

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.3.2>

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОГЕНЕРАЦИИ В РОССИИ

Дарья Константиновна Кугучева<sup>1\*</sup>, Максим Сергеевич Харитонов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Калининградский государственный технический университет» (д.1, Советский пр-т, Калининград, 236022, Российская Федерация)

<sup>1</sup> darya.kugucheva@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0825-1600>

<sup>2</sup> maksim.haritonov@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8185-8820>

\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** В Российской Федерации в рамках стратегии снижения выбросов CO<sub>2</sub> и развития возобновляемой энергетики особое внимание необходимо уделять развитию сектора микрогенерации. **Цель.** Выявление проблем и перспективных направлений развития сектора микрогенерации в России, анализ нормативных требований к функционированию объектов микрогенерации и формирование практических рекомендаций по обеспечению качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения. **Материалы и методы.** Исследование включает анализ нормативно-правовой базы, регламентирующей функционирование объектов микрогенерации, обобщение результатов влияния данных объектов на некоторые показатели качества электроэнергии, а также обзор зарубежного опыта. **Результаты и обсуждение.** В ходе работы выявлено отсутствие систематизированных рекомендаций по обеспечению качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения с подключенными объектами микрогенерации, что создает правовые и технологические барьеры для развития данного сектора энергетики. Подтверждено негативное влияние объектов микрогенерации на некоторые показатели качества электроэнергии. На основе анализа зарубежного опыта сформирован ряд практических рекомендаций, направленных на внедрение объектов микрогенерации в сети низкого напряжения. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод, что для успешного развития микрогенерации в России необходимо совершенствование нормативно-правового регулирования, разработка технических требований к объектам микрогенерации, внедрение программ финансовой поддержки и инвестиции в цифровую инфраструктуру, обеспечивающие надежное и качественное электроснабжение потребителей.

**Ключевые слова:** микрогенерация, возобновляемые источники энергии, распределительные электрические сети, качество электроэнергии

**Для цитирования:** Кугучева Д. К., Харитонов М. С. Проблемы и перспективные направления развития микрогенерации в России // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 3 (108). С. 23–37. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.3.2>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025;

одобрена после рецензирования 06.05.2025;

принята к публикации 15.05.2025.

## Research article

## PROBLEMS AND PROMISING DIRECTIONS OF MICROGENERATION DEVELOPMENT IN RUSSIA

Darya K. Kugucheva<sup>1\*</sup>, Maxim S. Kharitonov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Kaliningrad State Technical University (1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation)

<sup>1</sup> darya.kugucheva@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0825-1600>

<sup>2</sup> maksim.kharitonov@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8185-8820>

\* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** In the Russian Federation, within the framework of the strategy to reduce CO<sub>2</sub> emissions and develop renewable energy, particular attention should be paid to the development of the microgeneration sector. **Goal.** The article aims to identify problems and promising directions for the development of the microgeneration sector in Russia, analyze regulatory requirements for the operation of microgeneration facilities, and formulate practical recommendations for ensuring power quality in low-voltage distribution networks. **Materials and methods.** The research is based on the analysis of the regulatory framework governing the operation of microgeneration facilities, a synthesis of research results on the impact of these facilities on certain power quality indicators, as well as a review of international experience. **Results and discussion.** The study revealed a lack of systematized recommendations for ensuring power quality in low-voltage distribution networks with connected microgeneration facilities, which creates legal and technological barriers to the development of this energy sector. The negative impact of microgeneration facilities on certain power quality indicators has been confirmed. Based on an analysis of international experience, a number of practical recommendations have been formulated to promote the implementation of microgeneration facilities in low-voltage networks. **Conclusion.** The study concludes that the successful development of microgeneration in Russia requires the improvement of regulatory frameworks, the development of technical requirements for microgeneration facilities, the implementation of financial support programs, and investments in digital infrastructure to ensure reliable and high-quality power supply for consumers.

**Keywords:** microgeneration, renewable energy sources, distribution networks, power quality

**For citation:** Kugucheva DK, Kharitonov MS. Problems and promising directions of microgeneration development in Russia. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;3(108):23-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.3.2>

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 21.03.2025;

approved after reviewing 06.05.2025;

accepted for publication 15.05.2025.

