УДК 621.316

Дарья Константиновна Кугучева
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», аспирант кафедры энергетики, Россия, Калининград, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Максим Сергеевич Харитонов
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики, Россия, Калининград, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Исследование несимметрии напряжений в электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации

Авторское резюме

Состояние вопроса. Вопросы исследования влияния объектов микрогенерации на базе возобновляемых источников энергии на показатели качества электроэнергии не имеют широкого освещения в отечественных исследованиях. Однако в связи с поставленной Правительством РФ задачей по увеличению количества используемых активными потребителями возобновляемых источников энергии актуальность исследования заключается в необходимости определения особенностей влияния объектов микрогенерации, подключенных к распределительным электрическим сетям низкого напряжения, на несимметрию напряжений для определения дальнейших путей развития данной отрасли энергетики. Целью исследования является построение модели распределительной электрической сети низкого напряжения с объектами микрогенерации и проведение вычислительного эксперимента по оценке влияния объектов микрогенерации на базе возобновляемых источников энергии на несимметрию напряжений, определение путей повышения параметров качества электроэнергии, связанных с несимметрией напряжений.
Материалы и методы. Исследование проведено с использованием имитационного подхода, в соответствии с которым применен метод математического моделирования, реализованный в программных комплексах NEPLAN и Load Profile Generator.
Результаты. Определены особенности влияния объектов микрогенерации на положительные отклонения напряжения. Проведен анализ чувствительности узлов моделируемого участка электрической сети по критерию изменения напряжения. Определены коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности для наиболее чувствительного узла сети при различном уровне внедрения объектов микрогенерации и различных способах их подключения и управления. Определены особенности изменения напряжения на каждой фазе при различных способах управления и подключения объектов микрогенерации.
Выводы. Внедрение объектов микрогенерации оказывает влияние на положительные отклонения напряжения и несимметрию напряжений. Установлено, что основными факторами данного влияния являются способ подключения и управления объектом микрогенерации, несимметрия напряжений до внедрения объектов микрогенерации, соотношения между мгновенными мощностями нагрузки потребителя и объекта микрогенерации, чувствительность узлов по критерию изменения напряжения, зависящая от электрической удаленности объектов микрогенерации от центра питания, параметров фидера и нагрузки. Проведенные на математической модели экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективным решением проблемы несимметрии является перераспределение выдаваемой объектом микрогенерации мощности между фазами электрической сети в соответствии с загрузкой фаз.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметрия напряжений, микрогенерация, отклонение напряжения, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические преобразователи

Darya Konstantinovna Kugucheva
Kaliningrad State Technical University, Postgraduate Student of Power Engineering Department, Russia, Kaliningrad, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Maksim Sergeevich Kharitonov
Kaliningrad State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Engineering Department, Russia, Kaliningrad, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Study of voltage unbalance in low-voltage electrical networks with microgeneration systems

Abstract

Background. The issues of studying the influence of microgeneration facilities based on renewable energy sources on the quality indicators of electric power are not widely covered in national studies. However, due to the task set by the Government of the Russian Federation to increase the number of renewable energy sources used by active consumers, the relevance of the study

© Кугучева Д.К., Харитонов М.С., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 55–66.

is to determine the features of the influence of microgeneration facilities connected to low-voltage distribution electric networks on voltage unbalance to determine further development paths for this energy sector. The purpose of the study is to design a model of a low-voltage distribution electric network with microgeneration facilities and conduct a computational experiment to assess the influence of microgeneration facilities based on renewable energy sources on voltage unbalance, to determine the ways to improve the quality parameters of electric power associated with voltage unbalance.
Materials and methods. The study uses a simulation approach, applying a method of mathematical modeling implemented using software complexes NEPLAN and Load Profile Generator.
Results. The authors have identified the peculiarities of the impact of microgeneration units on positive voltage deviations and have conducted sensitivity analysis of nodes in the modeled network section based on voltage change criteria. The voltage unbalance coefficients in the negative sequence for the most sensitive network node at various levels of microgeneration unit penetration and different ways of their connection and control are determined. The study also has identified the characteristics of voltage change at each phase with different methods of controlling and connecting microgeneration units.
Conclusions. The deployment of microgeneration objects affects positive deviations in voltage and voltage unbalance. The main factors of this influence are the following: the method of connection and control of the microgeneration object, voltage unbalance before the deployment of microgeneration objects, the relationship between the instantaneous powers of the consumer load and the microgeneration object, the sensitivity of nodes to changes in voltage criteria, depending on the electrical distance of microgeneration objects from the main substation, feeder parameters, and load. It has been established that the most effective solution to the asymmetry problem is to redistribute the power provided by the microgeneration object among the phases of the power grid.

Key words: power quality, voltage unbalance, microgeneration, voltage deviation, renewable energy sources, photovoltaic converters

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.055-066

Введение. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются перспективным направлением развития энергетической отрасли в России и мире. В качестве фактора стимулирования инвестиций в развитие возобновляемой энергетики в Российской Федерации особую роль играют Федеральный закон № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части развития микрогенерации» и ПП РФ от 2 марта 2021 г. № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации», благодаря которым функционирует механизм сальдирования (продажи) излишков выработанной электроэнергии от объектов микрогенерации в пределах 15 кВт. Объект микрогенерации – объект по производству электрической энергии, подключенный к сети до 1000 В и функционирующий, в том числе, на основе использования возобновляемых источников энергии. Прогнозируемый рост данного вида генерации может достигать 150 МВт в год[1]. Одним из наиболее востребованных генерирующих источников для объектов микрогенерации являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) в силу простоты их установки и обслуживания, отсутствия шума и вибраций, компактности и возможности интеграции в архитектуру строения [1].

С учетом развития микрогенерации актуальной является задача исследования особенностей функционирования объектов микрогенерации на базе ВИЭ, в том числе на базе ФЭП, в составе электрических сетей для оценки влияния данных объектов на показатели качества электрической энергии, в частности несимметрию напряжений. Целью работы является определение особенностей функционирования объектов микрогенерации в составе низковольтных распределительных электрических сетей, а также определение влияния однофазно подключенных объектов микрогенерации на коэффициенты несимметрии при различном уровне внедрения генерирующих установок и различном уровне несимметрии нагрузок фаз.

Согласно ГОСТ 32144-2013, несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети. Расчет несимметричных режимов производится методом фазных координат [2, 3] путем представления несимметричной нагрузки в виде суммы мощностей симметричной нагрузки и двух однофазных нагрузок, подключенных на различные фазы сети [4], методом симметричных составляющих [5], методом Ч. Фортескью [6]. В рамках данного исследования ввиду наличия большого количества электроприемников и практически отсутствия насыщения магнитных систем несимметричная система напряжений может быть представлена как геометрическая сумма трех симметричных составляющих напряжений: прямой $\bar{U}_1$, обратной $\bar{U}_2$ и нулевой последовательностей $\bar{U}_0$.

Согласно ГОСТ 32144-2013, несимметрия напряжений характеризуется значениями коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}, усредненными в точке

[1] Энергетика и промышленность России: Развитие микрогенерации в России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eprussia.ru/news/base/2022/9853042.html.

передачи электрической энергии на интервале времени 10 минут (не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю и 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю).

