

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

УДК 336.76

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.3>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Дарья Константиновна Кугучева

Калининградский государственный технический университет (д. 1, Советский проспект, Калининград, 236022, Российская Федерация)
kuguchevad@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0825-1600>

Аннотация. Введение. В статье рассматривается влияние объектов микрогенерации на базе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на показатели качества электроэнергии, связанные с положительным и отрицательным отклонением напряжения, а также влияние технического устройства регулирования выходной мощности на данные показатели. **Цель** – определение влияния объектов микрогенерации на базе ФЭП на показатели качества электроэнергии, связанные с медленными изменениями напряжения, и исследование на математической модели технического решения по регулированию выходной мощности ФЭП посредством установки систем позиционирования. **Материалы и методы.** В работе использовался имитационный подход, в соответствии с которым был применен метод математического моделирования. **Результаты и обсуждение.** При рассмотрении случаев различного уровня внедрения объектов микрогенерации на базе ФЭП выявлена вероятность негативного воздействия объектов микрогенерации на значения напряжения в узлах электрической сети. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что изменение выходной мощности фотоэлектрических преобразователей позволяет нивелировать недостатки внедрения объектов микрогенерации, связанные с повышенным напряжением, и повысить качество электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения.

Ключевые слова: микрогенерация, фотоэлектрические преобразователи, качество электроэнергии, отклонения напряжения, солнечная энергетика, система позиционирования

Для цитирования: Кугучева Д. К. Оценка эффективности регулирования выходной мощности фотоэлектрических преобразователей для повышения качества электроэнергии // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1 (100). С. 31–43. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.3>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.10.2023;

одобрена после рецензирования 25.10.2023;

принята к публикации 02.11.2023.

Research article

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REGULATING THE OUTPUT POWER OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS TO IMPROVE THE QUALITY OF ELECTRICITY

Darya K. Kugucheva

Kaliningrad State Technical University (1, Sovetsky Avenue, Kaliningrad, 236022, Russian Federation)
kuguchevad@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0825-1600>

Abstract. Introduction. The article examines the influence of microgeneration facilities based on photovoltaic converters on power quality indicators associated with positive and negative voltage deviation, as well as the influence of a technical device for regulating output power on these indicators. **Goal.** Determination of the influence of micro-generation facilities based on PV on power quality indicators associated with slow voltage changes, and a study using a mathematical model of a technical solution for regulating the output power of PV through the installation of positioning systems. **Materials and methods.** The work used a simulation approach, according to which the method of mathematical modeling was applied. **Results and discussion.** When considering cases of various levels of implementation of microgeneration facilities based on PV, the likelihood of a negative impact of microgeneration facilities on the voltage values in the nodes of the electrical network was identified. **Conclusion.** Based on the results of the study, we can conclude that changing the output power of photovoltaic converters makes it possible to mitigate the disadvantages of introducing microgeneration facilities associated with increased voltage and improve the quality of electricity in low-voltage electrical distribution networks.

Keywords: microgeneration, photovoltaic converters, power quality, voltage deviations, solar energy, photovoltaic panel positioning system

For citation: Kugucheva DK. Evaluation of the efficiency of regulating the output power of photovoltaic converters to improve the quality of electricity. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2024;1(100):31-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.3>

Conflict of interest: the author declares no conflict of interests.

The article was submitted 03.10.2023;

approved after reviewing 25.10.2023;

accepted for publication 02.11.2023.

© Кугучева Д. К., 2024

Введение / Introduction. Возобновляемая энергетика является перспективным направлением развития энергетической отрасли. Отказ от традиционных источников энергии, основанных на использовании углеводородного топлива, и переход к возобновляемой энергетике играет важную роль в борьбе с изменением климата и в достижении экологической устойчивости. В России на протяжении последних лет интеграция возобновляемых источников энергии в электрические сети приобрела популярность благодаря ряду принятых законодательных мер [1, 2, 3]. Ввиду данных законодательных инициатив в России был преодолен порог в 6,0 ГВт по установленной мощности объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии (рис. 1) [4].

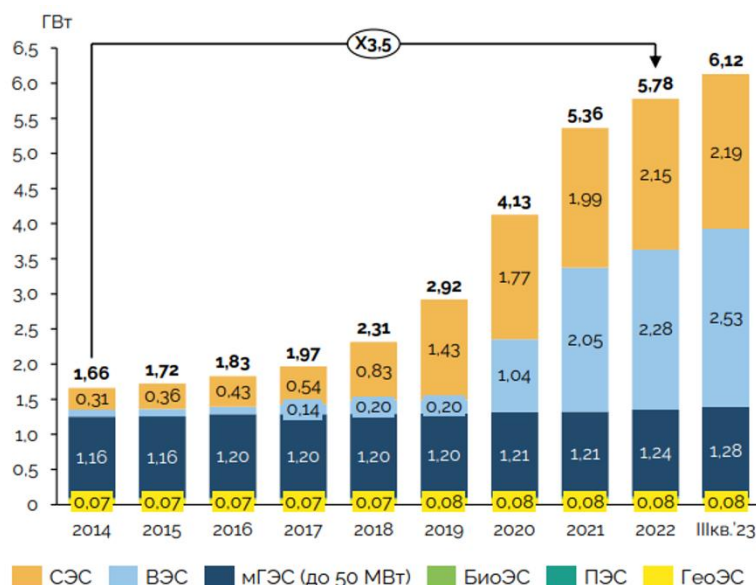


Рис. 1. Совокупная установленная мощность электростанций на основе ВИЭ, ГВт /
Fig. 1. Total installed capacity of power plants based on renewable energy sources, GW.

*Источник: [1] / Source: [1]

Особую роль в стимулировании инвестиций в эту область играют Федеральный закон № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части развития микрогенерации» [5] 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» [6], благодаря которым функционирует механизм сальдирования (продажи) излишков выработанной электроэнергии от объектов микрогенерации в пределах 15 кВт, под действием которого микрогенерация в России получает все большее признание и распространение.

Объект микрогенерации – объект по производству электрической энергии, подключенный к сети до 1000 В и функционирующий в том числе на основе использования возобновляемых источников энергии. В соответствии с [6] населению и предприятиям всех форм собственности разрешено производить электроэнергию в целях удовлетворения собственных бытовых и (или) производственных нужд и продавать в сеть излишки электроэнергии.

