



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414>

Оценка эффективности метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений

Евгений Олегович Анненков¹, Екатерина Васильевна Зубова²,
Алексей Спартакович Селезнев³, Денис Сергеевич Федосов⁴

¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

¹kejo@yandex.ru

²zubova@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0914-2027>

³seleznevas.ru@mail.ru

⁴fedosov_ds@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>

Резюме. Целью работы является анализ корректности применения метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих. Исследования проведены на имитационной модели точки общего присоединения в MATLAB Simulink, включающей в себя искажающую нагрузку в виде трехфазного выпрямителя, неискажающую линейную нагрузку и обобщенную энергосистему без источников искажений. Параметры схемы замещения в виде активных двухполюсников, состоящих из источника тока искажения и проводимости, определялись с помощью метода двух измерений параметров режима. Рассмотрены режимы с изменением активных и реактивных мощностей исследуемой искажающей нагрузки и нагрузок во внешней электрической сети. Установлено, что результаты определения параметров схемы замещения при изменении мощности нагрузки на 20% и более являются нестабильными (разброс до 400% от фактических значений). Следовательно, данные значения параметров не являются достоверными, так как зависят от величины мощности внешней нагрузки. Вместе с тем имитация случайного изменения параметров нагрузок в пределах 10% от начального значения позволила корректно определить параметры схемы замещения. Показано, что схема замещения неискажающей линейной нагрузки всегда состоит только из проводимости, в то же время в схеме замещения искажающей нагрузки может присутствовать ненулевая проводимость на рассматриваемой гармонической составляющей. Таким образом, установлено, что метод двух измерений будет давать приемлемые по точности результаты (отклонение от фактических значений менее 1%) не при разовом изменении параметров режима на существенную величину, а при непрерывном контроле малых естественных изменений параметров режима электроэнергетической системы. Результаты исследования представляют интерес при решении задачи оценки влияния потребителей на качество электроэнергии в реальном времени, поскольку исходными данными для последней задачи являются параметры схемы замещения.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, метод двух измерений, метод эквивалентного генератора, схема замещения, активный двухполюсник, MATLAB Simulink

Финансирование: Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FZZS-2020-0039).

Для цитирования: Анненков Е. О., Зубова Е. В., Селезнев А. С., Федосов Д. С. Оценка эффективности метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 401–414. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414>.

Effectiveness of the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components of currents and voltages

Evgeniy O. Annenkov¹, Ekaterina V. Zubova², Aleksey S. Seleznev³, Denis S. Fedosov^{✉4}

¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹kejo@yandex.ru

²zubova@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0914-2027>

³seleznevas.ru@mail.ru

⁴fedosov_ds@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>

Abstract. The feasibility of applying the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components is analyzed. Experiments were carried out using a MATLAB Simulink model of the common coupling point that includes a distorting load in the form of a three-phase rectifier, a nondistorting linear load and a generalized power system without distortion sources. The parameters of an equivalent circuit in the form of active bipoles, consisting of current distortion and conductivity sources, were determined using the method of two measurements of mode parameters. Modes with variations in the active and reactive power of the studied distorting load and loads in the external electrical network were considered. The results of determining the equivalent circuit parameters under 20% and more variations in the power loading were established to be unstable (400% dispersion of actual values). Therefore, these parameter values appear to be unreliable due to their dependence on the value of external load power. At the same time, the simulation of random variations in loading parameters within 10% of the initial value allowed the parameters of an equivalent circuit to be correctly determined. It was shown that the equivalent circuit of a nondistorting linear load consists solely of conductivity, while the equivalent circuit of a distorting load can contain non-zero conductivity on the considered harmonic component. Thus, according to the performed study, the method of two measurements produces the results acceptable in terms of accuracy (deviation from actual values of less than 1%) not at a single significant variation in the mode parameters, but during a continuous monitoring of small natural variations in the parameters of the electric power system. The results obtained can be used when solving the problem of online assessing the effect of loads on the quality of electricity, since the initial data for this problem include the equivalent circuit parameters.

Keywords: electric power quality, voltage waveform distortion, higher harmonics, two-measurement method, Thévenin's theorem, equivalent circuit, active one-port device, MATLAB Simulink

Funding: The research was carried out with the financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZZS-2020-0039).

For citation: Annenkov E. O., Zubova E. V., Seleznev A. S., Fedosov D. S. Effectiveness of the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components of currents and voltages. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):401-414. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414>.

ВВЕДЕНИЕ

Рост числа и мощности нелинейных (искажающих) нагрузок в энергосистемах ведет к ухудшению качества электроэнергии [1, 2]. Несоответствие показателей качества электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013⁵ приводит к увеличению потерь электроэнергии и мощности, сокращению срока службы электрооборудования и преждевременному выходу его из строя, что наносит существен-

ный экономический ущерб для энергосистемы [1, 3].

Улучшить ситуацию с качеством электроэнергии можно за счет применения организационных и технических мероприятий, предполагающих установку активных и пассивных фильтров гармоник [4], рассредоточение искажающих нагрузок, применение специальных схемных решений. Для реализации любого из перечисленных мероприятий требу-

⁵ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. от 25.03.2013. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2014.

ется информация о параметрах схем замещения искажающих и неискажающих нагрузок на высших гармонических составляющих. Получить параметры схем замещения можно расчетным путем, однако это применимо только для единичных электроприемников с известными номинальными и режимными параметрами.

Если же рассматривается обобщенная нагрузка, состав и количество электроприемников которой неизвестны и/или постоянно меняются во времени, то единственным вариантом получения параметров схемы замещения являются экспериментальные методы, использующие периодические или непрерывные измерения параметров режима: токов и напряжений высших гармонических составляющих [5, 6].

Наиболее распространенным считается экспериментальный метод, имеющий условное название «метод двух измерений» или «метод двух режимов» [6–8]. Названный метод детально описан как в отечественных специализированных источниках [6, 8, 9], так и за рубежом [7, 10], есть примеры его применения [7, 11]. Однако ни в одной из перечисленных работ нет явного ответа на следующие вопросы: какова проводимость у искажающей нагрузки в схеме замещения для n -й гармонической составляющей и являются ли параметры схемы замещения, полученные методом двух измерений, автономными, т.е. не зависящими от режима внешней электрической сети.