Расчет данных коэффициентов производится по следующим выражениям:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $U_{2(1)}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В; $U_{1(1)}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, В;

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $U_{0(1)}$ – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В; $U_{1(1)}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, В.

Согласно исследованиям профессора Ф.Д. Косоухова [7], повышенные значения коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям приводят к дополнительным потерям мощности от несимметрии, обусловленным токами обратной и нулевой последовательностей. В частности, в расчетах предлагается использовать коэффициент потерь мощности от несимметрии токов, характеризующий повышение потерь мощности при несимметричном режиме по сравнению с потерями при симметричном режиме:

$$K_{\varepsilon} = \frac{3I_2^2 R_2}{3I_1^2 R_1} + \frac{3I_0^2 R_0}{3I_1^2 R_1} = K_{2i}^2 \frac{R_2}{R_1} + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}, \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_0 – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей; R_1, R_2, R_0 – активные сопротивления элемента прямой, обратной и нулевой последовательностей; K_{2i}, K_{0i} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям.

Таким образом, существование несимметричных режимов напрямую влияет на потери мощности [8, 9], что сопровождается повышением тепловой нагрузки и снижением уровня надежности электроснабжения [10].

Помимо возникновения повышенных потерь в сети, необходимость исследования вопросов несимметрии напряжений связана с влиянием данного показателя качества электроэнергии на возникающие в электрооборудовании процессы. В асинхронных двигателях несимметрия напряжений приводит к нарушению симметрии токов, что может вызывать дополнительный нагрев и приводить к сокращению срока службы оборудования [11], а также вызывать повышенную вибрацию, усиливающую усталостные процессы в механической части [12]. В выпрямительных установках возможно возникновение пульсаций, негативно влияющих на подключенные чувствительные электронные компоненты [13]. Несимметрия напряжений может привести к низкому напряжению у наиболее загруженного однофазного потребителя и повышенному напряжению у наименее загруженного однофазного потребителя [14]. При возникновении несимметричных режимов в распределительных электрических сетях низкого напряжения по нейтральному проводнику протекают токи нулевой последовательности, которые в случае недостаточного сечения нулевого проводника могут привести к однофазным коротким замыканиям и пожарам [15].

Вследствие наличия в большинстве случаев однофазного подключения бытовых нагрузок к распределительным электрическим сетям низкого напряжения возможно возникновение несимметричной загрузки фаз, что вызывает несимметрию токов и напряжений, обусловливающих описанные выше проблемы. В данном исследовании не рассматриваются в качестве причины несимметрии различные сопротивления линий электропередачи, так как, согласно [16], несимметрия сопротивлений фаз при длине воздушной линии менее 100 км незначительна.

Для уменьшения показателей несимметрии напряжений разработаны различные способы и технические средства, различающиеся сложностью и экономичностью, принципом действия и сферами применения. Все способы классифицируются в соответствии с влиянием на показатели, приведенные в выражении (3), среди них: выравнивание нагрузок по фазам; перераспределение нагрузок по фазам; применение замкнутых схем сетей; увеличение сечения нулевого провода; замена схемы соединения обмоток трансформатора *Y*/*Y*0 на *Y*/*Z*; применение различных симметрирующих устройств.

Внедрение в распределительные электрические сети низкого напряжение объекта микрогенерации при определенных условиях приводит к изменению потоков мощности, при этом напряжение в узле с генерирующим объектом значительно повышается [1].

Для упрощенной схемы сети (рис. 1), в соответствии с которой потребители получают питание от системы через трансформаторную подстанцию 15/0,4 кВ, при равенстве количеств генерируемой и потребляемой электроэнергии в узле сети с объектом микрогенерации напряжение повышается лишь на некоторых участках сети (рис. 2,а), в то время как на остальных участках сети напряжение снижается вследствие падения напряжения. При превышении количества генерируемой электроэнергии над потребляемой ($P_{\text{ген}} > P_{\text{нг}}$) в сети может наблюдаться превышение напряжения сверх допустимых пределов (рис. 2,б).

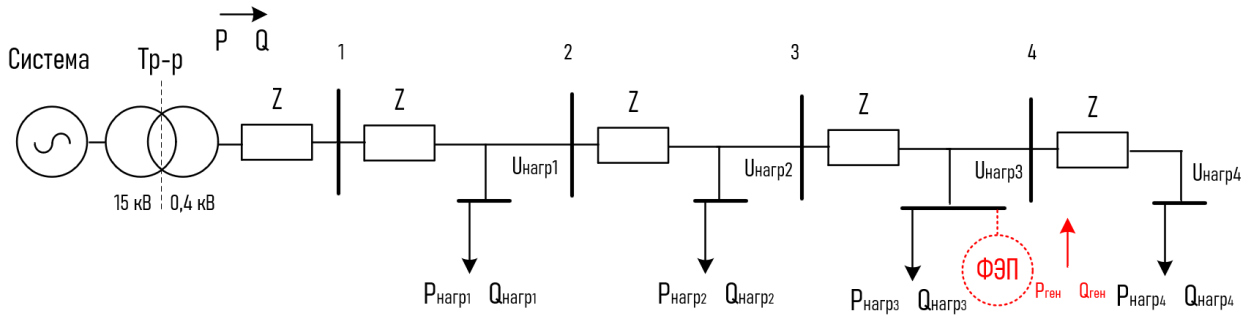


Рис. 1. Схема распределительной электрической сети в однофазном исполнении с объектом микрогенерации

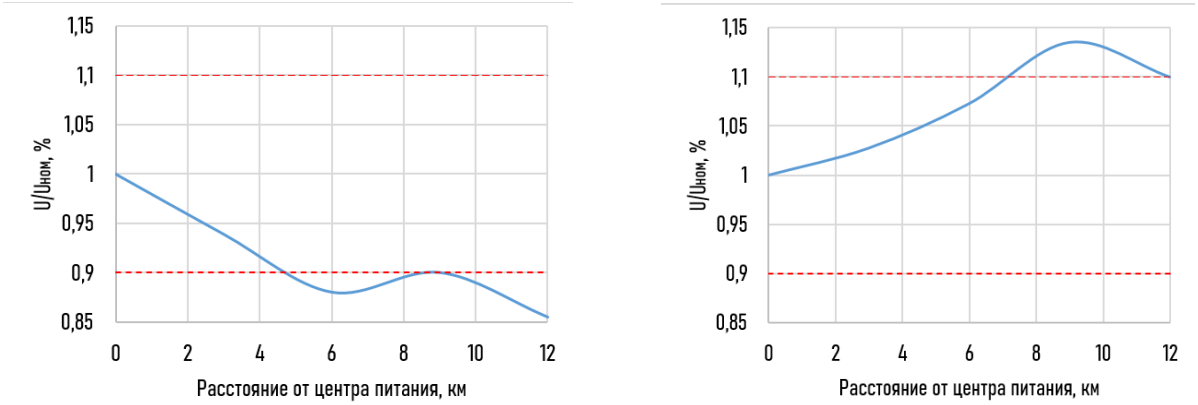


Рис. 2. Значения напряжения вдоль линии электропередачи: а – при $P_{ген} = P_{нг}$; б – $P_{ген} = 6 \times P_{нг}$

Таким образом, подключение к одной фазе объекта микрогенерации может привести к увеличению несимметрии напряжений вследствие возможного повышения напряжения на одной фазе при одновременном снижении напряжения из-за падения напряжения на других фазах. Увеличение несимметрии напряжений и связанные с этим негативные последствия указывают на необходимость исследования данного вопроса и принятия мер для минимизации последствий несимметричных режимов.

