree.v16i4.19194.
- [11] T. Pfajfar, B. Blazic and I. Papic, “Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 425-433, 2008. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.911165.
- [12] L. I. Kovernikova, V.V. Sudnova, R. G. Shamonov, *Kachestvo ehlektricheskoy ehnergii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ikh resheniyu [Power quality: current status, problems and proposals for their solutions]*. Novosibirsk: Nauka, 2017 (in Russian).
- [13] S. S. Smirnov and L. I. Kovernikova, “Vklad potrebitelya v urovni napryazheniya vysshikh garmonik v uzlakh ehlektricheskoy seti [Consumer contribution to the harmonic voltage levels in the nodes of the electrical grid],” *Ehlektrichestvo*, vol. 1, pp. 58-64, 1996 (in Russian).
- [14] S. S. Smirnov, “Svoystva aktivnykh moshchnostej garmonik iskazhayushchikh nagruzok [Properties of active harmonic powers of distorting loads]”, *Ehlektrichestvo*, vol. 9, pp. 45-49, 2010 (in Russian).
- [15] M. Pourarab, J. Meyer, and R. Stiegler, “Assessment of harmonic contribution of a photovoltaic installation based on field measurements,” *Renewable Energy and*

- Power Quality Journal*, vol. 1, no. 15, pp. 865–870, Apr. 2017. DOI: 10.24084/repqj15.498.
- [16] Y. Shklyarskiy, I. Dobush, M.J. Carrizosa, V. Dobush and A. Skamyin, “Method for evaluation of the utility’s and consumers’ contribution to the current and voltage distortions at the PCC,” *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8416, 2021. DOI: 10.3390/en14248416.
- [17] E.A. Bulycheva, G.S. Kuleshova and S.A. Yanchenko, “Real-time identification of harmonics in electrical networks with variable operating mode”, *Industrial power engineering*, vol. 10, pp. 28-38, 2020. DOI: 10.34831/EP.2020.62.73.004
- [18] A. N. Visyashchev and S. G. Tiguncev, “Vliyaniye potrebitel’ na iskazheniye napryazheniya [The influence of consumers on voltage distortion]”, *Ehlektricheskie stancii [Electrical stations]*, vol. 7, pp. 26-31, 2002.
- [19] V.N. Tul’skiy, D.V. Dvorkin, M.A. Silaev and S.H. Palis, “Problemy ocenki vklada potrebitelya v iskazheniye kachestva ehlektroehnergii [Problems of assessing the consumer's contribution to the power quality distortion]”, *Ehlektrichestvo*, vol. 7, pp. 12-19, 2017 (in Russian).
- [20] E. A. Bulycheva and S.A. Yanchenko, “Analysis of modern methods for determining the harmonic contribution. Part 1. Methods of deviations of measured values”, *Industrial power engineering*, vol. 6, pp. 42-52, 2019.
- [21] M.A. Dzyuba and V.I. Safonov, “Vklad pitayushchey seti i promyshlennogo predpriyatiya v kachestvo ehlektroehnergii v tochke postavki ehlektroehnergii [The contribution of the power grid and industrial enterprise to the power quality at the supply point]”, *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, vol. 20, no. 3, pp. 147-154, 2022 (in Russian).
- [22] M.A. Stošović, D.S. Stevanović and P.M. Petković, “Application of a standard power meter for detection source of harmonic pollution and reducing economic losses at power grid,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 42-55, 2020. DOI: 10.1080/15325008.2020.1731879.
- [23] Y.L. Zhukovskiy and P.K. Suslikov, “Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods,” *Journal of Mining Institute*, vol. 275, pp. 5-17, 2025.
- [24] Skamyin, A. “Method for determining the harmonic contribution of consumer installations based on the application of passive filters,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 18, no. 14, pp. 2464-2479, 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13209.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Скамьин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Aleksandr N. Skamyin, C. Sci. (Eng.), associate professor of the Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.