Целью данной работы и является получение ответов на данные вопросы. В исследовании поставлены следующие задачи:

- 1) провести анализ метода эквивалентного генератора и схемы замещения в виде активного двухполюсника для представления искажающих нагрузок;
- 2) разработать модель точки общего присоединения в MATLAB Simulink и провести имитационное моделирование для определения параметров схем замещения;
- 3) выполнить анализ результатов определения параметров схемы замещения методом двух измерений при различных изменениях параметров режима.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа влияния обобщенных нагрузок на уровень n -х гармонических составляющих, получаемых в результате разложения токов и напряжений в ряд Фурье [12], широко используется метод эквивалентного генератора [13]. Согласно этому методу, сложные электрические цепи заменяются простой схемой замещения в виде источника электродвижущей силы (ЭДС) и сопротивления, включенными последовательно (рис. 1 а), либо источника тока и проводимости, включенными параллельно (рис. 1 б).

Совокупность источника ЭДС $\dot{E} = \dot{U}$ и сопротивления Z на рис. 1 а можно рассматривать как некоторый эквивалентный генератор, где Z является его внутренним сопротивлением, а напряжение U – величиной его ЭДС. Метод расчета тока в выделенной ветви, основанный на замене активного двухполюсника эквивалентным генератором, принято называть «методом эквивалентного генератора» (активного двухполюсника), а также «методом холостого хода» и «методом короткого замыкания» [13].

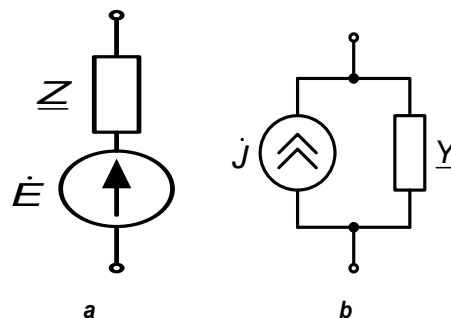


Рис. 1. Упрощенная схема замещения в виде последовательно соединенных источника электродвижущей силы и сопротивления (а) или источника тока и проводимости, включенных параллельно (б)

Fig. 1. Simplified equivalent circuit in the form of the source of electromotive force and impedance connected in series (a) or a current source and conductivity connected in parallel (b)

Для экспериментального определения входного сопротивления активного двухполюсника необходимо измерить напряжение холостого хода на зажимах разомкнутой ветви \dot{U} и ток короткого замыкания \dot{I}_k ветви, а

затем найти сопротивление \underline{Z} : $\underline{Z} = \dot{U} / \dot{i}_k$.

При анализе несинусоидальных режимов более распространенными являются схемы замещения в виде источника тока \underline{j} и проводимости \underline{Y} на рис. 1 б. Параметры данной схемы замещения могут быть получены по выражениям:

$$\underline{j} = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}}; \quad \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}, \quad (1)$$

где \underline{j} – ток искажения для n -й гармонической составляющей, который характеризует наличие у рассматриваемого электроприемника нелинейных элементов, искажающих форму напряжения; \underline{Y} – проводимость для n -й гармонической составляющей, отображающая наличие линейных нагрузок на рассматриваемом присоединении.

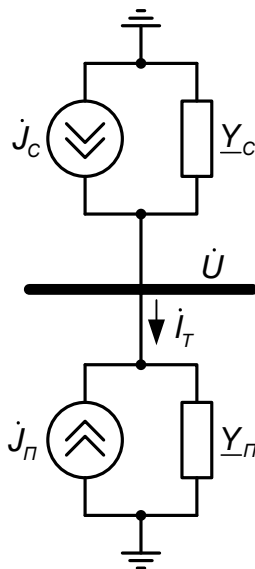


Рис. 2. Преобразованная схема замещения субъектов, подключенных к точке общего присоединения: J_n и Y_n – параметры схемы замещения нагрузок рассматриваемого потребителя, J_c и Y_c – параметры схемы замещения внешней энергосистемы и прочих нагрузок

Fig. 2. Modified equivalent circuit of subjects connected to the point of common coupling: J_n and Y_n – parameters of the equivalent circuit for considered consumer loads, J_c and Y_c – parameters of the equivalent circuit of external power system and other loads

Данные параметры схемы замещения двухполюсника (ток искажения \underline{j} и проводи-

мость \underline{Y}) могут быть также найдены по известному методу двух измерений [7–10]. На рис. 2 представлена упрощенная схема замещения точки общего присоединения, где \underline{j}_n и \underline{Y}_n – ток искажения и проводимость нагрузок исследуемого потребителя на n -й гармонической составляющей, \underline{j}_c и \underline{Y}_c – эквивалентные ток искажения и проводимость элементов остальных участников эквивалентной энергосистемы на n -й гармонической составляющей (питающей сети и иных потребителей, подключенных к данной точке общего присоединения) [14]. В схеме на рис. 2 представляется возможным измерять только два независимых параметра режима: напряжение искажения n -й гармонической составляющей в точке общего присоединения \dot{U} и ток искажения n -й гармонической составляющей \dot{i}_T на присоединении потребителя.

Если измерить указанные параметры \dot{U} и \dot{i}_T в два различных момента времени, то, согласно [11], можно рассчитать экспериментальные значения тока искажения и проводимости по выражениям:

$$j_{\text{экс}} = \frac{\dot{U}' \dot{i}_T'' - \dot{U}'' \dot{i}_T'}{\dot{U}'' - \dot{U}'}; \quad Y_{\text{экс}} = \frac{\dot{i}_T'' - \dot{i}_T'}{\dot{U}'' - \dot{U}'}, \quad (2)$$

где \dot{U}' и \dot{i}_T' – напряжение искажения в точке общего присоединения и ток искажения, текущий от точки общего присоединения к потребителю при первом измерении; \dot{U}'' и \dot{i}_T'' – те же величины при втором измерении. Для двух измерений параметров режима возможны следующие четыре варианта [11]:

Вариант 1. За период времени между измерениями изменились параметры схемы замещения внешней системы \underline{j}_c и/или \underline{Y}_c , а параметры схемы замещения исследуемого потребителя \underline{j}_n и \underline{Y}_n остались неизменными. Из закона Ома и первого закона Кирхгофа для рис. 2 следует, что $\dot{i}_T = \dot{U} \underline{Y}_n - \underline{j}_n$. Тогда:

$$j_{\text{эсп}} = \frac{\dot{U}'(\dot{U}''\underline{Y}_n - j_n) - \dot{U}''(\dot{U}'\underline{Y}_n - j_n)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} =$$

$$= \frac{\dot{U}'j_n - \dot{U}''j_n}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = j_n; \quad (3)$$

$$\underline{Y}_{\text{эсп}} = \frac{\dot{U}''\underline{Y}_n - j_n - (\dot{U}'\underline{Y}_n - j_n)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} =$$

$$= \frac{\dot{U}''\underline{Y}_n - \dot{U}'\underline{Y}_n}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \underline{Y}_n. \quad (4)$$

Значения величин $j_{\text{эсп}}$ и $\underline{Y}_{\text{эсп}}$ будут равны соответствующим значениям параметров схемы замещения исследуемого потребителя j_n и \underline{Y}_n .