**Введение / Introduction.** В Российской Федерации особое внимание уделяется уменьшению выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу, в том числе за счет перехода на экологически чистые и возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

С целью стимулирования инвестиций в развитие возобновляемой энергетики в Российской Федерации действует комплекс мер регуляторной поддержки, который включает в себя оплату мощности по договору поставки мощности генерирующими объектами ВИЭ; отборы инвестиционных проектов на розничных рынках электроэнергии с последующей продажей электроэнергии для компенсации потерь электросетевых компаний; механизм выработки электроэнергии объектами микрогенерации в пределах 15 кВт; механизм окупаемости инвестиций при замене дорогостоящей топливной генерации в соответствии с энергосервисными контрактами в технологически изолированных территориальных энергосистемах [1].

Благодаря реализации существующих мер поддержки по состоянию на 15 мая 2025 г. установленная мощность ВИЭ в РФ составила 6,615 ГВт, что соответствует росту на 360 % за десятилетний период [2]. Прогнозируется, что к 2035 г. общая установленная мощность всех объектов ВИЭ-генерации в РФ достигнет 17 ГВт, что позволит обеспечить снижение ежегодных выбросов CO<sub>2</sub> к 2035 г. на уровне 20 млн т [3].

Важную роль в достижении углеродной нейтральности играет генерация на основе ВИЭ, подключенная к распределительным электрическим сетям [4]. В соответствии с проведенным анализом структуры энергопотребления в РФ [5] на долю жилищно-коммунального хозяйства приходится до 16 % потребления электроэнергии (рисунок 1), что свидетельствует о высоком потенциале развития рынка микрогенерации на основе ВИЭ как пути снижения выбросов CO<sub>2</sub>. Раз-

витие данного направления, согласно [6], также будет способствовать решению ряда актуальных проблем российской энергетики, связанных с износом основного оборудования электростанций и распределительных сетей, а также значительными потерями электроэнергии.

В течение последних лет Правительством РФ были установлены планы по увеличению объема рынка микрогенерации до 103,7 тыс. объектов потребителей (более 1 ГВт) к 2030 г. в рамках стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса [7]. К сентябрю 2025 г., согласно Распоряжению Правительства РФ от 03.03.2022 № 402, для развития микрогенерации будет утвержден план мероприятий по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» в части развития микрогенерации.

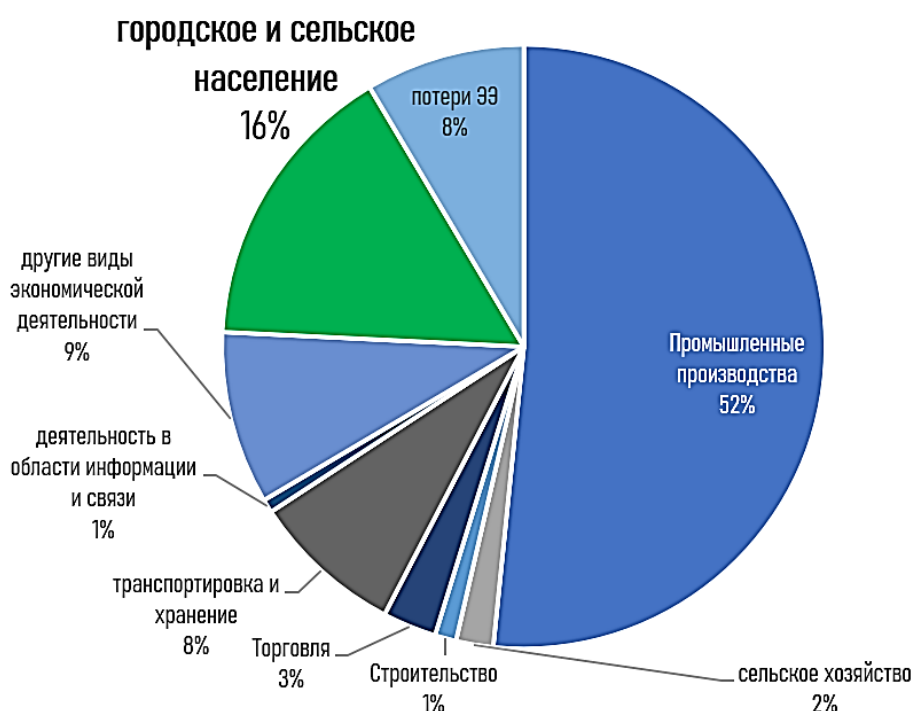


Рис. 1. Потребление электроэнергии в России по секторам экономики / Fig.1. Electricity consumption in Russia by economic sector