На сегодняшний день существуют решения обеспечения нормативных показателей качества электроэнергии у потребителей на стороне 0,4 кВ: пункты автоматического регулирования напряжения; вольтодобавочные трансформаторы; трансформаторы типа ТМ и ТМГ со встроенным симметрирующим устройством нулевой последовательности [17]. Однако в отечественных исследованиях отсутствует комплексный анализ влияния объектов микрогенерации на базе ВИЭ на несимметрию напряжений и способов уменьшения данных показателей.

Зарубежный опыт эксплуатации распределительных электрических сетей низкого напряжения с генерирующими объектами на базе ВИЭ предполагает для решения проблемы несимметрии напряжений внедрение накопителей электроэнергии [18, 19, 20]. Однако данное решение экономически нецелесообразно для объектов микрогенерации, функционирующих в Российской Федерации, у которых необходимость наличия накопителя электроэнергии противоречит основной концепции микрогенерации – возможности продажи избытков произведенной электроэнергии и покупки электроэнергии из сети в периоды недостатка генерируемой электроэнергии.

Также предлагается метод воздействия на регуляторы напряжения трансформаторов под нагрузкой и использование интеллектуальных инверторов, способных снизить напряжение у потребителя путем выработки реактивной мощности для снижения несимметрии напряжений вследствие выравнивания (уменьшения) н апряжения на фазе с генерирующим объектом [21, 22, 23].

В настоящем исследовании моделируется существующий участок сети Калининградской области с условным распределением объектов микрогенерации и проводится анализ влияния объектов микрогенерации на базе ВИЭ на несимметрию напряжений при различном уровне внедрения объектов микрогенерации, различных параметрах пофазной загрузки фидеров, при однофазном и трехфазном подключении генерирующих источников и потребителей. Анализу подвергнут летний период с учетом отсутствия внешней несимметрии. Делаются выводы о возможностях снижения несимметрии напряжения в низковольтных распределительных электрических сетях с объектами микрогенерации. Научная значимость исследования состоит в выявлении особенностей влияния объектов микрогенерации на базе ВИЭ на

несимметрию напряжений и обосновании расширенной совокупности условий и факторов, оказывающих влияние на значения несимметрии напряжений. Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при обосновании мероприятий по повышению качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации на базе фотоэлектрических преобразователей.

Методы исследования. В результате рассмотрения и изучения методологических подходов в основу настоящего исследования положен имитационный подход, в соответствии с которым применен метод математического моделирования.

Имитационный подход предполагает использование методологии конструирования аналогичных моделей и проведение с их помощью вычислительных экспериментов. В результате использования метода математического моделирования получено глубокое понимание влияния объектов микрогенерации на несимметрию напряжений, а также предложены и обоснованы решения по повышению качества электроэнергии в распределительных сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации.

Схема моделируемой распределительной электрической сети низкого напряжения с объектами микрогенерации представлена на рис. 3. Параметры сети представлены в табл. 1.

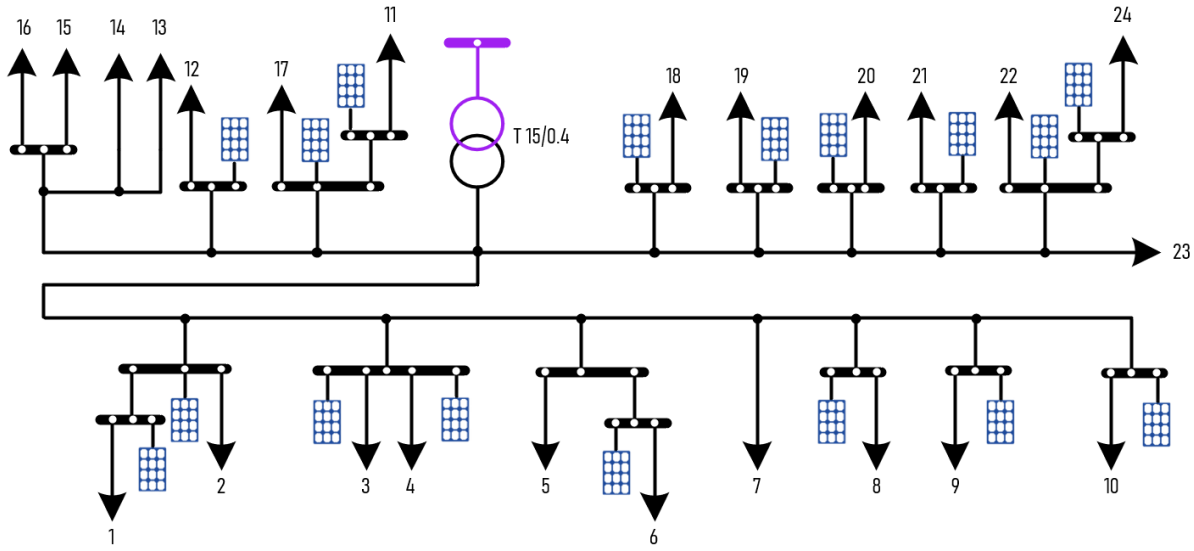


Рис. 3. Модель распределительной электрической сети 0,4 кВ с точками возможного подключения объектов микрогенерации

Таблица 1. **Параметры анализируемой модели распределительной электрической сети 0,4 кВ**

Протяженность ЛЭП, км	2,312
Напряжение ЛЭП, кВ	0,4
Количество анализируемых узлов	24
Количество узлов, в которых рассматривается внедрение солнечных электростанций	18

Для разработанной модели с учетом расположения домовладений определены точки возможного подключения объектов микрогенерации на базе ФЭП, установленная мощность которых не превышает максимальную присоединенную мощность энергопринимающих устройств (см. рис. 3). Нагрузки приняты в виде неизменной мощности, т.е. не зависящими от напряжения.

Для построения графика нагрузки использован программный комплекс Load Profile Generator [24], который предназначен для определения динамики энергопотребления на основе реальных данных. Нагрузки заданы с учетом данных о фактическом суточном энергопотреблении.

Для определения изменения во времени потенциальной выработки электроэнергии объектом микрогенерации проведен расчет количества приходящей на принимающую поверхность инсоляции с использованием метода, представленного в [25]. С использованием математического выражения, выведенного в [26], получены графики выработки электроэнергии объектом микрогенерации на базе ФЭП установленной мощности 3 кВт. В качестве упрощения для каждого узла моделируемой сети 0,4 кВ приняты одинаковые параметры энергопотребления и выработки электроэнергии объектом микрогенерации. Совмещенные графики вырабатываемой и потребляемой объектом микрогенерации электроэнергии представлены на рис. 4.