Вариант 2. За период времени между измерениями изменились параметры схемы замещения исследуемого потребителя, а параметры схемы замещения системы не менялись. Из закона Ома и первого закона Кирхгофа для рис. 2 $i_T = j_C - \dot{U}\underline{Y}_C$. Тогда:

$$j_{\text{эсп}} = \frac{\dot{U}'(j_C - \dot{U}''\underline{Y}_C) - \dot{U}''(j_C - \dot{U}'\underline{Y}_C)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} =$$

$$= \frac{\dot{U}'j_C - \dot{U}''j_C}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = -j_C; \quad (5)$$

$$\underline{Y}_{\text{эсп}} = \frac{j_C - \dot{U}''\underline{Y}_C - (j_C - \dot{U}'\underline{Y}_C)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} =$$

$$= \frac{\dot{U}'\underline{Y}_C - \dot{U}''\underline{Y}_C}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = -\underline{Y}_C. \quad (6)$$

Значения величин $j_{\text{эсп}}$ и $\underline{Y}_{\text{эсп}}$ равны соответствующим значениям параметров схемы замещения внешней системы j_C и \underline{Y}_C , взятым с противоположным знаком.

Вариант 3. За период времени между измерениями параметры схемы замещения потребителя и системы не изменились. При этом $i_T'' = i_T'$, $\dot{U}'' = \dot{U}'$, следовательно, значения параметров схемы замещения $j_{\text{эсп}}$ и $\underline{Y}_{\text{эсп}}$ для такого случая получить невозможно.

Вариант 4. За период времени между измерениями изменились параметры схемы замещения, как системы, так и исследуемого потребителя. В этом случае упрощение выражений (2) невозможно, при этом нельзя определить параметры схемы замещения ни одного из присоединений.

Так как внешняя по отношению к рассматриваемому потребителю система имеет большее количество элементов, а значит, и более высокую вероятность изменения их параметров, то за время между двумя измерениями наиболее вероятно получить упомянутые выше варианты 1 или 4. При этом для определения параметров схемы замещения пригоден только вариант 1. Вместе с тем на математической модели можно принудительно сделать возможными изменения только параметров внешней системы, а значит, получать параметры только исследуемого потребителя по варианту 1.

Для решения поставленных в работе задач составлена имитационная модель точки общего присоединения в MATLAB Simulink [15, 16] (рис. 3 б). Электрическая схема моделируемой точки общего присоединения приведена на рис. 3 а.

В исходном режиме модель на рис. 3 имеет следующие параметры элементов:

1. Источник напряжения, моделирующий питающую систему **С**, с параметрами:

– мощность трехфазного КЗ на шинах системы

$$S_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{3}U_{\text{ном}}I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 15 \approx 260 \text{ МВА};$$

– базисное напряжение $U_{\text{баз}} = 10 \text{ кВ}$;

– соотношение индуктивного и активного сопротивлений $X_C / R_C = 3$.

2. Исследуемый потребитель с нелинейной искажающей нагрузкой, представленный трехфазным шестипульсным выпрямителем (VD1-6) [17] с подключенной к нему нагрузкой **Н1** с параметрами:

– номинальное напряжение переменного тока $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$;

– активная мощность нагрузки на стороне постоянного напряжения $P_{\text{Н1}} = 5 \text{ МВт}$;

– индуктивная мощность нагрузки на стороне постоянного напряжения (эквивалент

для частоты 50 Гц) $Q_{LH1} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$;

– емкостная мощность нагрузки на стороне постоянного напряжения
 $Q_{CH1} = 0 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}.$

3. Внешняя по отношению к исследуемому потребителю нагрузка представлена линейной симметричной неискажающей нагрузкой **H2** с параметрами:

– номинальное напряжение переменного

тока $U_{HOM} = 10$ кВ;

– трехфазная активная мощность нагрузки $P_{H2} = 5$ МВт ;

– трехфазная индуктивная мощность нагрузки $Q_{I H2} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$;

– трехфазная емкостная мощность
нагрузки $Q_{CH2} = 0 \text{ МВ} \cdot \text{Ар.}$

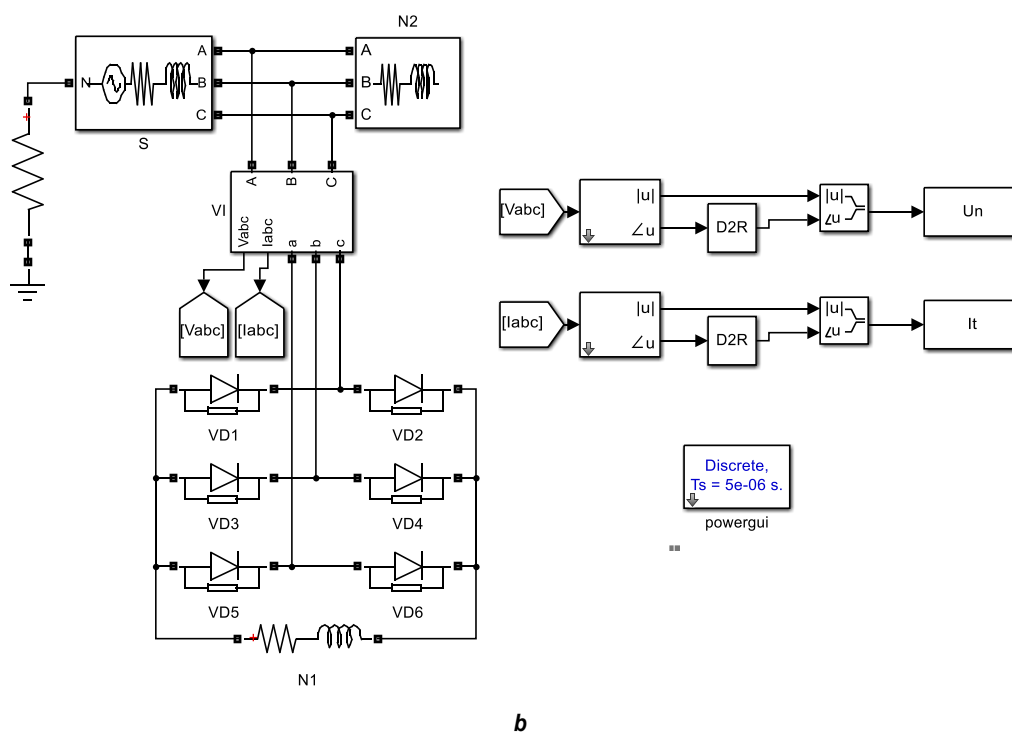
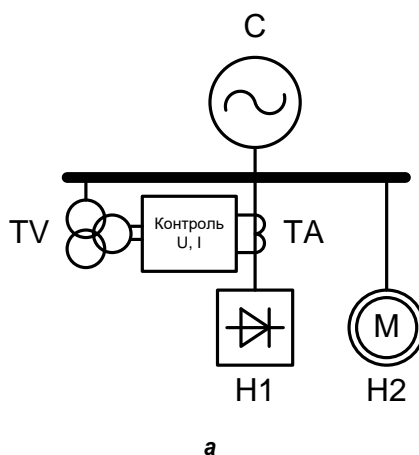