\*Источник: составлено авторами по данным [5] / Source: compiled by the authors according to data [5]

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** В настоящей работе представлено исследование проблем и перспектив развития микрогенерации в России. Для достижения этой цели применен комплексный подход, сочетающий анализ нормативно-правового регулирования, обобщение результатов исследований влияния объектов микрогенерации на качество электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения (РЭС НН) и обзор международного опыта. Проанализированы нормативная база, результаты научных работ, обобщение зарубежных практик и формирование практических рекомендаций по внедрению и повышению качества функционирования объектов микрогенерации в РЭС НН, что обусловлено необходимостью учета нормативных, технических, и практических аспектов для разработки обоснованных предложений по развитию сектора микрогенерации в России.

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Содержание понятия «объект микрогенерации». Для стимулирования развития сектора ВИЭ-генерации в бытовом секторе в РФ в декабре 2019 года был принят Федеральный закон № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части развития микрогенерации», в котором предоставляется право физическим и юридическим лицам, владеющим объектами микрогенерации, выдавать излишки произведенной электроэнергии в сеть.

Согласно Федеральному закону «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ (последняя редакция), объект микрогенерации определен как установка по производству электроэнергии, принадлежащая потребителю и подключенная к сети с напряжением до 1000 В. Такая установка может использоваться для производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии в целях удовлетворения собственных нужд или для продажи на розничном рынке электроэнергии.

Основными особенностями объектов микрогенерации являются:

- максимальная мощность микрогенерации не должна превышать 15 кВт и должна соответствовать мощности принимающих устройств потребителя;
- технологическое присоединение объектов микрогенерации допускается только к объектам электросетевого хозяйства с напряжением до 1000 В;
- электроэнергия, произведенная на объекте микрогенерации и не использованная владельцем, может быть продана на розничном рынке электроэнергии по ценам, не превышающим цен на приобретаемые на оптовом рынке гарантирующими поставщиками электрическую энергию и мощность;
- доходы от продажи электроэнергии, произведенной на объектах микрогенерации, до 2029 года освобождаются от НДФЛ.

Генерирующими источниками, устанавливаемыми в качестве объектов микрогенерации, могут являться фотоэлектрические преобразователи, ветроэнергетические установки, дизельные генераторы, микроГЭС и др.

**Влияние объектов микрогенерации на качество электроэнергии.** Согласно исследованиям, представленным в [4], внедрение генерирующих объектов на базе ВИЭ способствует трансформации распределительных электрических сетей в активные системы по причине возникновения обратных потоков мощности. Согласно [8], появление реверсивных потоков мощности может приводить к изменению направления токов в нормальных режимах работы несколько раз в течение суток.

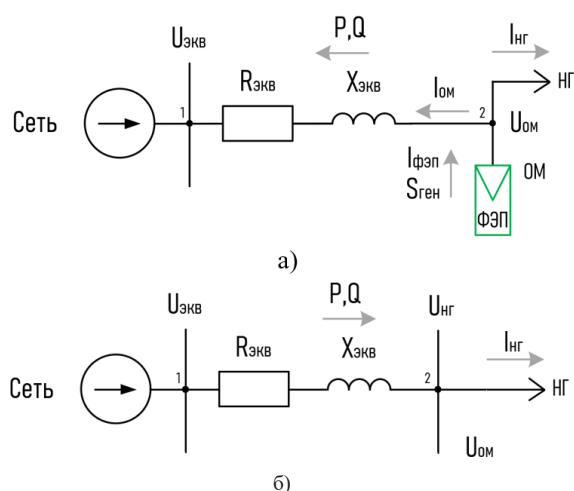


Рис. 2. Упрощенная схема участка сети: а) с подключенным объектом микрогенерации, б) без объектов микрогенерации / Fig. 1. Simplified diagram of a network section: a) with a connected microgeneration facility, b) without microgeneration facilities