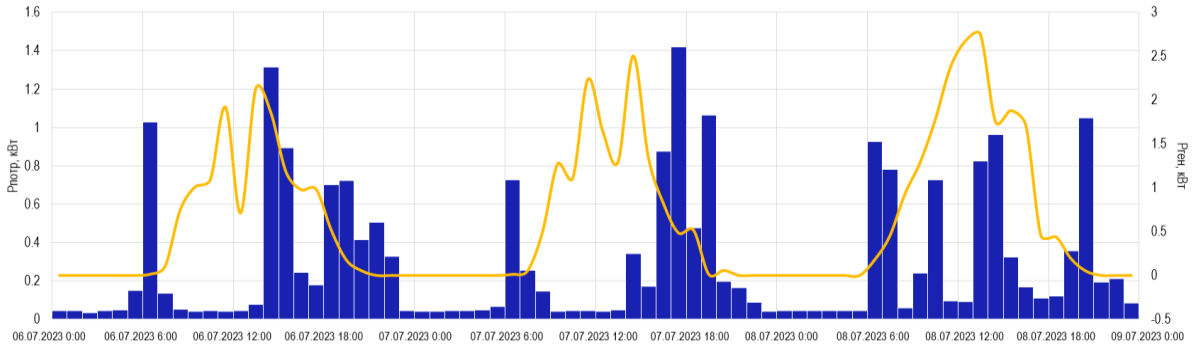


Рис. 4. Совмещенный суточный график энергопотребления домовладения и производства электроэнергии объектом микрогенерации по данным за 06.07.2023–08.07.2023

При анализе влияния объектов микрогенерации на несимметрию напряжений рассмотрены различные уровни внедрения генерирующих объектов. В рамках настоящего исследования уровень внедрения объектов микрогенерации (УВОМ) определяется согласно следующему выражению [27]:

$$УВОМ = \frac{\sum_{n=0}^{n=fact} P_{уст}}{\sum_{n=0}^{n=max} P_{уст}} \cdot 100\ \%, \qquad (4)$$

где в числителе приводится мощность установленных объектов микрогенерации, в знаменателе – мощность максимально возможного числа подключенных объектов микрогенерации.

Исследованию были подвергнуты сценарии при уровнях внедрения объектов микрогенерации от 10 до 100 %. Распределение нагрузок по фазам было выбрано с учетом проведенных в [28] реальных измерений токовых нагрузок в сетях 0,4 кВ: фаза А – 20 %; В – 20 %, С – 60 % от общего числа нагрузок.

Для определения узлов сети, в которых наиболее вероятно достижение нестабильности напряжения, выполнен анализ чувствительности *U-Q* [29, 30].

На рис. 5 представлены результаты анализа чувствительности узлов (*U-Q Sensitivity*), полученные на основании анализа потокораспределения методом Ньютона–Рафсона.

Для применения данного метода составляется система нелинейных уравнений в виде $F(x) = 0$, где $F(x)$ – вектор функций, зависящих от неизвестных переменных x. Для решения задач потокораспределения вектор $F(x)$ описывается уравнениями, характеризующими баланс мощности в каждом узле сети. На каждой итерации вычисляется матрица Якоби, которая является матрицей частных производных функций вектора $F(x)$ по переменным x. Матрица Якоби имеет размерность $N \times N$, где N – количество неизвестных переменных (количество узлов в сети). Каждый элемент матрицы Якоби определяется как частная производная i-го элемента вектора $F(x)$ по j-й переменной x [31] и имеет следующий вид:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix}. \qquad (5)$$

Итерационный процесс описывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \qquad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} J\delta P & JUP \\ J\delta Q & JUQ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix}.$$

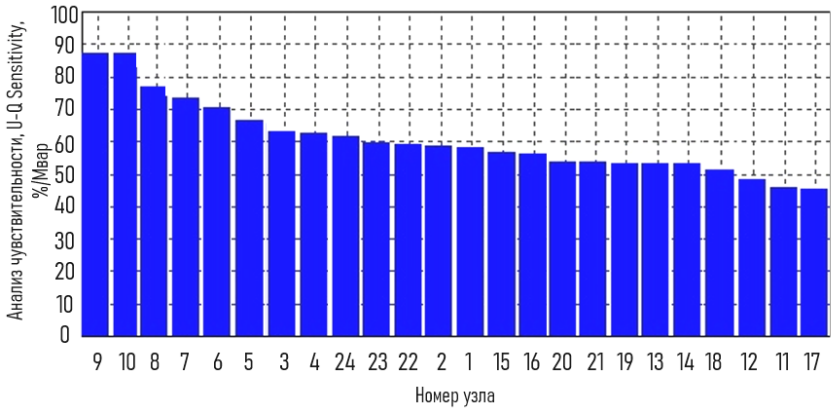


Рис. 5. Результаты расчета чувствительности узлов по критерию изменения напряжения (*U-Q Sensitivity*)

Система уравнений (6) решается на каждом шаге итерации методом Гаусса [32], после чего может быть найдено значение переменных в следующей итерации:

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k, \quad (7)$$

где J_{UP} и J_{UQ} – подматрицы Якоби, выражающие чувствительность напряжения узла к изменению активной и реактивной мощностей; $J_{\delta P}$ и $J_{\delta Q}$ – подматрицы Якоби, выражающие чувствительность фазового угла, измеренного в узле, к изменению активной и реактивной мощностей.

Элементы матрицы Якоби представляют собой инструмент для анализа влияния изменений параметров системы на ее стабильность. В данном случае на стабильность напряжения в системе влияют активная мощность P и реактивная мощность Q. Однако при анализе влияния данных параметров в каждой рабочей точке активная мощность P поддерживается постоянной и стабильность напряжения оценивается путем учета постепенных изменений реактивной мощности Q и напряжения U. Тогда выражение для нахождения ΔU имеет следующий вид:

$$\Delta U = S_r \Delta Q. \quad (8)$$

Согласно результатам проведенного исследования (рис. 5), в узлах 6–10 наблюдается наибольшее изменение напряжения, а в узлах 11, 12, 17 и 18 – наименьшее изменение напряжения. В связи с этим при рассмотрении процессов интеграции объектов микрогенерации предпочтение отдавалось использованию данных узлов, а анализируемый участок сети был разбит на отдельные фидеры. Дальнейшие результаты расчета приведены для фидера с узлами 1–10.

Результаты исследования. Результаты моделирования и расчетов коэффициентов несимметрии по обратной последовательности при УВОМ 10, 20, 40, 60, 80, 100 % представлены на рис. 6.

Графики изменения напряжения на каждой фазе в различных точках анализируемого участка сети при УВОМ 60 % для каждого из вариантов работы сети приведены на рис. 7.