Рис. 3. Электрическая схема точки общего присоединения (а) и ее имитационная модель в среде MATLAB Simulink (b): Н1 – искажающая нагрузка, Н2 – неискажающая нагрузка, С – энергосистема, ТА – трансформатор тока, TV – трансформатор напряжения

Fig. 3. Electrical circuit of the point of common coupling (a) and its simulation model in MATLAB Simulink (b):
H1 – distorting load, H2 – non-distorting load, C – power system, TA – current transformer,
TV – voltage transformer

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментальной части работы рассматривались изменения активной и индуктивной мощностей нагрузок Н1 либо Н2 с целью определения параметров схем замещения по методу двух измерений для 5-й, 7-й, 11-й, 13-й гармонических составляющих. Далее в статье в качестве примера будут представлены результаты опытов только для 5-й гармонической составляющей, для остальных составляющих полученные закономерности идентичны.

Экспериментальная работа состояла из двух частей:

В первой части экспериментальной работы выполнялось изменение мощности нагрузки Н2 (внешней по отношению к исследуемому потребителю Н1) и контроль напряжения гармонической составляющей \dot{U} и тока гармонической составляющей \dot{I}_T на присоединении потребителя Н1 (см. рис. 3 а). В результате данных экспериментов по выражениям (3) и (4) получены параметры нагрузки Н1.

Во второй части экспериментальной работы изменяли параметры исследуемого потребителя Н1 при неизменных параметрах

нагрузки Н2 и внешней энергосистемы, при этом контролировали те же параметры \dot{U} и \dot{I}_T на присоединении того же потребителя с нагрузкой Н1. В результате были получены параметры схемы замещения внешней электрической сети (нагрузка Н2 и питающая система С) с противоположным знаком по формулам (5), (6).

Часть 1. В качестве первой задачи проведена серия из 20 опытов по поочередному изменению реактивной мощности нагрузки Н2 Q_{LH2} от начального значения 2 МВ·Ар до одной из величин следующего ряда: 0,01, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 МВ·Ар. По расчетным значениям \dot{U} и \dot{I}_T в данных парах режимов (исходный режим с нагрузкой 2 МВ·Ар и новый режим с нагрузкой из указанного ряда мощностей) по выражениям (2) рассчитывались параметры схемы замещения исследуемого потребителя \dot{J}_n и \underline{Y}_n для 5-й гармонической составляющей (рис. 4). Изменяемая нагрузка Н2 является внешней по отношению к исследуемой нагрузке Н1, поэтому расчет по формуле (2) дает параметры схемы замещения нагрузки Н1, которая во всех 20 парах опытов в модели оставалась неизменной.

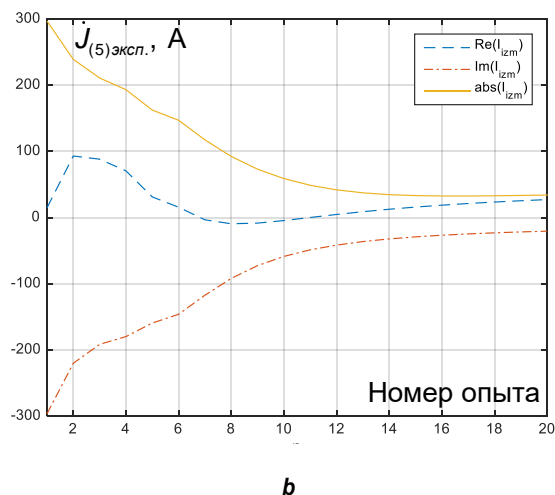
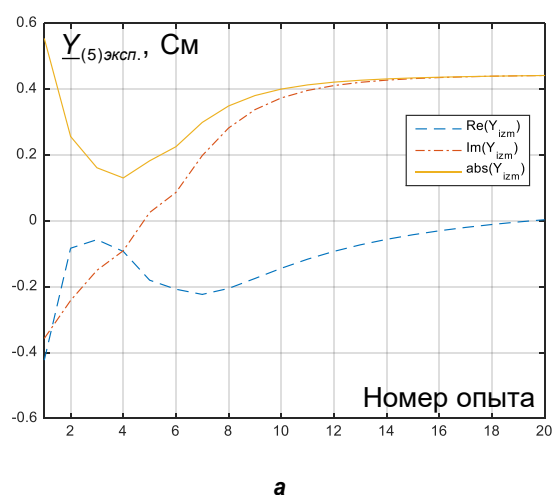


Рис. 4. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) искажающей нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения реактивной мощности внешней нагрузки Н2: пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины

Fig. 4. Results of determining active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the distorting load Н1 for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the reactive power of the external load Н2: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

Как показывают графики на рис. 4, на результаты определения параметров схемы замещения существенно влияет то, на какую величину изменялась реактивная мощность внешней нагрузки. Например, результаты определения модуля проводимости фактически неизменной нагрузки варьируются в диапазоне от 0,14 См до 0,56 См в зависимости от того, на какую величину менялись параметры режима. Это не дает возможности достоверно определить собственные параметры схемы замещения искажающей нагрузки Н1.