Данный молодой сектор энергетики развивается ускоренными темпами, и, согласно прогнозам, годовой прирост установленной мощности объектов микрогенерации в распределительных сетях низкого напряжения может достичь 150 МВт в год [7].

Одним из наиболее востребованных генерирующих источников, устанавливаемых в качестве объектов микрогенерации, являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) [8]. Данные генерирующие источники малой мощности, подключенные к низковольтной сети, могут оказать существенное влияние на переток мощности. В связи с тем, что низковольтные сети не рассчитаны на возникновение обратных потоков мощности, высокое проникновение объектов микрогенерации в сеть может привести к следующим проблемам: изменение профиля напряжения в сети [9, 10], несимметрия напряжения [11, 12], колебания реактивной мощности и увеличение потерь электроэнергии [13], гар-

моники [14], фликер [15]. Одной из ключевых проблем изменения направления потоков мощности в низковольтной сети с объектами микрогенерации является повышение напряжения [16–19].

Для снижения чувствительности напряжения в узлах к изменению активной и реактивной мощности и уменьшения негативного влияния генерирующих установок на сети низкого напряжения в работах разных авторов предложен ряд методов: реконфигурация сети [20], использование инверторов увеличенной мощности [21], использование интеллектуальных инверторов [22], внедрение накопителей электроэнергии [23], установка регуляторов напряжения вдоль линии [24], использование РПН [25], управление спросом [26], управление реактивной мощностью инвертора и компенсация тока нейтрали [27]. Однако данные меры носят активный характер и требуют значительных капиталовложений.

Согласно проведенным в [28] исследованиям, изменение уровня напряжения в узлах сети зависит от соотношения между мощностью нагрузки потребителя и мощностью объекта микрогенерации, а также от электрической удаленности объектов микрогенерации от центра питания и параметров фидера (рис. 2).

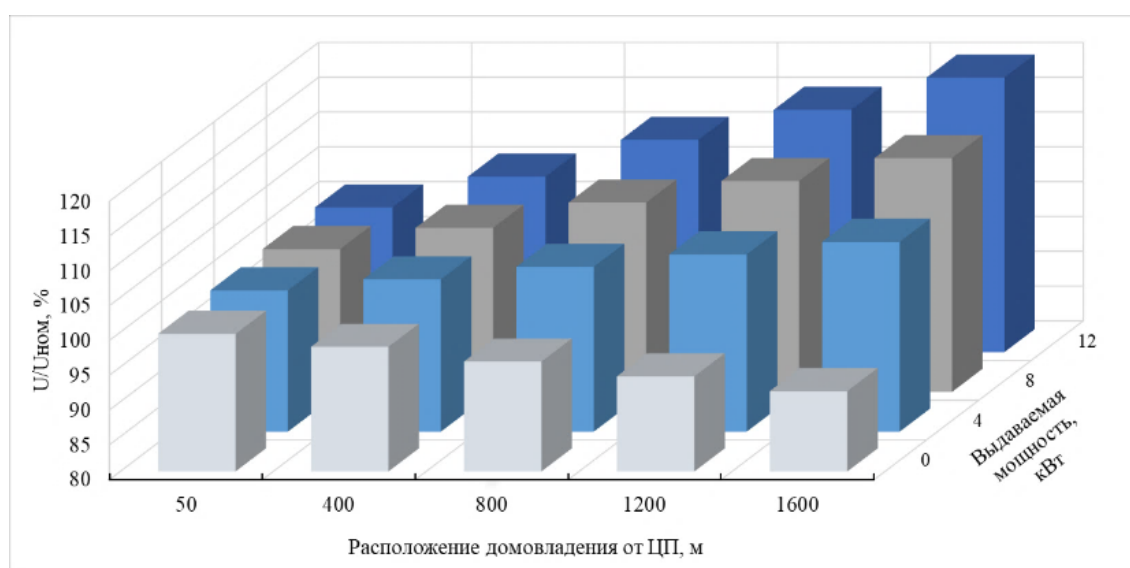


Рис. 2. Влияние местоположения объектов микрогенерации и выдаваемой в сеть мощности на отклонение напряжения в точке подключения потребителей / Fig.2. The influence of the location of microgeneration facilities and the power supplied to the network on the voltage deviation at the point of connection of consumers

*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

Для повышения качества электроэнергии в рамках данного исследования предлагается воздействие на количество выдаваемой в сеть электроэнергии объектом микрогенерации путем внедрения систем позиционирования ФЭП. Предлагается способ уменьшения выдачи электроэнергии в периоды превышения допустимых отклонений напряжения от номинального значения в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [29]:

$$\delta U_{(+)} = \frac{(U_{m(+)} - U_0)}{U_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где $U_{m(+)}$ – значение напряжения электропитания, большее U_0 , усредненное в интервале времени 10 мин.

Для указанного показателя установлены следующие нормы: положительные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю [29].

В периоды, когда возникновение обратных потоков мощности не вызывает недопустимого отклонения показателей качества электроэнергии, возможно увеличить количество генерируемой электроэнергии. Это, в свою очередь, может привести к повышению напряжения в узлах сети, согласно [30], однако данное повышение может благоприятно сказаться на удаленных узлах сети, которые в периоды высокого энергопотребления могут характеризоваться пониженным напряжением.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. На основе рассмотрения и изучения методологических подходов и методов в основу данной работы легли имитационный подход, в соответствии с которым был применен метод математического моделирования.

Имитационный подход в данной работе предполагает использование методологии конструирования аналогичных моделей и проведение с их помощью вычислительных экспериментов. Методом математического моделирования было выявлено существенное влияние объектов микрогенерации на показатели качества электроэнергии и были выработаны решения по повышению качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации.

В качестве способа регулирования выдачи электроэнергии в сеть объектами микрогенерации на базе ФЭП предлагается использование систем позиционирования, которые являются распространенным решением для повышения эффективности использования солнечной энергии. В основе современных систем слежения за солнцем лежит принцип поворота группы фотоэлектрических панелей по азимутальному и зенитному углам. Предлагаемый в данной работе способ ориентации фотоэлектрических панелей основан на изменении азимутального угла и неизменном наклоне ФЭП относительно горизонта. Данный способ поворота позволяет при небольшом изменении угла в широких пределах изменить количество производимой электроэнергии ФЭП (рис. 3). Эффективность данного способа для повышения количества вырабатываемой электроэнергии ФЭП и подробное обоснование выбора данного способа поворота представлены в работах [31, 32].