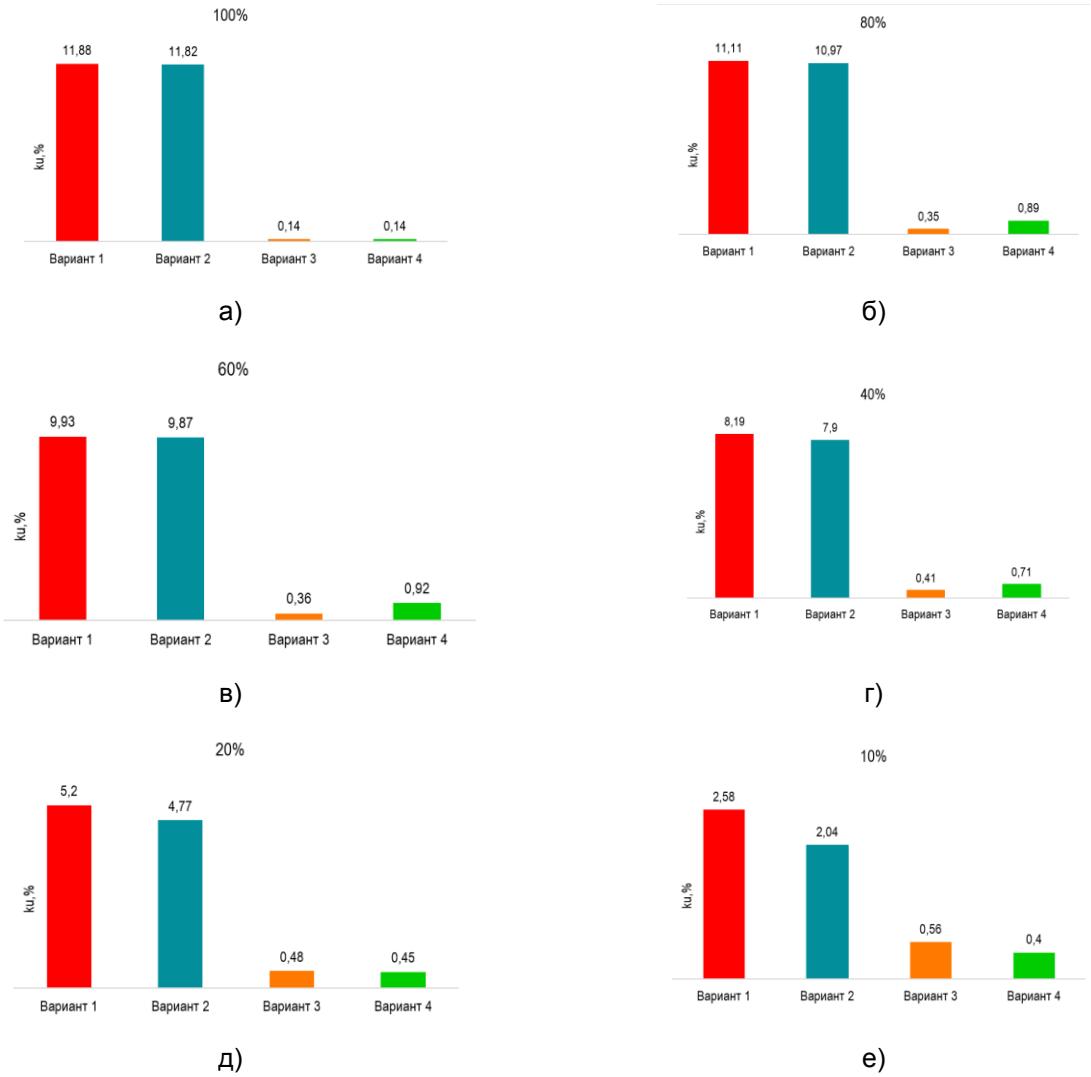
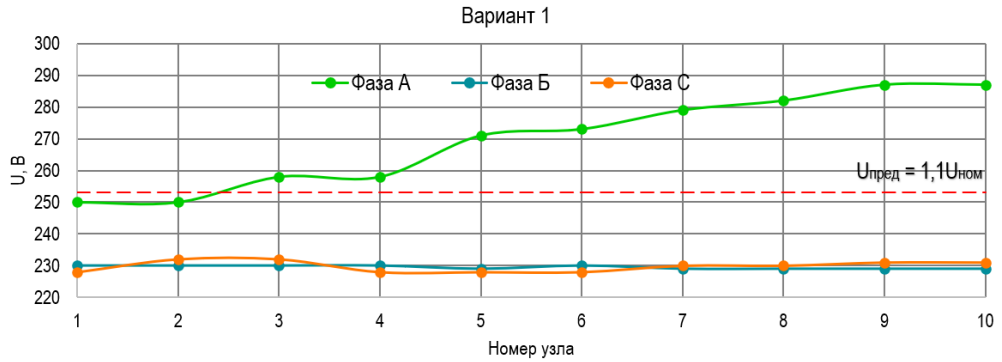
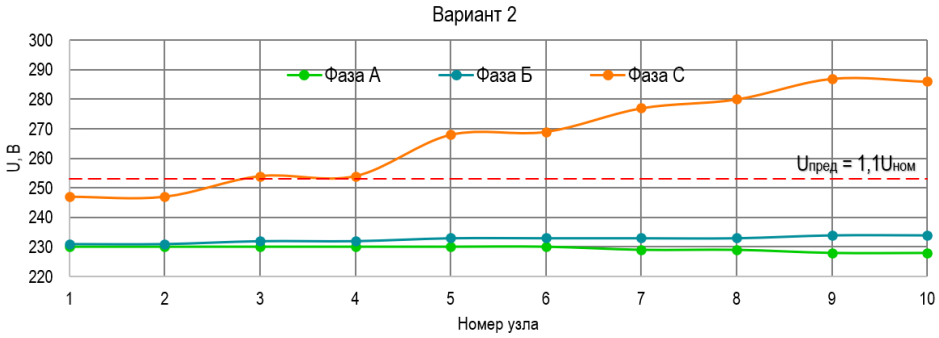


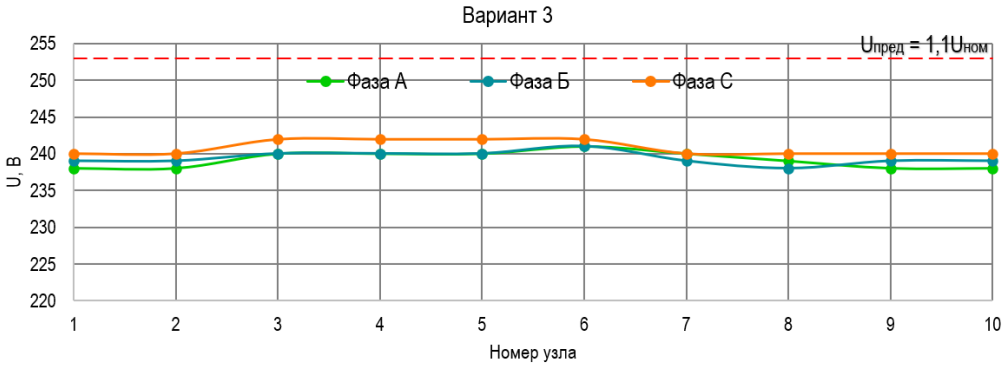
Рис. 6. Результаты расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при УВОМ: а – 100 %; б – 80 %; в – 60 %; г – 40 %; д – 20 %; е – 10 %