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Согласно [9], напряжение в точке подключения объекта микрогенерации к сети (рисунок 2а) может быть найдено согласно следующему упрощенному выражению:

$$U_{OM} = U_{ЭКВ} + \frac{P \cdot R_{ЭКВ} + Q \cdot X_{ЭКВ}}{U_{ЭКВ}}, \quad (1)$$

где  $U_{OM}$  – напряжение в точке подключения объекта микрогенерации к сети (точка № 2);  $U_{ЭКВ}$  – напряжение в точке № 1;  $P$ ,  $Q$  – активная и реактивная мощность, выдаваемая объектом микрогенерации в сеть;  $R_{ЭКВ}$ ,  $X_{ЭКВ}$  – активное и индуктивное сопротивления.

При внедрении объектов микрогенерации в РЭС НН в случае  $I_{ФЭП} > I_{нг}$  (например, в часы пиковой генерации электроэнергии объектом микрогенерации и незначительной нагрузке потребителей) существует вероятность значительного повышения напряжения в некоторых узлах сети, что является одной из ключевых проблем при внедрении генерирующих объектов в сети низкого напряжения [10–12].

С учетом особенностей сетей низкого напряжения в Российской Федерации, зачастую имеющих высокую протяженность, перспективное увеличение количества объектов микрогенерации в ряде случаев способно привести к недопустимому росту значений напряжения в узлах сети [9].

При отсутствии объектов микрогенерации напряжение в нагрузочном узле сети уменьшается вследствие падения напряжения на сопротивлении сети. Тогда для представленной на рисунке 2б упрощенной схемы сети напряжение в точке № 2 равно

$$U_{НГ} = U_{ЭКВ} - \frac{P \cdot R_{ЭКВ} + Q \cdot X_{ЭКВ}}{U_{ЭКВ}}, \quad (2)$$

Преимущественно однофазное подключение бытовых потребителей к трехфазной 4(5)-проводной сети [13] обуславливает однофазное исполнение большинства подключенных (в перспективе подключаемых) к РЭС НН объектов микрогенерации. Такая конфигурация создает предпосылки для возникновения несимметрии напряжений: при превышении генерации электроэнергии над потреблением в узле подключения объекта микрогенерации напряжение возрастает в фазе подключения, в то время как в других фазах может наблюдаться его снижение из-за естественного падения напряжения на сопротивлении сети. Возможное превышение допустимых, согласно ГОСТу 32144-2013, значений несимметрии напряжений и повышенное напряжение приводят к увеличению потерь электроэнергии, негативному воздействию на электроприемники и снижению уровня надежности электроснабжения [14].

*Анализ нормативных требований, касающихся функционирования объектов микрогенерации в РЭС НН.* Объекты микрогенерации, в отличие от традиционных электростанций, классифицируются как «электроустановки потребителей». Согласно Постановлению Правительства РФ от 13.08.2018 № 937, функционирование электроустановок потребителей электрической энергии не должно приводить к нарушению обязательных требований к качеству электрической энергии в точке технологического присоединения к электрической сети.

На сегодняшний день в Российской Федерации принят ряд документов, в которых рассмотрены общие вопросы подключения и функционирования объектов микрогенерации (таблица 1). Поддержание качества электроэнергии в допустимых пределах в РЭС НН с объектами микрогенерации косвенно упомянуто в Постановлении Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 (ред. от 10.09.2024) и Постановлении Правительства РФ от 02.03.2021 № 299, где в технических условиях по подключению объектов микрогенерации установленной мощности до 15 кВт упомянута необходимость установки устройств регулирования напряжения для обеспечения надежности и качества электрической энергии. При одновременном технологическом присоединении к объектам электросетевого хозяйства энергопринимающих устройств, максимальной мощностью до 150 кВт,

и объектов микрогенерации до 15 кВт упомянута необходимость применения следующих мероприятий по усилению электрической сети для обеспечения надежности и качества электрической энергии:

- строительство новых линий электропередачи;
- увеличение сечения проводов и кабелей;
- реконструкция ТП, расширение распределительных устройств;
- установка устройств регулирования напряжения.