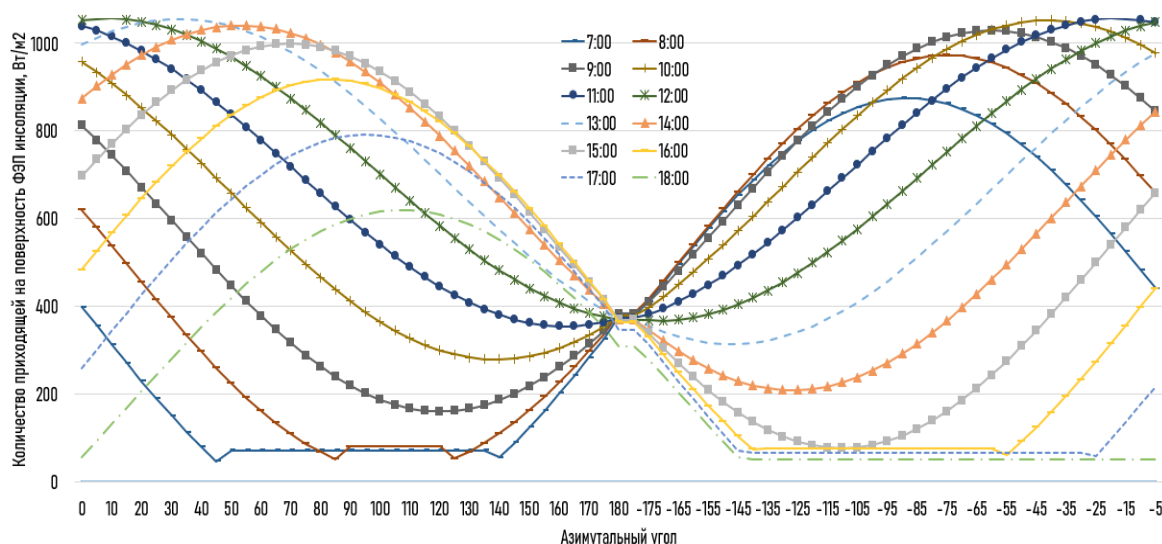


Рис. 3. Зависимость количества приходящего на поверхность ФЭП солнечного излучения от угла поворота ФЭП по азимуту без учета облачности, пример для 11 июня, г. Калининград /

Fig.3. Dependence of the amount of solar radiation arriving at the surface of the solar cell on the angle of rotation of the solar cell in azimuth without taking into account cloudiness, example for June 11, Kaliningrad

*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

Для поддержания напряжения в допустимых пределах предлагается использование двух режимов функционирования системы позиционирования: 1) режим максимизации приходящего на поверхность ФЭП количества солнечного излучения путем ориентации ФЭП по направлению солнца и 2) режим снижения количества приходящего на поверхность ФЭП излучения путем отворота ФЭП в противоположную от солнца сторону. Режим, в котором функционирует система позиционирования, зависит от:

- значения напряжения на выходе инвертора;
- количества энергии, потребляемой нагрузкой;
- количества энергии, произведенной ФЭП.

В таблице 1 приведены условия, определяющие режим работы системы позиционирования.

Таблица 1 / Table 1

Перечень рабочих условий, определяющих режим работы системы позиционирования / List of operating conditions that determine the operating mode of the positioning system

№ n/n	Напряжение	Мощность нагрузки	Мощность ФЭП	Доп. условия	Регулирование выходной мощ- ности ФЭП
1	$\delta U < 10 \%$	$P_{\text{нагр}} \neq 0$	$P_{\text{ФЭП}} = 0$	-	-
2	$\delta U > 10 \%$	$P_{\text{нагр}} \neq 0$	$P_{\text{ФЭП}} = 0$		-
3	$\delta U < 10 \%$	$P_{\text{нагр}} = 0$	$P_{\text{ФЭП}} > 0$		↑
4	$\delta U > 10 \%$	$P_{\text{нагр}} = 0$	$P_{\text{ФЭП}} > 0$		↓
5	$\delta U < 10 \%$	$P_{\text{нагр}} > 0$	$P_{\text{ФЭП}} > 0$		↑
6	$\delta U > 10 \%$	$P_{\text{нагр}} > 0$	$P_{\text{ФЭП}} > 0$	$P_{\text{нагр}} < P_{\text{ФЭП}}$	↓
7	$\delta U > 10 \%$	$P_{\text{нагр}} > 0$	$P_{\text{ФЭП}} > 0$	$P_{\text{нагр}} > P_{\text{ФЭП}}$	-

Примечание: символ ↑ означает повышение производства электроэнергии посредством оптимальной ориентации ФЭП в сторону максимального излучения; символ ↓ означает снижение производства электроэнергии посредством уменьшения количества приходящего солнечного излучения (отворот ФЭП от солнца).

* Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

Для оценки влияния регулирования выдачи электроэнергии в сеть объектами микрогенерации на базе ФЭП на показатели качества электроэнергии, связанные с отклонениями напряжения, была построена математическая модель распределительной сети низкого напряжения в программном комплексе Matlab / Simulink (рис. 4). Модель включает несколько домовладений, одно из которых имеет объект микрогенерации, установленная мощность которого 3 кВт. Домовладения находятся на удалении 2 км от трансформаторной подстанции. Условно принято симметричное подключение генерирующего объекта и потребителей электроэнергии, работа объектов микрогенерации осуществляется с $\cos \varphi = 1$. Мощность ФЭП и количество потребляемой электроэнергии изменяются в соответствии с рисунком 5, на котором представлен совмещенный суточный график энергопотребления домовладения и производства электроэнергии объектом микрогенерации с устройством позиционирования для поворота ФЭП по азимутальному углу. Количество вырабатываемой электроэнергии ФЭП рассчитано с использованием специализированного программного продукта [33].