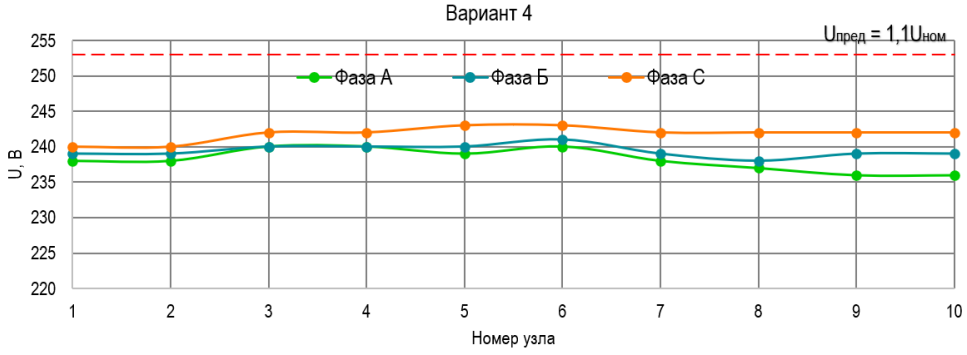
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Графики изменения напряжения на фазах в различных узлах сети: а – для варианта 1: объекты микрогенерации подключены к наименее загруженной фазе; б – для варинта 2: объекты микрогенерации подключены к наиболее загруженной фазе; в – для варианта 3: объекты микрогенерации перераспределяются между нагрузками фаз путем их переключения с наименее нагруженных фаз на наиболее нагруженные; г – для варианта 4: нагрузочные узлы с объектами микрогенерации имеют трехфазное подключение

При повышении разницы между фактической мощностью объекта микрогенерации и мощностью нагрузки несимметрия напряжений растет вследствие возникновения обратных потоков мощности и связанного с этим повышения напряжения, что особенно сказывается на наиболее удаленных узлах сети. На основании результатов проведенного исследования можно сделать вы-

вод, что при наличии несимметрии в сети без объектов микрогенерации их подключение может привести как к повышению, так и к снижению коэффициентов несимметрии. Однако при хаотичном подключении объектов микрогенерации возможно превышение установленных ГОСТ 32144-2013 пределов по несимметрии напряжений при различных УВОМ. Применительно к анализируемому случаю, при УВОМ = 20–100 % и однофазном подключении объектов микрогенерации без применения специализированных устройств симметрирования наблюдается превышение допустимых показателей несимметрии напряжений. Перевод потребителей с объектами микрогенерации с однофазного на трехфазное подключение либо перераспределение объектов микрогенерации между нагрузками фаз путем переключения с наименее нагруженных фаз на наиболее нагруженные позволит ограничить повышение напряжения сверх установленных пределов (табл. 2) и добиться снижения коэффициентов несимметрии даже по сравнению с изначальными параметрами сети до подключения генерирующих объектов.

Таблица 2. **Количество узлов рассматриваемого фидера, в которых наблюдалось превышение напряжения сверх установленных ГОСТ 32144-2013 пределов**

№ варианта	Количество узлов, в которых в процессе моделирования напряжение в узлах сети превышало 1,1*U*ном, при различных УВОМ, %					
	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	10 %
Вариант 1	10	10	8	6	2	0
Вариант 2	10	8	8	6	2	0
Вариант 3	4	0	0	0	0	0
Вариант 4	3	0	0	0	0	0

Выводы. Внедрение объектов микрогенерации на базе ФЭП в распределительные электрические сети низкого напряжения в случае превышения производства электроэнергии над потреблением в узле сети приводит к возникновению обратного потока мощности, оказывающего влияние на несимметрию напряжений из-за повышения напряжения в фазе сети, к которой подключен объект микрогенерации. Возникающая при этом несимметрия, которая может превышать установленные ГОСТ 32144-2013 пределы, и повышенное напряжение приводят к увеличению потерь электроэнергии, негативному воздействию на электроприемники и снижению уровня надежности электроснабжения.

В ходе проведенного исследования установлено, что основными факторами, характеризующими данное явление, являются: значение коэффициентов несимметрии в определенной точке сети до внедрения объектов микрогенерации; соотношения между мгновенной мощностью нагрузки потребителя и мгновенной мощностью объекта микрогенерации; стабильность напряжения в узлах сети, что, в свою очередь, зависит от электрической удаленности объектов микрогенерации от центра питания, параметров фидера и нагрузки.

Согласно полученным результатам, при УВОМ = 20–100 % и однофазном подключении объектов микрогенерации без применения специализированных устройств симметрирования наблюдается превышение допустимых показателей несимметрии напряжений. В условиях возможного роста числа объектов микрогенерации установлено, что наиболее эффективным решением проблемы несимметрии является перераспределение выдаваемой объектом микрогенерации мощности между нагрузками фаз путем переключения с наименее нагруженной фазы на наиболее нагруженную. Однако в отечественных исследованиях отсутствуют решения для повышения качества электроэнергии путем перераспределения выдаваемой объектом микрогенерации мощности, что свидетельствует о перспективности данного направления исследований в контексте повышения показателей качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации.

Список литературы

1. **Харитонов М.С., Кугучева Д.К.** Исследование влияния объектов микрогенерации на уровень напряжения в электрических сетях низкого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 1(82). – С. 34–43.

2. **Закарюкин В.П., Крюков А.В.** Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3-4. – С. 29–35.

3. **Солдатов В.А., Попов Н.М.** Расчет несимметричных режимов сетей 0,38 кВ в фазных координатах // Энергообеспечение и энергосбережение в сельскомхозяйстве: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 14–15 мая 2003 г. – М.: ВИЭСХ, 2003. – Ч. 1. – С. 136–141.

4. **Закарюкин В.П., Крюков А.В., Тхао В.Л.** Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. – Иркутск: ИрГУПС, 2020. – 296 с. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/200192.

5. **Фролов Ю.М., Шелякин В.П.** Основы электроснабжения: учеб. пособие [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. – СПб.: Лань, 2022. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/211058.

6. **Furfari F.A., Brittain J.** Charles LeGeyt Fortescue and the method of symmetrical components // IEEE Industry Applications Magazine. – 2002. – Vol. 8(3). – P. 7. https://doi.org/10.1109/MIA.2002.999605.

7. **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О.** Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. – 2014. – № 6. – С. 8–12.

8. **Вендин С.В., Килин С.В., Соловьев С.В.** Оценка эффективности мероприятий по снижению несимметрии и несинусоидальности в распределительных сетях 0,4–10 кВ // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – № 2(18). – С. 3–19.

9. **Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А.** Снижение несимметрии загрузки фаз и сокращение потерь электрической энергии в сетях 0,4 кВ ОГУЭП «ОБЛКОММУНЭНЕРГО» и ОАО «ИЭСК» // Научно-исследовательская деятельность аспирантов в решении приоритетных задач развития агропромышленного комплекса: материалы науч.-практ. конф., посвященной 70-летию аспирантуры Иркутского ГАУ, п. Молодежный, 06 декабря 2023 г. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2023. – С. 163–167.

10. **Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А.** Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 175–186.

11. **Воронин В.А.** О допустимых отклонениях напряжения для асинхронных двигателей // Сборник материалов VIII Всерос., науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием «Россия молодая», Кемерово, 19–22 апреля 2016 г. / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; отв. ред. О.В. Тайлаков. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2016. – С. 327.

12. **Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е.** Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 4(47). – С. 35–42.

13. **Булатов Ю.Н., Крюков А.В.** Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на работу генераторов установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 3(35). – С. 40–49. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-40-49.

14. **Самарин Г.Н., Сукиасян С.М., Егоров М.Ю.** Проблема несимметрии напряжений в сельских сетях и ее решение посредством разработки устройства симметрирования напряжений // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3. – С. 42–46.

15. **Наумов И.В.** Симметрирование режимов работы внутренних электрических трехфазных сетей как средство снижения пожарной опасности // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2021. – № 38. – С. 19–26.