Тем не менее представленные документы не содержат конкретных рекомендаций по выбору оптимальных средств для поддержания показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в пределах допустимых значений. В них отсутствует четкая методология и критерии, которые позволили бы обоснованно определить наиболее эффективные методы и средства для конкретных условий эксплуатации РЭС НН с объектами микрогенерации, что является одним из факторов, затрудняющих развитие распределенной энергетики в России.

Таблица 1 / Table 1

**Нормативно-правовые акты, регламентирующие функционирование объектов микрогенерации / Regulatory and legal acts governing the operation of microgeneration facilities**

| <i>Постановление или иной нормативный документ</i>                                           | <i>Наименование документа</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>Область регулирования микрогенерации</i>                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ФЗ от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 08.08.2024)<br>(с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) | Об электроэнергетике                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Основные термины и определения; количественные характеристики микрогенерации; порядок взаимодействия собственников объектов микрогенерации с гарантирующим поставщиком |
| Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 299                                           | О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации                                                                                                                                      | Порядок взаимодействия сетевых организаций с объектами микрогенерации                                                                                                  |
| Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 (ред. от 10.09.2024)                      | О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии (вместе с Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии, Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии) | Договорные отношения по продаже электроэнергии, выработанной объектами микрогенерации                                                                                  |

| <i>Постановление или иной нормативный документ</i>                                                                                           | <i>Наименование документа</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>Область регулирования микрогенерации</i>                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 (ред. от 10.09.2024)                                                                      | Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам коммерческого оператора оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям | Порядок и особенности технологического присоединения объектов микрогенерации                                                                                   |
| Приказ ФСТ России от 11.09.2014 № 215-э/1 (ред. от 30.06.2022)                                                                               | Об утверждении Методических указаний по определению выпадающих доходов, связанных с осуществлением технологического присоединения к электрическим сетям                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Расходы на выполнение организационно-технических мероприятий по технологическому присоединению объектов микрогенерации                                         |
| Приказ ФАС России от 30.06.2022 № 490/22 (ред. от 30.03.2023)                                                                                | Об утверждении Методических указаний по определению размера платы за технологическое присоединение к электрическим сетям (Зарегистрировано в Минюсте России 19.08.2022 № 69710) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2024)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                |
| Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2024) | Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Отсутствие налоговых отчислений на доходы, полученные в период до 1 января 2029 г. от продажи электрической энергии, произведенной на объектах микрогенерации. |

| <i>Постановление или иной нормативный документ</i>                       | <i>Наименование документа</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <i>Область регулирования микрогенерации</i>                 |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Постановление Правительства РФ от 29.07.2023 № 1230 (ред. от 19.10.2024) | Об особенностях применения законодательства Российской Федерации в сфере электроэнергетики на территориях Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской области и Херсонской области (вместе с «Положением об особенностях применения законодательства Российской Федерации в сфере электроэнергетики на территориях Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской области и Херсонской области») | Тарифы на продажу электроэнергии от объектов микрогенерации |
| Постановление Правительства РФ от 29.12.2011 № 1179 (ред. от 12.04.2024) | Об определении и применении гарантирующими поставщиками нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность) (вместе с «Правилами определения и применения гарантирующими поставщиками нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность)»)                                                                                                                                                                                                       |                                                             |

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Практические рекомендации по внедрению и повышению качества функционирования объектов микрогенерации в РЭС НН.

1. В большинстве стран Европы при подключении объектов распределенной генерации на базе ВИЭ к РЭС НН для соблюдения требований к качеству электроэнергии требуется поддержание коэффициента мощности на уровне не ниже 0,95, однако минимальный допустимый уровень  $\cos\varphi$  может быть установлен на уровне 0,9 или 0,8 [15–18]. Так, в Испании, согласно стандарту Royal Decree 1699/2011 [15], устанавливается минимальный уровень  $\cos\varphi = 0,95$ , для Дании DS/EN 0549-1:2019 [16]) и Нидерландов (стандарт NEN 1010:2020+C1:2024 [17]) –  $\cos\varphi = 0,9$ , в Италии, согласно стандарту CEI 0-21-2022 [18], допускается значение  $\cos\varphi = 0,8$  для некоторых солнечных электростанций низкой мощности. Среди предложенных мер ведущими российскими учеными в области распределенной генерации [19] было рекомендовано внедрение требований, обеспечивающих работу генерирующих установок с коэффициентом мощности от  $\cos\varphi = 0,95$  в режиме недовозбуждения до  $\cos\varphi = 0,95$  в режиме перевозбуждения при условии генерации активной мощности более 20 % от номинального значения (рисунок 3). Поэтому возникает необходимость установления требований по регулированию напряжения объектами микрогенерации на базе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в точке присоединения к сети.