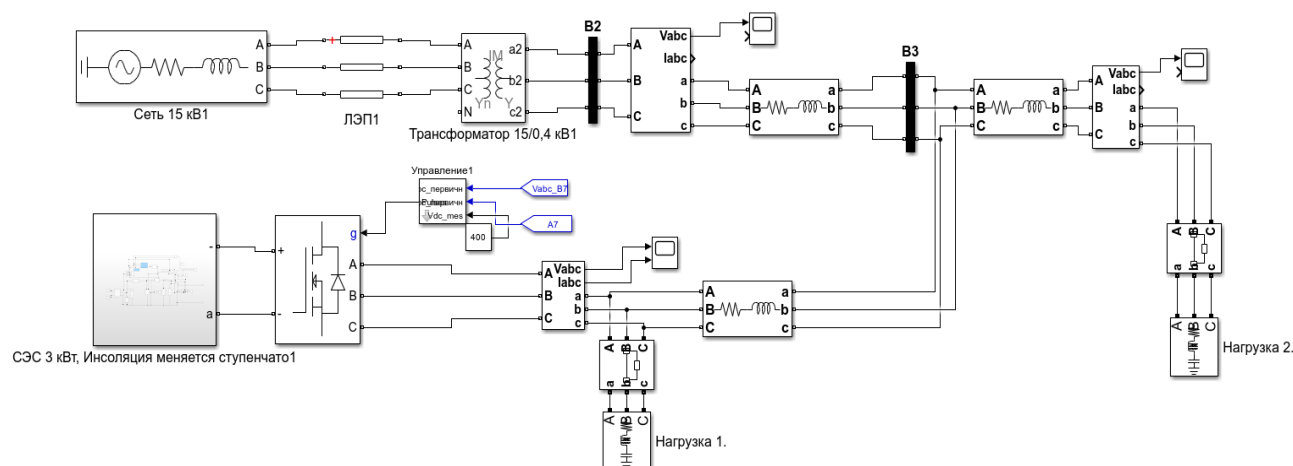


Рис. 4. Модель распределительной сети низкого напряжения с объектами микрогенерации /
Fig. 4. Model of a low voltage distribution network with microgeneration facilities

*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

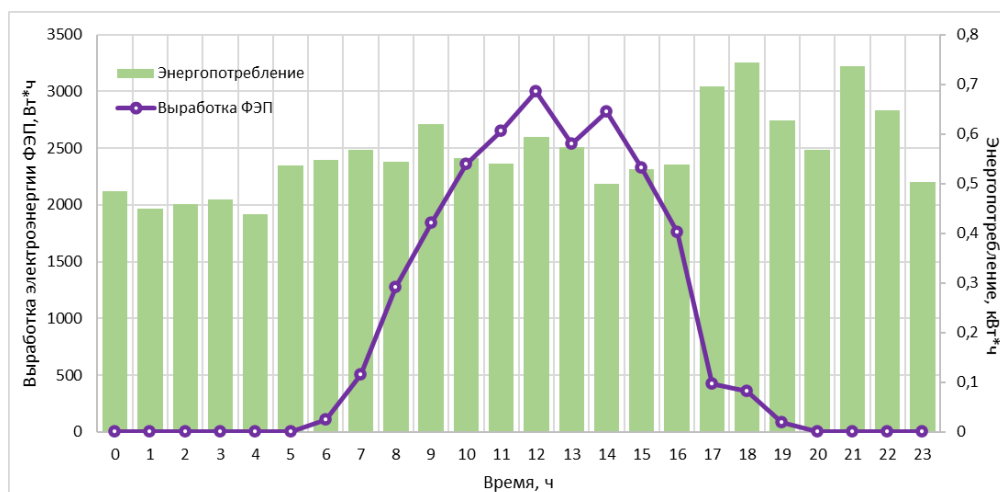


Рис. 5. Совмещенный суточный график энергопотребления домовладения и производства электроэнергии объектом микрогенерации / Fig. 5. Combined daily schedule of household energy consumption and electricity production by a microgeneration facility
*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Согласно проведённым на математической модели исследованиям, снижение выходной мощности ФЭП в пределах 5–15 % позволит поддержать значение напряжения в точке подключения потребителя в пределах $(1 - 1,1) U_{ном}$ (рис. 6).

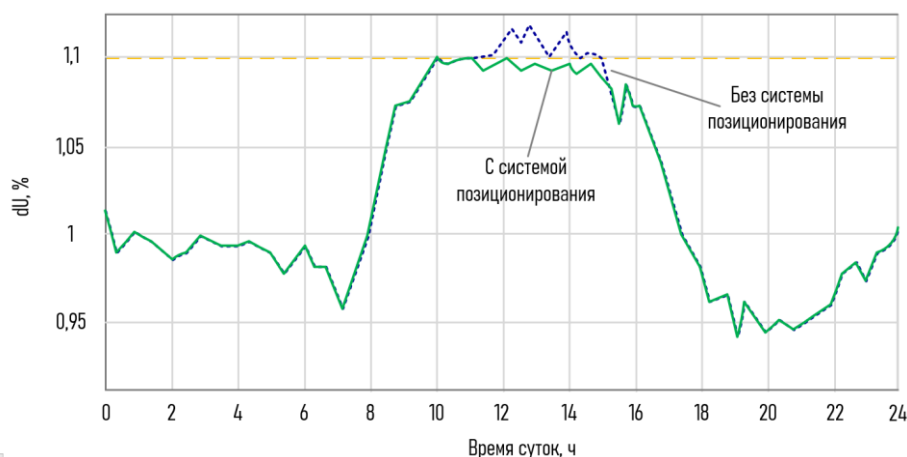


Рис. 6. График зависимости отклонения напряжения от номинального значения в нагрузочном узле с объектом микрогенерации без системы позиционирования и с системой позиционирования / Fig. 6. Dependence of voltage deviation from the nominal value in a load node with a microgeneration facility without a positioning system and with a positioning system
*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

В отсутствии оснований полагать, что все объекты микрогенерации будут оснащены устройствами позиционирования, рассмотрены случаи внедрения различного числа объектов микрогенерации на базе ФЭП с учетом различного уровня внедрения систем позиционирования. Исследование проводилось на математической модели существующего участка сети 0,4 кВ Калининградской области, обеспечивающей электроснабжение индивидуальных жилых домов на территории поселка сельского типа (рис. 7). Анализируемые случаи приведены в таблице 2.