16. **Лыкин А.В.** Электрические системы и сети: учебник [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/118089

17. **Улучшение** показателей качества электроэнергии в распределительных сетях напряжением 0,4–10 кВ / Э.Ю. Абдуллазянов, С.Н. Зарипова, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин // Энергетика Татарстана. – 2012. – № 1(25). – С. 3–7.

18. **Voltage** Unbalance Mitigation in Low Voltage Distribution Networks with Photovoltaic Systems / K.H. Chua, Y.S. Lim, J. Wong, et al. // Journal of Electronic Science and Technology. – 2012. – Vol. 10, Issue 1. – P. 1–6.

19. **Energy** management in unbalanced low voltage distribution networks with microgeneration and storage by using a multi-objective optimization algorithm / F.M. Camilo, R. Castro, M.E. Almeida, V. Fernão Pires // Journal of Energy Storage. – 2021. – Vol. 33. – P. 102100. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102100.

20. **Mitigation** of Voltage Unbalance in Low Voltage Distribution Network with High Level of Photovoltaic System / K.H. Chua, J. Wong, Y.S. Lim, et al. // Energy Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 495–501. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.066.

21. **Alabri W., Jayaweera D.** Voltage regulation in unbalanced power distribution systems with residential PV systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol. 131. – P. 107036.

22. **Tang N.C., Chang G.W.** A stochastic approach for determining PV hosting capacity of a distribution feeder considering voltage quality constraints // Proceedings of the International Conference on Harmonics and Quality of Power, Ljubljana, Slovenia, 13–16 May 2018. – Ljubljana, Slovenia, 2018. – P. 1–5.

23. **Photovoltaic** Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support / F. Barrero-González, V.F. Pires, J.L. Sousa, et al. // Energies. – 2019. – Vol. 12, Issue 6. – P. 972. https://doi.org/10.3390/en12060972.

24. **LoadProfileGenerator:** An Agent-Based Behavior Simulation for Generating Residential Load Profiles / N. Pflugradt, P. Stenzel, L. Kotzur, D. Stolten // Journal of Open Source Software. – 2022. – Vol. 7, Issue 71. – P. 3574. https://doi.org/10.21105/joss.03574

25. **Кугучева Д.К., Харитонов М.С.** Некоторые решения по оценке потенциала и повышению эффективности использования энергии солнца на примере Калининградской области // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2021. – № 5(86). – С. 7–17. DOI: 10.37493/2307-907X.2021.5.1. – EDN RXUFZP.

26. **Кугучева Д.К., Харитонов М.С.** Оценка влияния условий эксплуатации на функционирование фотоэлектрических панелей // Балтийский морской форум: материалы IX Междунар. Балтийского морского форума. В 6 т. Т. 1. XIX Междунар. науч. конф., Калининград, 04–09 октября 2021 г. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2022. – С. 599–605. – EDN WCAOLQ.

27. **Methods** and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks – A Review / V. Umoh, I. Davidson, A. Adebiyi, U. Ekpe // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3609. https://doi.org/10.3390/en16083609

28. **Additional** electric loss in rural distribution networks 0,38 kV / I. Naumov, D. Karamov, A. Tretyakov, et al. // E3S Web Conf. – 2020. – Vol. 209. – P. 07007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007

29. **Qemali M., Bualoti R., Celo M.** Voltage Stability Analysis in the Albanian Power System // Asian Online Journals (www.ajouronline.com) Asian Journal of Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 2. – P. 119–128.

30. **Stanchev P., Vacheva G., Hinov N.** Evaluation of Voltage Stability in Microgrid-Tied Photovoltaic Systems // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 4895. https://doi.org/10.3390/ en16134895.

31. **Section 5**: Power Flow: Energy Distribution Systems (Oregon State University). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: clck.ru/37KXHC.

32. **Seedahmed M., Mokred S., Kamara G.** Voltage Stability Estimation for Complex Power System Based on Modal Analytical Techniques // 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. – Noida, India, 2019. – P. 1035–1041. DOI: 10.1109/SPIN.2019.8711683.

33. **Оморов Т.Т.** Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 3. – С. 194–200.

References

1. Kharitonov, M.S., Kugucheva, D.K. Issledovanie vliyaniya ob"ektov mikrogeneratsii na uroven' napryazheniya v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Study of the influence of microgeneration objects on the voltage level in low-voltage electrical networks]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2024, no. 1(82), pp. 34–43.

2. Zakaryukin, V.P., Kryukov, A.V. Utochnennaya metodika opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy smezhnykh liniy elektroperedachi [Refined methodology for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2015, no. 3-4, pp. 29–35.

3. Soldatov, V.A., Popov, N.M. Raschet nesimmetrichnykh rezhimov setey 0,38 kV v faznykh koordinatakh [Calculation of asymmetric modes of 0,38 kV networks in phase coordinates]. *Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skomhozyajstve», Moskva, 14–15 maya 2003 g.* [Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference “Power supply and energy saving in agriculture”, Moscow, May 14–15, 2003]. Moscow: VIESKh, 2003, part 1, pp. 136–141.

4. Zakaryukin, V.P., Kryukov, A.V., Tkhao, V.L. *Kompleksnoe modelirovanie mul'tifaznykh, mnogotsepnykh i kompaktnykh liniy elektroperedachi* [Integrated modeling of multiphase, multi-circuit and compact power transmission lines]. Irkutsk: IrGUPS, 2020. 296 p.

5. Frolov, Yu.M., Shelyakin, V.P. *Osnovy elektrosnabzheniya* [Basics of power supply]. Saint-Petersburg: Lan', 2022. Available at: https://e.lanbook.com/book/211058.

6. Furfari, F.A., Brittain, J. Charles LeGeyt Fortescue and the method of symmetrical components. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002, vol. 8(3), p. 7. DOI.org/10.1109/MIA.2002.999605.

7. Kosoukhov, F.D., Vasil'ev, N.V., Filippov, A.O. Snizhenie poter' ot nesimmetrii tokov i povyshenie kachestva elektricheskoy energii v setyakh 0,38 kV s kommunal'no-bytovymi nagruzkami [Reducing losses from current asymmetry and improving the quality of electrical energy in 0,38 kV networks with household loads]. *Elektrotekhnika*, 2014, no. 6, pp. 8–12.

8. Vendin, S.V., Kilin, S.V., Solov'ev, S.V. Otsenka effektivnosti meropriyatiy po snizheniyu nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v raspredelitel'nykh setyakh 0,4–10 kV [Evaluation of the effectiveness of measures to reduce asymmetry and non-sinusoidality in distribution networks 0,4–10 kV]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*, 2018, no. 2(18), pp. 3–19.

9. Naumov, I.V., Fedorinova, E.S., Yakupova, M.A. Snizhenie nesimmetrii zagruzki faz i sokrashchenie poter' elektricheskoy energii v setyakh 0,4 KV OGUEP «OBLKOMMUNENERGO» i OAO «IESK» [Reducing phase load asymmetry and reducing electrical energy losses in 0,4 kV networks of OGUEP “OBLKOMMUNENERGO” and JSC “IESK”]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchno-issledovatel'skaya deyatel'nost' aspirantov v reshenii prioritetnykh zadach razvitiya agropromyshlennogo kompleksa», posvyashchennoy 70-letiyu aspirantury Irkutskogo GAU, p. Molodezhnyy, 06 dekabrya 2023 g.* [Proceedings of the scientific-practical conference “Research activities of postgraduate students in solving priority problems of agricultural complex development”, dedicated to the 70th anniversary of postgraduate studies of Irkutsk State Agrarian University, Molodezhnyy, December 6, 2023]. Molodezhnyy: Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. A.A. Ezhevskogo, 2023, pp. 163–167.