Из рис. 4 также видно, что у искажающей нагрузки Н1 присутствует ненулевая проводимость на генерируемой ею 5-й гармонической составляющей. Данную проводимость не упоминают в специализированных источниках [18, 19], однако фактически ее требуется учитывать при проведении расчетов и анализа показателей качества электрической энергии.

Проведена подобная серия из 20 опытов по изменению мощности нагрузки Н2 с постоянным коэффициентом мощности ($\cos\varphi_{H2}$) данной нагрузки. Активная мощность нагрузки Н2 P_{H2} последовательно менялась от величины 5 МВт до одного из значений из ряда: 0,01, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 МВт. Реактивная мощность нагрузки Н2 Q_{LH2} во всех опытах принималась равной 40% от активной мощности P_{H2} . Результаты определения параметров схемы замещения нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей приведены на рис. 5.

Сравнение приведенных на рис. 4 и 5 графиков показывает, что изменение только реактивной мощности внешней нагрузки Н2 на большую величину (до нескольких МВ·Ар) приводит к изменению экспериментально определяемых параметров схемы замещения нагрузки Н1, которые должны были остаться постоянными. Если изменение нагрузки Н2 происходит с фиксированным $\cos\varphi_{H2}$, то результаты определения параметров схемы замещения нагрузки Н1 стабильны и слабо зависят от приращения мощности подключаемой нагрузки (колебания в пределах 8%).

Представляет также интерес, какими будут результаты определения параметров

схемы замещения при малых изменениях мощности внешней нагрузки Н2 – в пределах 10% от начального значения полной мощности. Проведена имитация случайного изменения реактивной мощности нагрузки Н2 с нормальным законом распределения отклонения, математическим ожиданием отклонения 0 МВ·Ар и диапазоном, $1\sigma = 0,1 S_{H2} = 0,539 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ где σ – среднеквадратичное отклонение [20]. Всего проведено 20 опытов изменения мощности на данную случайную величину, результаты определения параметров схемы замещения приведены на рис. 6.

В отличие от рис. 4, на графиках рис. 6 видно, что результаты определения параметров схемы замещения при изменении параметров режима на малую величину (в пределах 10%) стабильны и практически не зависят от диапазона изменения параметров внешних нагрузок. Представленные на рис. 5–6 графики вновь показывают наличие собственной ненулевой проводимости у искажающей нагрузки Н1, при этом, согласно теории [19, 20], проводимость такой нагрузки для токов высших гармонических составляющих должна быть нулевой.

Влияние диапазона изменения параметров режима на результат расчета параметров схемы замещения может быть обусловлено связью параметров режима на высших гармонических составляющих с режимом основной частоты, когда включение или отключение существенной реактивной мощности изменяет уровни напряжений и влияет одновременно на все гармонические составляющие, т.е. нарушает принцип суперпозиции, принятый при использовании разложения в ряд Фурье [12]. По этой причине использование метода двух измерений при больших изменениях параметров режима, как это предлагалось в [7], некорректно, поскольку параметры коммутируемой мощной нагрузки будут влиять на результат вычисления параметров схемы замещения.

Более корректным при определении параметров схемы замещения является использование малых, «естественных» изменений параметров режима, как это предложено в [11]. При этом стоит помнить, что погрешно-

сти измерений гармонических составляющих будут сопоставимы с полезными изменениями данных токов и напряжений. В работе [21] предложены варианты решения этой проблемы.

Часть 2. В данной части экспериментальной работы проведены опыты по определению параметров схемы замещения обобщенной внешней энергосистемы (источник питания С и нагрузка Н2), не имеющей

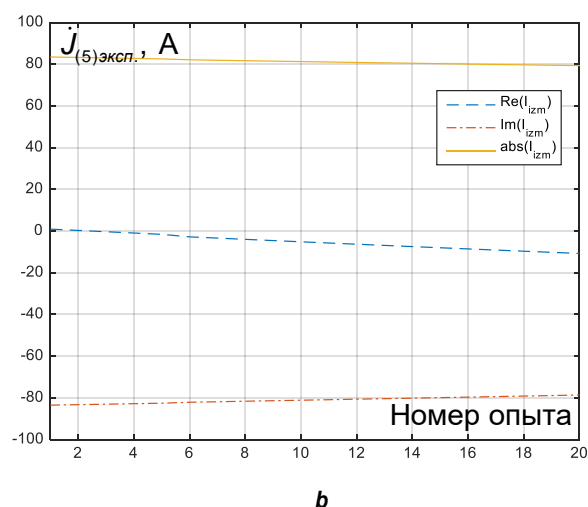
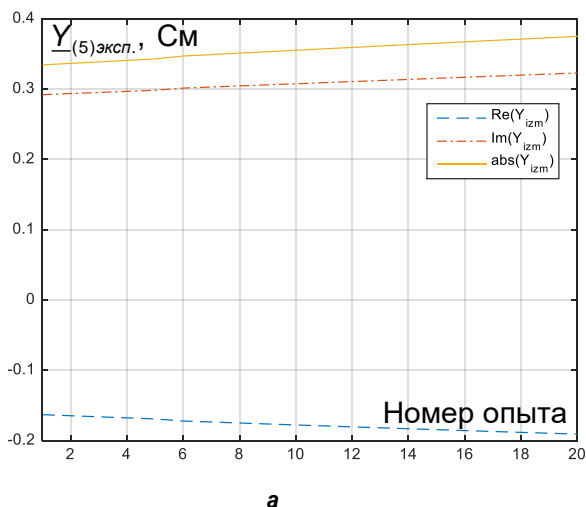


Рис. 5. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (b) искажающей нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения мощности внешней нагрузки Н2 с постоянным коэффициентом мощности (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 5. Results of determining active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the distorting load Н1 for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the power of the external load Н2 with the constant power factor: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