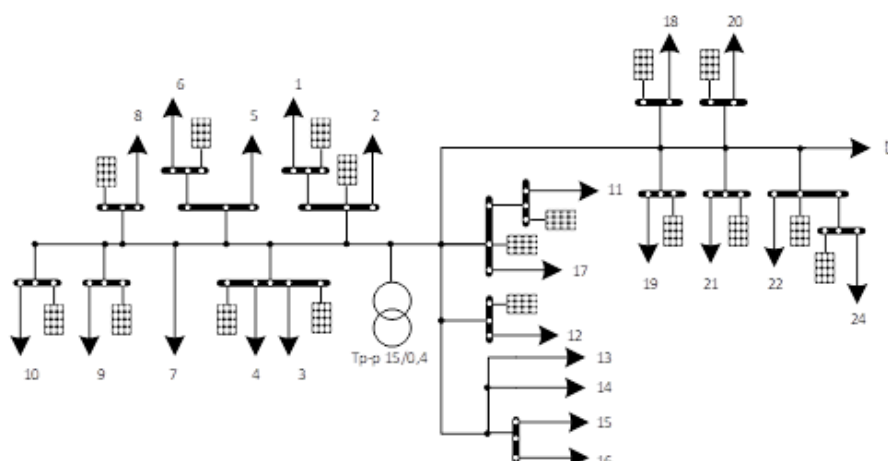


Рис. 7. Модель сети 0,4 кВ с точками возможного подключения объектов микрогенерации / Fig. 7. Model of a 0.4 kV network with points of possible connection of microgeneration facilities

*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

Таблица 2 / Table 2

Анализируемые варианты внедрения объектов микрогенерации на базе ФЭП / Analyzed options for introducing microgeneration facilities based on solar power plants

№ (рис. 8, 9)	Уровень внедрения объектов микрогенерации*	Количество систем позиционирования от общего числа объектов микрогенерации, %
1(а)	Без объектов микрогенерации	0
1(б)	70 %	
1(в)	100 %	
2(а)	70 %	10
2(б)	100 %	

* От общего числа домовладений, пригодных для установки объектов микрогенерации

**Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

При рассмотрении случаев различного уровня внедрения объектов микрогенерации на базе ФЭП без использования систем позиционирования было выявлено превышение допустимых отклонений напряжения в наиболее удаленных узлах сети при уровне внедрения объектов микрогенерации от 50 % до 100 % (рассматривался фидер сети, представленный на рисунке 7, с нагрузками 1–10). По мере увеличения количества объектов микрогенерации увеличивается количество узлов, в которых напряжение превышает $1,1 U_{ном}$, что негативно сказывается на работе оборудования потребителей [34, 35]. Результаты моделирования представлены на рис. 8. Таким образом, внедрение объектов микрогенерации может стать причиной ухудшения показателей качества электроэнергии, связанными с медленными изменениями напряжения.

При рассмотрении случаев различного уровня внедрения объектов микрогенерации на базе ФЭП с внедрением систем позиционирования, действующих по предложенному принципу, на уровне 10 % от общего числа объектов микрогенерации было выявлено отсутствие узлов, в которых отклонение напряжение превышало бы 10 %. Результаты моделирования представлены на рис. 9, где исследованию был подвергнут режим снижения количества выдаваемой электроэнергии посредством уменьшения количества приходящего солнечного излучения на поверхность ФЭП. Таким образом, в рамках поддержания качества электроэнергии возможно воздействовать на значения напряжения за счет регулирования выходной мощности ФЭП.

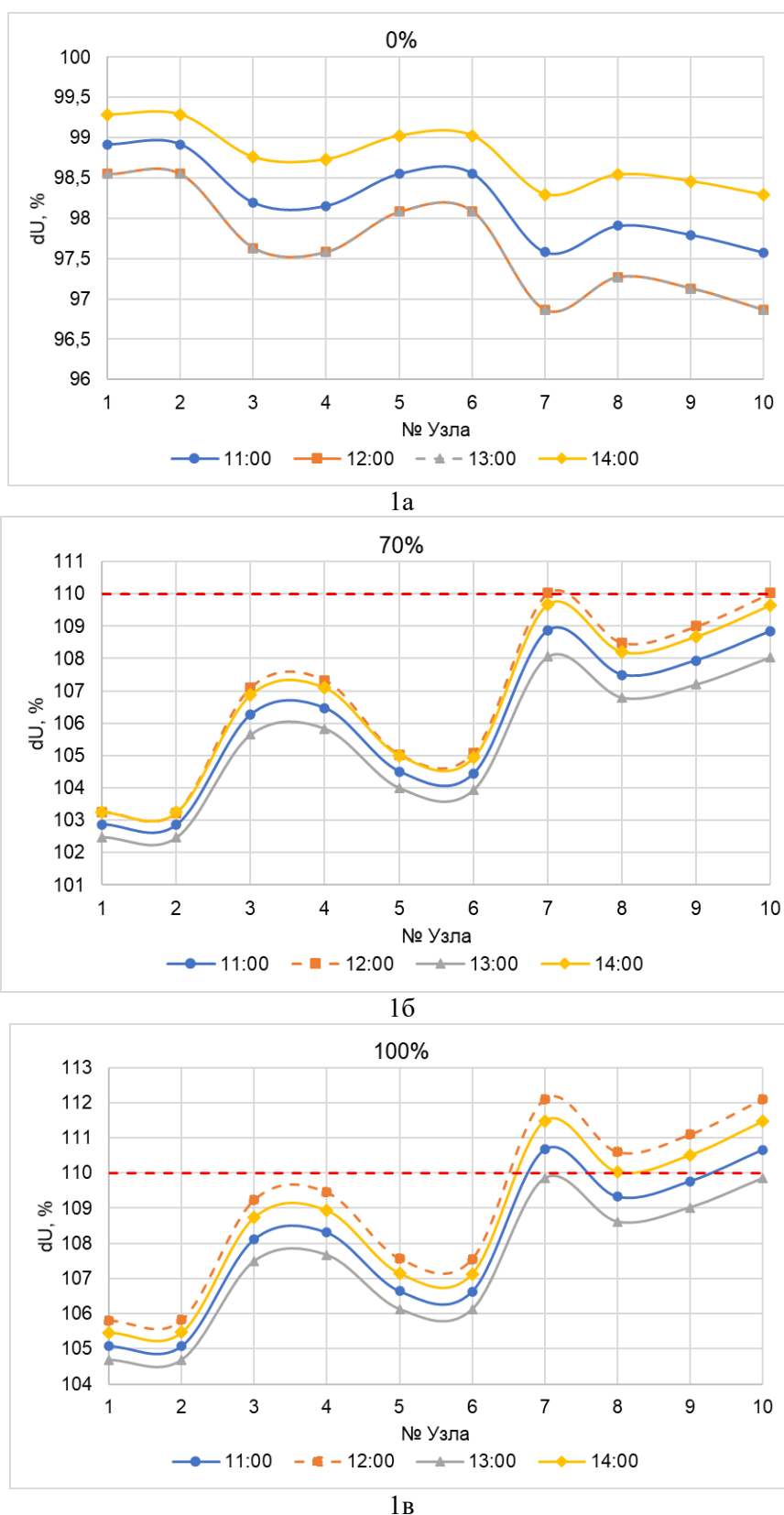


Рис. 8. Результаты моделирования влияния объектов микрогенерации на базе ФЭП без систем позиционирования на значения напряжения для вариантов по табл. 2 / Fig. 8. Results of modeling the influence of microgeneration facilities based on solar cells without positioning systems on voltage values for options according to table 2