10. Naumov, I.V., Fedorinova, E.S., Yakupova, M.A. Ustroystvo dlya upravleniya nesimmetrichnymi rezhimami v komponentakh nizkovol'tnykh sistem elektrosnabzheniya [Device for controlling asymmetric modes in components of low-voltage power supply systems]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 175–186.

11. Voronin, V.A. O dopustimykh otkloneniyakh napryazheniya dlya asinkhronnykh dvigateley [On permissible voltage deviations for asynchronous motors]. *Sbornik materialov VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya», Kemerovo, 19–22 aprelya 2016 g.* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with International Participation “Young Russia”, Kemerovo, April 19–22, 2016]. Kemerovo: Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2016, p. 327.

12. Dulepov, D.E., Tyundina, T.E. Raschet nesimmetrii napryazheniy SES [Calculation of voltage asymmetry of solar power plants]. *Vestnik NGIEI*, 2015, no. 4(47), pp. 35–42.

13. Bulatov, Yu.N., Kryukov, A.V. Vliyanie nelineynoy i nesimmetrichnoy nagruzki na rabotu generatorov ustanovok raspredelennoy generatsii [Influence of nonlinear and asymmetrical load on the operation of generators of distributed generation installations]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2017, no. 3(35), pp. 40–49. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-40-49.

14. Samarin, G.N., Sukiasyan, S.M., Egorov, M.Yu. Problema nesimmetrii napryazheniy v sel'skikh setyakh i ee reshenie posredstvom razrabotki ustroystva simmetrirovaniya napryazheniy [The problem of voltage asymmetry in rural networks and its solution through the development of a voltage balancing device]. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2013, no. 3, pp. 42–46.

15. Naumov, I.V. Simmetrirovanie rezhimov raboty vnutrennikh elektricheskikh trekhfaznykh setey kak sredstvo snizheniya pozharnoy opasnosti [Balancing operating modes of internal electrical three-phase networks as a means of reducing fire danger]. *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki*, 2021, no. 38, pp. 19–26.

16. Lykin, A.V. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Novosibirsk: NGTU, 2017. Available at: https://e.lanbook.com/book/118089

17. Abdullazyanov, E.Yu., Zaripova, S.N., Fedotov, A.I., Akhmetshin, A.R. Uluchshenie pokazateley kachestva elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh napryazheniem 0,4–10 kV [Improving power quality

indicators in distribution networks with voltage 0,4–10 kV]. *Energetika Tatarstana*, 2012, no. 1(25), pp. 3–7.

18. Chua, K.H., Lim, Y.S., Wong, J., Taylor, P., Morris, E., Morris, S. Voltage Unbalance Mitigation in Low Voltage Distribution Networks with Photovoltaic Systems. *Journal of Electronic Science and Technology,* 2012, vol. 10, issue 1, pp. 1–6.

19. Camilo, F.M., Castro, R., Almeida, M.E., Pires, F.V. Energy management in unbalanced low voltage distribution networks with microgeneration and storage by using a multi-objective optimization algorithm. *Journal of Energy Storage,* 2021, vol. 33, p. 102100. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102100.

20. Chua, K.H., Wong, J., Lim, Y.S., Taylor, P., Morris, E., Morris, S. Mitigation of Voltage Unbalance in Low Voltage Distribution Network with High Level of Photovoltaic System. *Energy Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 495–501. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.066.

21. Alabri, W., Jayaweera, D. Voltage regulation in unbalanced power distribution systems with residential PV systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 131, p. 107036.

22. Tang, N.C., Chang, G.W. A stochastic approach for determining PV hosting capacity of a distribution feeder considering voltage quality constraints. *Proceedings of the International Conference on Harmonics and Quality of Power, Ljubljana, Slovenia, 13–16 May 2018*. Ljubljana, Slovenia, 2018, pp. 1–5.

23. Barrero-González, F., Pires, V.F., Sousa, J.L., Martins, J.F., Milanés-Montero, M.I., González-Romera, E., Romero-Cadaval, E. Photovoltaic Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support. *Energies*, 2019, vol. 12, p. 972. https://doi.org/10.3390/en12060972

24. Pflugradt, N., Stenzel, P., Kotzur, L., Stolten, D. LoadProfileGenerator: An Agent-Based Behavior Simulation for Generating Residential Load Profiles. *Journal of Open Source Software*, 2022, vol. 7, issue 71, p. 3574. https://doi.org/10.21105/josP.03574

25. Kugucheva, D.K., Kharitonov, M.S. Nekotorye resheniya po otsenke potentsiala i povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya energii solntsa na primere Kaliningradskoy oblasti [Some solutions for assessing the potential and increasing the efficiency of using solar energy using the example of the Kaliningrad region]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2021, no. 5(86), pp. 7–17. DOI: 10.37493/2307-907X.2021.5.1. EDN RXUFZP.

26. Kugucheva, D.K., Kharitonov, M.S. Otsenka vliyaniya usloviy ekspluatatsii na funktsionirovanie fotoelektricheskikh paneley [Assessing the influence of operating conditions on the functioning of photovoltaic panels]. *Materialy IX Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6 t. T. 1. XIX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, Kaliningrad, 04–09 oktyabrya 2021 g.* [Proceedings of the IX International Baltic Maritime Forum. In 6 vols. Vol. 1. XIX International Scientific Conference, Kaliningrad, October 4–9, 2021]. Kaliningrad: Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2022, pp. 599–605.

27. Umoh, V., Davidson, I., Adebiyi, A., Ekpe, U. Methods and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks – A Review. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 3609. https://doi.org/10.3390/en16083609

28. Naumov, I., Karamov, D., Tretyakov, A., Fedorinova, E., Yakupova, M. Additional electric loss in rural distribution networks 0,38 kV. *E3S Web Conf*., 2020, vol. 209, p. 07007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007

29. Qemali, M., Bualoti, R., Celo, M. Voltage Stability Analysis in the Albanian Power System. Asian Online Journals (www.ajouronline.com) *Asian Journal of Engineering and Technology*, 2014, vol. 2, pp. 119–128.

30. Stanchev, P., Vacheva, G., Hinov, N. Evaluation of Voltage Stability in Microgrid-Tied Photovoltaic Systems. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 4895. https://doi.org/10.3390/ en16134895

31. Section 5: Power Flow: Energy Distribution Systems (Oregon State University). Available at: clck.ru/37KXHC.

32. Seedahmed, M., Mokred, S., Kamara, G. Voltage Stability Estimation for Complex Power System Based on Modal Analytical Techniques. *6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*. Noida, India, 2019, pp. 1035–1041. DOI: 10.1109/SPIN.2019.8711683.

33. Omorov, T.T. Simmetrirovanie raspredelennoy elektricheskoy seti metodom tsifrovogo regulirovaniya [Balancing of a distributed electrical network using the digital control method]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 194–200.