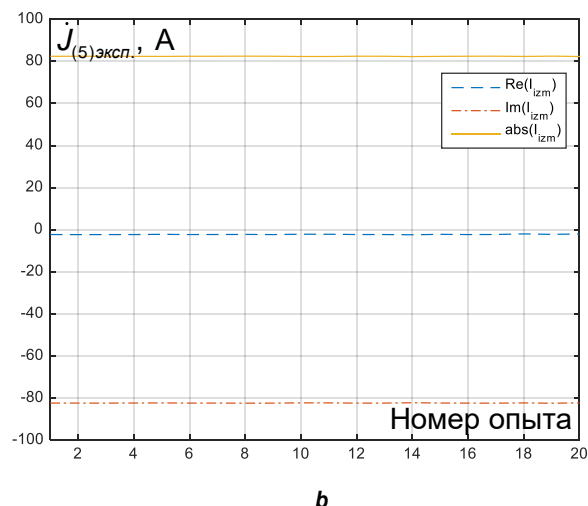
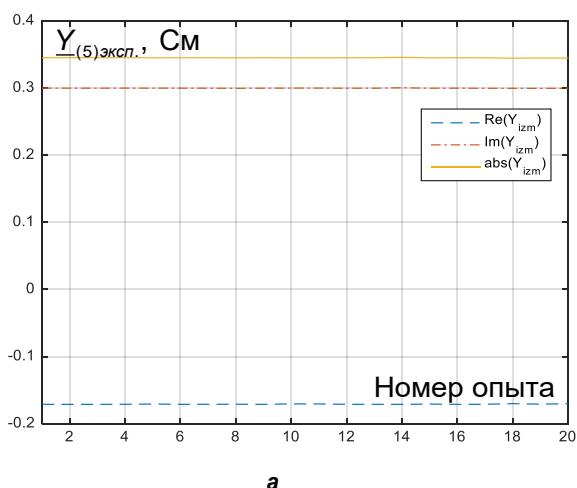
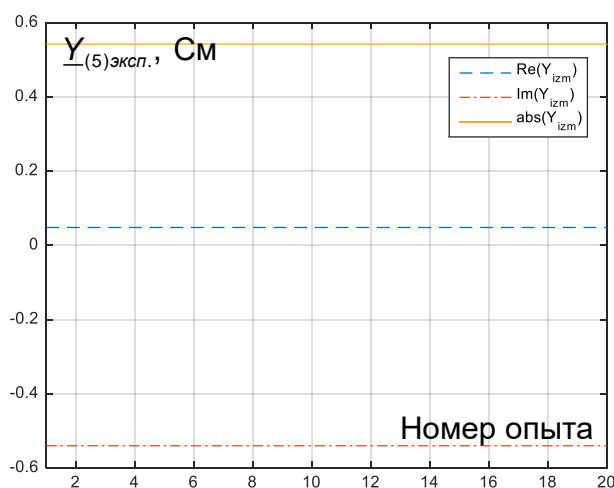
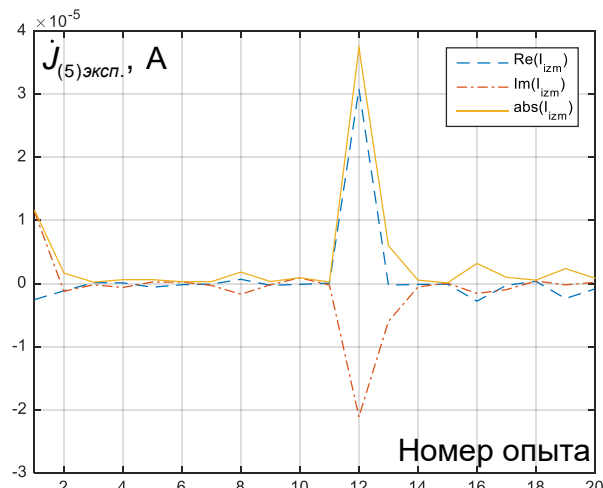


Рис. 6. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (b) искажающей нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения реактивной мощности внешней нагрузки Н2 на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВ·Ар и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1 S_{H2}/3$ (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 6. Results of determining the active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the distorting load Н1 for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the reactive power of the external load Н2 by a random value with the expected value of 0 MV·Ar and a standard deviation $\sigma = 0.1 S_{H2}/3$: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values



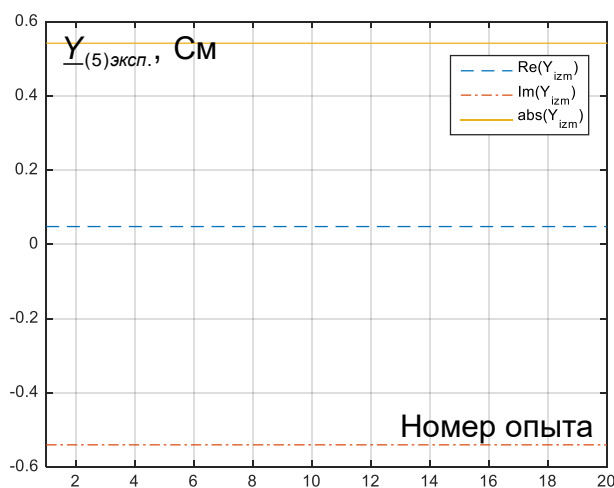
a



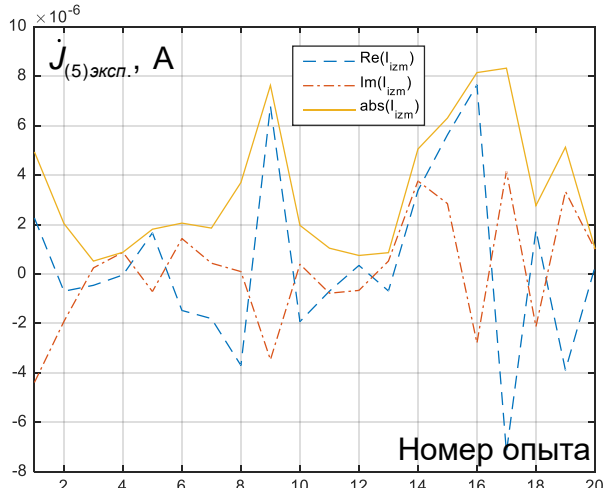
b

Рис. 7. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) неискажающей внешней сети (энергосистема С и нагрузка Н2) для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения активной мощности нагрузки Н1 на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВт и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1P_{H1}/3$ (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 7. Results of determining the active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of non-distorting external network (power system C and load H2) for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the active power of the load H1 by a random value with the expected value of 0 MW and standard deviation $\sigma = 0.1P_{H1}/3$: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values



a



b

Рис. 8. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) неискажающей внешней сети (энергосистема С и нагрузка Н2) для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения реактивной мощности нагрузки Н1 на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВ·Ар и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1Q_{H1}/3$ (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 8. Results of determining the active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the non-distorting external network (power system C and load H2) for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the reactive power of the load H1 by a random value with the expected value of 0 MV·Ar and standard deviation $\sigma = 0.1Q_{H1}/3$: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

источников искажения для 5-й гармонической составляющей. Для определения параметров выполнялось изменение мощности нагрузки Н1, что, согласно выражениям (5) и (6), позволит рассчитать параметры обобщенной внешней энергосистемы.