*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

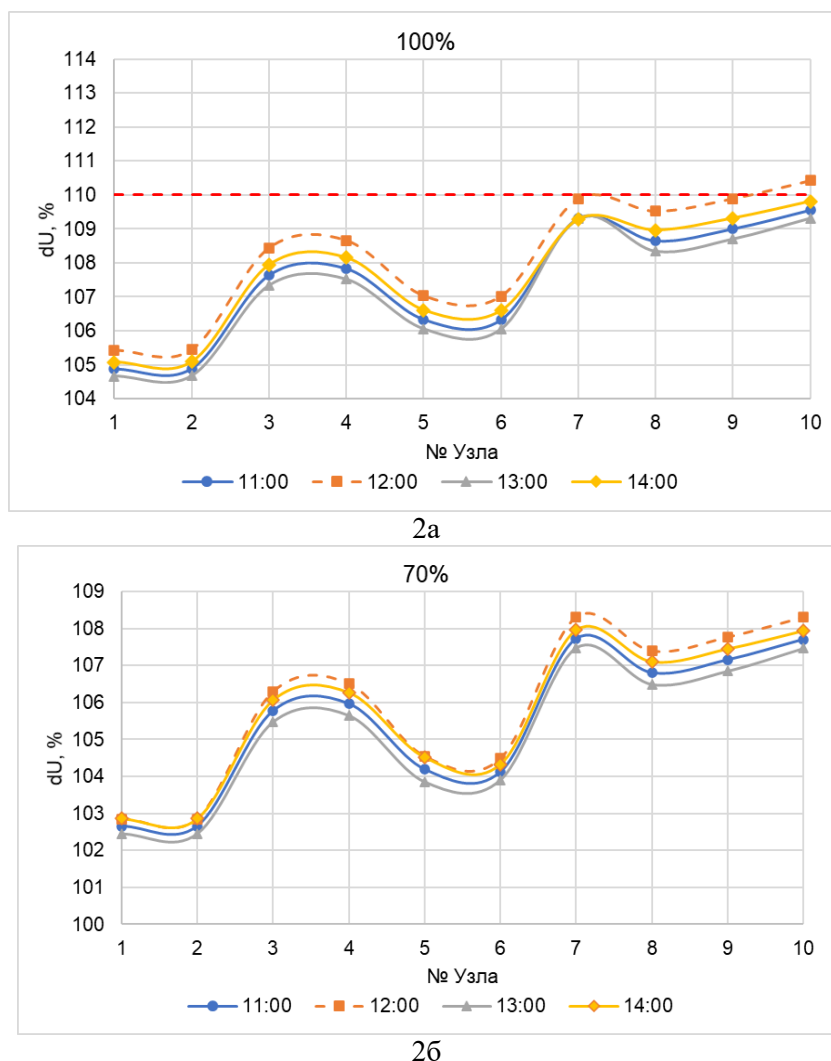


Рис. 9. Результаты моделирования влияния объектов микрогенерации на базе ФЭП с системами позиционирования на значения напряжения для вариантов по табл. 2 / Fig. 9. Results of modeling the influence of microgeneration facilities based on solar cells with positioning systems on voltage values for options according to table 2

*Источник: Составлено автором / Source: compiled by the author

Заключение / Conclusion. Установлено, что при внедрении объектов микрогенерации на базе ФЭП возможно ухудшение показателей качества электроэнергии, связанных с положительным отклонением напряжения от номинального значения. Решения данной проблемы активно разрабатываются международным научным сообществом, однако зачастую требуют значительных капиталовложений в реконструкцию электрических сетей.

Проведенные исследования показали, что решением проблем повышенного напряжения могут явиться устройства позиционирования ФЭП, оснащенные усовершенствованной системой управления, способной автоматически регулировать мощность ФЭП в соответствии с изменениями состояния сети. Данные устройства, несмотря на заложенный алгоритм периодического снижения выходной мощности ФЭП, в конечном итоге позволят увеличить количество производимой ФЭП электроэнергии и улучшить показатели качества электроэнергии. Это позволит достичь более стабильной и надежной работы распределительной сети низкого напряжения с объектами микрогенерации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности: Постановление Правительства Российской Федерации от 17.06.2015 № 600. URL: <https://government.ru/docs/all/102323/> (дата обращения: 26.09.2023).
2. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности: Постановление Правительства Российской Федерации от 10.11.2015 № 1210. URL: <https://government.ru/docs/all/104143/> (дата обращения: 26.09.2023).
3. Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 13.05.2019 № 216. URL: <https://government.ru/docs/all/121866/> (дата обращения: 26.09.2023).
4. Информационный бюллетень: рынок возобновляемой энергетики России: Текущий статус и перспективы развития. URL: <https://drive.google.com/file/d/1GmXQmNKYo84YE4WfpsT-0RzqsTbS6mup/view> (дата обращения: 26.09.2023).
5. О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации: Федеральный закон от 23 марта 2019 г. № 471-ФЗ. URL: <https://www.consultant.ru/law/doc/3781962/> (дата обращения: 26.09.2023).
6. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 2 марта 2021 г. № 299. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74087425/> (дата обращения: 26.09.2023).
7. Энергетика и промышленность России. Текущая ситуация с развитием микрогенерации в России. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2022/9853042.htm> (дата обращения: 26.09.2023).
8. Кугучева Д. К. 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.
9. Alam M. J. E., Muttaqi K. M., & Sutanto D. A comprehensive assessment tool for solar PV impacts on low voltage three phase distribution networks // Proceedings of the 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2012. P. 1–5.
10. Walling R. A., Saint R., Dugan R. C., Burke J. & Kojovic L. A. Summary of distributed resources impact on power delivery systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. No. 23. P. 1636–1644.
11. Ruifeng Y., & Saha T. K. Voltage variation sensitivity analysis for unbalanced distribution networks due to photovoltaic power fluctuations // IEEE Transactions on Power Systems. 2012. No. 27. P. 1078–1089.
12. Voltage Unbalance – A Technical Note. University of Wollongong. (2002). URL: <https://www.elec.uow.edu.au/apqrc/content/technotes/technote6.pdf> (дата обращения: 26.09.2023).
13. Katiraei F., & Aguero J. R. Solar PV integration challenges // IEEE Power & Energy Magazine. 2011. No. 9. P. 62–71.
14. Ahsan S. M., Khan H. A., Hussain A., Tariq S., Zaffar N. A. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks // Sustainability. 2021. No. 13. P. 3709.
15. Sharma S. K., Chandra A., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoir L. Voltage Flicker Mitigation Employing Smart Loads With High Penetration of Renewable Energy in Distribution Systems // IEEE Trans. Sustain. Energy. 2017. No. 8. P. 414–424.
16. Shayani R. A., de Oliveira M. A. G. Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26. No. 3. P. 1625–1631.
17. Liu Y., Bebic J., Kroposki B., de Bedout J., Ren W. Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration PV, 2008 // IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, GA, USA. 2008. P. 1–8.
18. Ahmed E. E. E., Demirci A. Assessment of overvoltage and power losses in low voltage distribution networks with high photovoltaics penetration based on prosumers' self-consumption 2022 // International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). Ankara, Turkey. 2022. P. 1–4.
19. Zulu Esau, Hara Ryoichi, Kita Hiroyuki. A flexible stochastic PV hosting capacity framework considering network over-voltage tolerance // Energy Reports. Vol. 9. Supplement 1, 2023. P. 529–538.
20. Shahnia, F., Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G., & Zare, F. Sensitivity analysis of voltage imbalance in distribution networks with rooftop PVs // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010. P. 1–8.
21. Xiangjing S., Masoum M. A. S., & Wolfs P. J. Optimal PV inverter reactive power control and real power curtailment to improve performance of unbalanced four-wire LV distribution networks // IEEE Trans Sustain Energy. 2014. No. 5. P. 967–977.
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, ICHQP (Ljubljana 13–16 May 2018). Ljubljana, Slovenia, 2018. P. 1–5.

23. Bereczki B., Hartmann B. LV Grid Voltage Control with Battery Energy Storage Systems // Proceedings of the IEEE I&CPS Europe International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE I&CPS Europe) Madrid, Spain, 9–12 June 2020. Madrid, Spain, 2020. P. 1–5.
24. Anita Y., Solanki, Dr. Sanjay R. Vyas. A Review on Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2021. Vol. 08 Is. 02.
25. Nouri A., Keane A. Planning of OLTC Transformers in LV Systems under Conservation Voltage Reduction Strategy // Proceedings of the 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Bucharest, 29 September – 2 October 2019. Bucharest, Romania, 2019. P. 1–5.
26. Bruno S., Dellino G., La Scala M., Meloni C. A. Microforecasting module for energy management in residential and tertiary buildings // Energies. 2019. No. 12. P. 1006.
27. Vadavathi A. R., Hoogsteen G. and Hurink J. L. PV Inverter Based Fair Power Quality Control // IEEE Transactions on Smart Grid. <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3244601>.
28. 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).
29. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>
30. Кугучева Д. К., Харитонов М. С. Влияние солнечной микрогенерации на параметры режима распределительной сети // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XIII Международной научно-технической конференции, Красноярск, 23–27 октября 2023 года. Казань: Сибирский федеральный университет, 2023.
31. Kugucheva D., Kharitonov M. (2023). A New Approach to Increase the Efficiency of Solar Generation Through the Use of the Soltrack System / eds by N. Kostrikova // Energy Ecosystems: Prospects and Challenges: Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 626. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24820-7_2
32. Кугучева Д. К., Харитонов М. С. Система позиционирования фотоэлектрических панелей для условий застроенной среды «Солтрек» // Балтийский морской форум: материалы X Международного Балтийского морского форума: в 7 т., Калининград, 26 сентября – 01 октября 2022 года. Т. 1. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2022. С. 471–476.
33. Photovoltaic geographical information system. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (дата обращения: 26.09.2023).
34. David Jason & Crawford Matthew. Cause and effect of overvoltage on the LV network. 2017. P. 1–6. 10.1109 // Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, VIC, Australia, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2017.8282441>.
35. David J., Ciufu P., Elphick S., Robinson D. Preliminary Evaluation of the Impact of Sustained Overvoltage on Low Voltage Electronics-Based Equipment // Energies. 2022. No. 15. P. 1536. <https://doi.org/10.3390/en15041536> (дата обращения: 26.09.2023).

REFERENCES

1. On approval of the list of objects and technologies that relate to objects and technologies of high energy efficiency: Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2015 No. 600. Available from: <http://government.ru/docs/all/102323/> [Accessed 26 September 2023].
2. On amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the use of renewable energy sources in the wholesale market of electrical energy and capacity: Decree of the Government of the Russian Federation dated November 10, 2015 No. 1210. Available from: <http://government.ru/docs/all/104143/> [Accessed 26 September 2023].
3. On approval of the Doctrine of Energy Security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated May 13, 2019 No. 216. Available from: <http://government.ru/docs/all/121866/> [Accessed 26 September 2023].
4. Information bulletin: Russian renewable energy market: Current status and development prospects. Available from: <https://drive.google.com/file/d/1GmXQmNKYo84YE4WfPsT-0RzqsTbS6mup/view> [Accessed 26 September 2023].
5. On amendments to the Federal Law “On Electric Power Industry” regarding the development of microgeneration Federal Law of March 23, 2019 No. 471-FZ. Available from: <https://www.consultant.ru/law/doc/3781962/> [Accessed 26 September 2023].
6. On introducing amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation in terms of determining the features of the legal regulation of relations on the functioning of microgeneration facilities: Decree of the Government of the Russian Federation of March 2, 2021 No. 299. Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74087425/> [Accessed 26 September 2023].