Выполнена серия экспериментов по изменению величины активной мощности нагрузки Н1 от величины 5 МВт на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВт и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1 \cdot P_{H1} / 3$, при этом в любом опыте у нагрузки Н1 реактивная мощность (приведенная к частоте 50 Гц) составляла $Q_{LH1} = 2$ МВ·Ар. Результаты представлены на рис. 7.

Такая же серия экспериментов проведена с изменением только реактивной мощности у нагрузки Н1 Q_{LH1} на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВ·Ар и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1 \cdot Q_{H1} / 3$, при этом активная мощность нагрузки Н1 $P_{H1} = 5$ МВт оставалась неизменной. Итоги эксперимента приведены на рис. 8.

На рис. 7, 8 получены стабильные значения проводимости внешней энергосистемы, при этом значения токов искажения эквивалентной энергосистемы близки к нулю, что соответствует параметрам проверяемой модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ результатов метода двух измерений тока и напряжения, применяемого при экспериментальном определении параметров схемы замещения нагрузок на рассматриваемой n -й гармонической составляющей.

При проведении серии опытов на математической модели в MATLAB Simulink установлено, что диапазон изменения параметров нагрузки внешней сети существенно влияет на получаемые по методу двух измерений параметры схемы замещения на n -й гармонической составляющей. При этом обще-

принятым фактом считалось, что параметры схемы замещения не изменявшейся нагрузки должны оставаться постоянными. Лишь при относительно малых изменениях параметров режима (в пределах 10% от исходного значения) могут быть получены достоверные параметры схемы замещения.

Вероятной причиной зависимости получаемых по методу двух измерений параметров схемы замещения от диапазона изменения параметров режима является связь режима n -й гармонической составляющей с режимом на основной частоте, параметры которого при включении и отключении мощной нагрузки (в особенности реактивной) также будут существенно изменяться. В связи с этим можно рекомендовать использовать метод двух измерений для определения параметров схем замещения только при малых изменениях параметров режима, чтобы параметры изменяющейся внешней нагрузки не оказывали влияния на результат.

Также подтверждено, что у неискажающей нагрузки на рассматриваемой n -й гармонической составляющей ток искажения в эквивалентной схеме замещения действительно отсутствует, что хорошо согласуется с теоретическими данными. Однако у искажающей нагрузки (например, у рассмотренного в работе шестипульсного выпрямителя) присутствует ненулевая проводимость на рассматриваемой n -й гармонической составляющей. В настоящее время при проведении расчетов показателей качества электроэнергии данная проводимость не учитывается – для задания источников искажений используются только идеальные источники тока. Неучет проводимости искажающей нагрузки на n -й гармонической составляющей будет приводить к погрешностям при расчете показателей качества электроэнергии, поэтому требуется определять и учитывать данную проводимость при проведении расчетов и анализа показателей качества электроэнергии.

Список источников

1. Вагин Г. Я., Куликов А. Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электриче-

ские станции. 2019. № 6. С. 54–59. <https://doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.
2. Коверникова Л. И., Серков А. В., Шамонов Р. Г. Об

управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 75–85.

3. Zhang Xiao-Ping, Yan Zuanhong. Energy quality: a definition // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2020. Vol. 7. P. 430–440. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767>.

4. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Важенина И. Г., Синяговский А. Ф. Регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 5. С. 45–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-45-50>.

5. Liu Baojin, Liu Zeng, Liu Jinjun, An Ronghui, Zheng Haoyang, Shi Yidong. An adaptive virtual impedance control scheme based on small-AC-signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34. Iss. 12. P. 12333–12355. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2905588>.

6. Висящев А. Н., Федосов Д. С., Федчишин В. В. Оценка влияния электроприемников на уровень гармонических составляющих напряжения в электрической сети // Управление качеством электрической энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 26–28 ноября 2014 г.). М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. С. 209–216.

7. Serfontein D., Rens J., Botha G. Harmonic impedance assessment using prevailing phasors // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378872>.

8. Дворкин Д. В., Силаев М. А., Тульский В. Н., Палис Ш. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-7-12-19>.

9. Пат. № 2244313, Российская Федерация, G01R 21/00. Способ определения потребителя, искажающего показатели качества электрической энергии в узле энергоснабжающей организации, и его вклада в искажение / О. И. Баглейбтер, А. Н. Висящев, И. И. Луцкий, С. Г. Тигунцев; заявители и патентообладатели А. Н. Висящев, С. Г. Тигунцев. Заявл. 27.06.2000; опубл. 10.01.2005. Бюл. № 1.

10. Zhao Xi, Yang Honggeng. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. Iss. 1. P. 381–388. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2491644>.

11. Висящев А. Н., Федосов Д. С. Оценка влияния потребителей на искажение напряжения в электрической сети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3. С. 46–51.

12. Стариков А. В., Лисин С. Л., Беляева О. С., Кирдяшев В. А. Способ уменьшения амплитуд высших

гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. № 1. С. 120–132. <https://doi.org/10.14498/tech.2021.1.9>.

13. Носов Г. В., Кулешова Е. О. Расширенный метод эквивалентного генератора при синусоидальных токах // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 75–78.

14. Ravindran V., Nakhodchi N., Rönnerberg S., Bollen M. H. J. Assessing time-varying harmonic interactions in a wind park // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 68151–68160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076879>.

15. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Суслов К. В. Исследование работы прогностических регуляторов установки распределенной генерации в системе электроснабжения с мощным накопителем электроэнергии // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 448–458. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0325>.

16. Bajaj M., Singh A. K., Alowaidi M., Sharma N. K., Sharma S. K., Mishra S. Power quality assessment of distorted distribution networks incorporating renewable distributed generation systems based on the analytic hierarchy process // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 145713–145737. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014288>.

17. Merlin M. M. C., Soto-Sanchez D., Judge P. D., Chaffey G., Clemow P., Green T. C., et al. The extended overlap alternate arm converter: a voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. Iss. 5. P. 3898–3910. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2723948>.

18. 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.