7. Energy and industry of Russia. Current situation with the development of microgeneration in Russia. Available from: <https://www.eprussia.ru/news/base/2022/9853042.htm> [Accessed 26 September 2023].
8. Kugucheva DK. Some solutions for assessing the potential and increasing the efficiency of using solar energy using the example of the Kaliningrad region. Newsletter of the North-Caucasus Federal University. 2021;5(86):7-17.
9. Alam MJE, Muttaqi KM, Sutanto D. A comprehensive assessment tool for solar PV impacts on low voltage three phase distribution networks. In Proceedings of the 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET); 2012. P. 1–5.
10. Walling RA, Saint R, Dugan RC, Burke J, Kojovic LA. Summary of distributed resources impact on power delivery systems. IEEE Transactions on Power Delivery. 2008;23:1636-1644.
11. Ruifeng Y, Saha TK. Voltage variation sensitivity analysis for unbalanced distribution networks due to photovoltaic power fluctuations. IEEE Transactions on Power Systems. 2012;27:1078-1089.
12. Voltage Unbalance – A Technical Note. University of Wollongong. (2002). Available from: <http://www.elec.uow.edu.au/apqrc/content/technotes/technote6.pdf> [Accessed 26 September 2023].
13. Katiraei F, Aguerro JR. Solar PV integration challenges. IEEE Power & Energy Magazine. 2011;9:62-71.
14. Ahsan SM, Khan HA, Hussain A, Tariq S, Zaffar NA. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks. Sustainability. 2021;13:3709.
15. Sharma SK, Chandra A, Saad M, Lefebvre S, Asber D, Lenoir L. Voltage Flicker Mitigation Employing Smart Loads With High Penetration of Renewable Energy in Distribution Systems. IEEE Trans. Sustain. Energy. 2017;8:414-424.
16. Shayani RA, de Oliveira MAG. Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Systems. 2011; 26(3):1625-1631.
17. Liu Y, Bebic J, Kroposki B, de Bedout J, Ren W. Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration PV, 2008. IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, GA, USA; 2008. P. 1-8.
18. Ahmed EEE, Demirci A. Assessment of overvoltage and power losses in low voltage distribution networks with high photovoltaics penetration based on prosumers' self-consumption 2022. International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). Ankara, Turkey; 2022. P. 1-4.
19. Zulu Esau, Hara Ryoichi, Kita Hiroyuki. A flexible stochastic PV hosting capacity framework considering network over-voltage tolerance. Energy Reports. 2023;9:529-538.
20. Shahnia F, Majumder R, Ghosh A, Ledwich G, Zare F. Sensitivity analysis of voltage imbalance in distribution networks with rooftop PVs. IEEE Power and Energy Society General Meeting; 2010. P. 1-8.
21. Xiangjing S, Masoum MAS, Wolfs PJ. Optimal PV inverter reactive power control and real power curtailment to improve performance of unbalanced four-wire LV distribution networks. IEEE Trans Sustain Energy. 2014;5:967-977.
22. Tang NC, Chang GW. A stochastic approach for determining PV hosting capacity of a distribution feeder considering voltage quality constraints. In Proceedings of the International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP (Ljubljana 13–16 May 2018). Ljubljana, Slovenia; 2018. P. 1-5.
23. Berezcki B, Hartmann B. LV Grid Voltage Control with Battery Energy Storage Systems. Proceedings of the IEEE ICPS Europe International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE ICPS Europe), Madrid, Spain, 9–12 June 2020. Madrid, Spain; 2020. P. 1-5.
24. Anita Y Solanki, Dr. Sanjay R. Vyas. A Review on Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2021;08(02).
25. Nouri A, Keane A. Planning of OLTC Transformers in LV Systems under Conservation Voltage Reduction Strategy. Proceedings of the 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Bucharest, 29 September – 2 October 2019. Bucharest, Romania; 2019. P. 1-5.
26. Bruno S, Dellino G, La Scala M, Meloni CA. Microforecasting module for energy management in residential and tertiary buildings. Energies. 2019;12:1006.
27. Vadavathi AR, Hoogsteen G, Hurink JL. PV Inverter Based Fair Power Quality Control. IEEE Transactions on Smart Grid. <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3244601>
28. Kharitonov MS, Kugucheva DK. Study of the influence of microgeneration facilities on the voltage level in low voltage electrical networks. Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. = Electricity. Transmission and distribution. 2024;1(82).
29. GOST 32144-2013 Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards for the quality of electrical energy in general purpose power supply systems. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> [Accessed 26 September 2023].
30. Kugucheva DK, Kharitonov MS. The influence of solar microgeneration on the parameters of the distribution network mode. In Electric power industry through the eyes of youth: materials of the XIII International Scientific and Technical Conference, Krasnoyarsk, October 23–27, 2023. Kazan: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Siberian Federal University”; 2023.
31. Kugucheva DK, Kharitonov MS. A New Approach to Increase the Efficiency of Solar Generation Through the Use of the Soltrack System. Ed. by N. Kostrikova. Energy Ecosystems: Prospects and Challenges: Lecture Notes in Networks and Systems. 2023;626. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24820-7_2

32. Kugucheva DK, Kharitonov MS. A New Approach to Increase the Efficiency of Solar Generation Through the Use of the Soltrack System Positioning system of photovoltaic panels for the built environment “Soltrek”. Baltic Maritime Forum: materials of the X International Baltic Maritime Forum: in 7 volumes, Kaliningrad , September 26 – 01, 2022. Vol. 1. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University; 2022. P. 471-476.
33. Photovoltaic geographical information system. Available from: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
34. David J, Crawford M. Cause and effect of overvoltage on the LV network. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, VIC, Australia, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2017.8282441>
35. David J, Ciufo P, Elphick S, Robinson D. Preliminary Evaluation of the Impact of Sustained Overvoltage on Low Voltage Electronics-Based Equipment. Energies. 2022;15:1536. <https://doi.org/10.3390/en15041536>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дарья Константиновна Кугучева – аспирант кафедры энергетики Калининградского государственного технического университета, Scopus ID: 57450694000, Researcher ID: AEF-1929-2022

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Darya K. Kugucheva – Postgraduate Student of the Department of Energy, Kaliningrad State Technical University, Scopus ID: 57450694000, Researcher ID: AEF-1929-2022