19. Zare F., Soltani H., Kumar D., Davari P., Delpino H. A. M., Blaabjerg F. Harmonic emissions of three-phase diode rectifiers in distribution networks // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 2819–2833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2669578>.

20. Joudah I. N., Abbas N. Asymptotically unbiased estimation of mean and standard deviation in the presence of outlying errors // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 110623–110632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002958>.

21. Федосов Д. С. Методы уменьшения погрешностей экспериментального определения параметров схем замещения потребителей на высших гармониках // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10. С. 254–261.

References

1. Vagin G. Ya., Kulikov A. L. Power quality in power supply systems. Analysis of the state of standardization and control methods. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2019;6:54-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.
2. Kovernikova L. I., Serkov A. V., Shamonov R. G. On electric power quality management in Russia in the past, present and future. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2018;1:75-85. (In Russ.).
3. Zhang Xiao-Ping, Yan Zuanhong. Energy

quality: a definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020;7:430-440. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767>.

4. Dovgun V. P., Egorov D. E., Vazhenina I. G., Sinyagovsky A. F. Adjustable filter compensating devices for traction power supply systems. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;5:45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-45-50>.

5. Liu Baojin, Liu Zeng, Liu Jinjun, An Ronghui, Zheng Haoyang, Shi Yidong. An adaptive virtual impedance control scheme based on small-AC-signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019;34(12):12333-12355. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2905588>.

6. Visyashchev A. N., Fedosov D. S., Fedchishin V. V. Assessment of electrical receiver effect on the level of voltage harmonic components in the electrical network. *Upravlenie kachestvom elektricheskoy energii: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = International Conference on Power Quality Management*. 26–28 November 2014, Moscow. M.: Raduga; 2014, p. 209-216. (In Russ.).

7. Serfontein D., Rens J., Botha G. Harmonic impedance assessment using prevailing phasors. In: *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378872>.

8. Dvorkin D. V., Silayev M. A., Tul'skii V. N., Palis S. Problems of the estimation of the consumer's contribution to the power quality distortion in the point of common coupling. *Elektrichestvo*. 2017;7:12-19. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-7-12-19>.

9. Bagleibter O. I., Visyashchev A. N., Lutskiy I. I., Tigmunsev S. G. *Method for determining the consumer distorting electric energy quality indicators in the node of an energy supply organization, and consumer's contribution to the distortion*. Patent RF, no. 2244313; 2005. (In Russ.).

10. Zhao Xi, Yang Honggeng. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;31(1):381-388. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2491644>.

11. Visyashchev A. N., Fedosov D. S. Estimation of consumer impact on voltage distortion in electric network. *Ehlektrounergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*. 2018;3:46-51. (In Russ.).

12. Starikov A. V., Lisin S. L., Belyaeva O. S., Kirdyashev V. A. Method for reducing the amplitudes of higher harmonics in the output voltage of the frequency converter. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical*

Sciences Series. 2021;29(1):120-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.14498/tech.2021.1.9>.

13. Nosov G. V., Kuleshova E. O. Extended method of equivalent generator under sinusoidal currents. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011;319(4):75-78. (In Russ.).

14. Ravindran V., Nakhodchi N., Rönnberg S., Bollen M. H. J. Assessing time-varying harmonic interactions in a wind park. *IEEE Access*. 2021;9:68151-68160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076879>.

15. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. Research of operation of predictive controllers of distributed generation plant in power supply system with energy storage. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering & Technologies*. 2021;14(4):448-458. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0325>.

16. Bajaj M., Singh A. K., Alowaidi M., Sharma N. K., Sharma S. K., Mishra S. Power quality assessment of distorted distribution networks incorporating renewable distributed generation systems based on the analytic hierarchy process. *IEEE Access*. 2020;8:145713-145737. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014288>.

17. Merlin M. M. C., Soto-Sanchez D., Judge P. D., Chaffey G., Clemow P., Green T. C., et al. The extended overlap alternate arm converter: a voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33:3898-3910. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2723948>.

18. Fedotov A. I., Fedotov E. A., Chernova N. V. Equivalent circuits of valve converters for calculating current and voltage harmonics. Part 2. *Ehlektrichestvo*. 2007;11:38-45. (In Russ.).

19. Zare F., Soltani H., Kumar D., Davari P., Delpino H. A. M., Blaabjerg F. Harmonic emissions of three-phase diode rectifiers in distribution networks. *IEEE Access*. 2017;5:2819-2833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2669578>.

20. Joudah I. N., Abbas N. Asymptotically unbiased estimation of mean and standard deviation in the presence of outlying errors. *IEEE Access*. 2020;8:110623-110632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002958>.

21. Fedosov D. S. Error minimization methods of experimental determination of power consumer equivalent circuit parameters for higher harmonics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;10:254-261. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анненков Евгений Олегович,
учебный мастер кафедры электрических станций,
сетей и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy O. Annenkov,
Training Master of the Department of Electric Stations,
Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Зубова Екатерина Васильевна,
аспирант,
специалист по учебно-методической работе
кафедры электрических станций, сетей и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Селезнев Алексей Спартакович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электрических станций, сетей
и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Федосов Денис Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электрических станций, сетей
и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Анненков Е. О. разработал математическую модель точки общего присоединения в MATLAB Simulink, провел необходимые расчеты. Зубова Е. В. выполнила обработку результатов, подготовила первую редакцию статьи. Селезнев А. С. участвовал в анализе результатов моделирования, формулировании выводов по работе. Федосов Д. С. сформулировал цель и задачи работы, участвовал в разработке и проверке корректности модели в MATLAB Simulink, в обработке результатов расчетных экспериментов, сформулировал выводы по работе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.03.2022; одобрена после рецензирования 08.08.2022; принята к публикации 19.09.2022.

Ekaterina V. Zubova,
Postgraduate Student,
Teaching and Learning Specialist
of the Department of Electric Stations, Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Aleksey S. Seleznev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Electric Stations, Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Denis S. Fedosov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Electric Stations, Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

Annenkov E. O. developed the mathematical model of the point of common coupling in MATLAB Simulink, performed necessary calculations. Zubova E.V. processed the results, prepared the first edition of the article. Seleznev A.S. participated in the analysis of simulation results and conclusion formulation. Fedosov D.S. formulated the purpose and objectives of the work, participated in the development and verification of the model in MATLAB Simulink as well as in the processing of the results of computational experiments, formulated conclusions of the work.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 14.03.2022; approved after reviewing 08.08.2022; accepted for publication 19.09.2022.