2. Необходима разработка и закрепление методических указаний по определению конкретных мер для поддержания показателей качества электроэнергии в РЭС НН с объектами микрогенерации, которые дадут четкие рекомендации и алгоритмы по выбору конкретных методов и средств для поддержания ПКЭ и позволят унифицировать подходы к обеспечению требуемого качества электроэнергии при проектировании и эксплуатации РЭС НН с высокой долей подключенных объектов микрогенерации.

В Германии в рамках программ развития распределительных электрических сетей, в частности стандарта VDE-AR-N 4105 [20], который является частью энергетической политики Германии, направленной на переход к устойчивой энергетике и интеграцию возобновляемых источников энергии в энергосистему, используются подробные рекомендации по установке трансформаторов

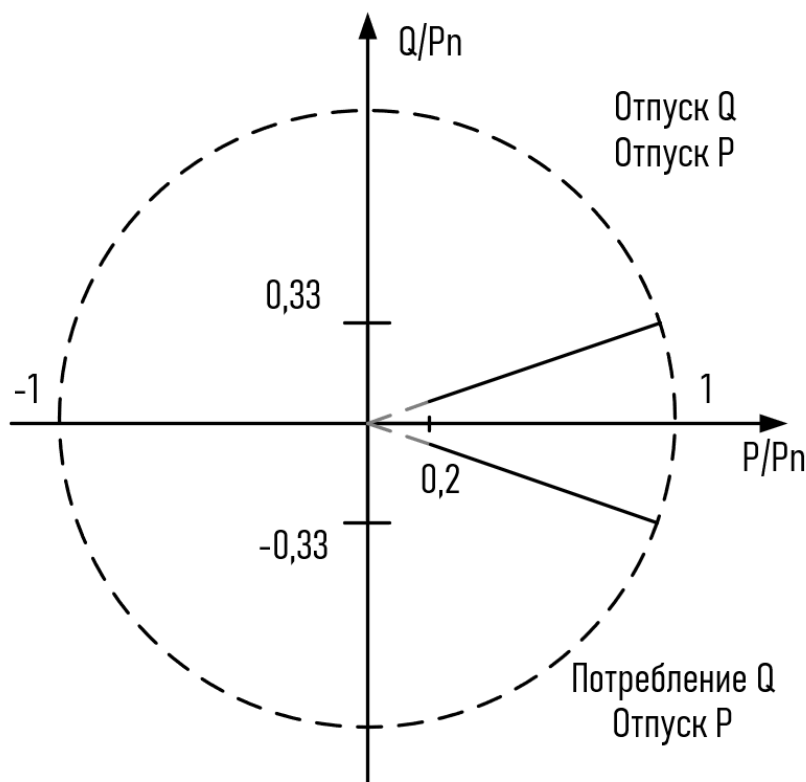


Рис. 3. Работа генерирующих объектов на базе ФЭП в РЭС НН с  $\cos\varphi = 0,95$  / Fig. 3. Operation

of generating facilities based on solar panels in LV distribution networks with  $\cos\varphi = 0.95$

\* Источник: [19] / Source: [19]

с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой в сетях 0,4 кВ, модернизации ЛЭП за счет увеличения сечения проводов, а также внедрения систем накопления энергии. В США в стандарте IEEE 1547 [21] даны рекомендации по применению систем накопления электроэнергии, реконструкции трансформаторных подстанций, по внедрению интеллектуальных систем и алгоритмов управления спросом (demand response).

3. Поскольку жилищно-коммунальное хозяйство является значительным потребителем электроэнергии и играет существенную роль в общем объеме выбросов углекислого газа в атмосферу, необходима разработка и реализация государственных программ, направленных на финансовую поддержку потребителей, имеющих возможность подключения объектов микрогенерации, в частности внедрение системы субсидий и льготного кредитования. Данная мера может содействовать более интенсивному развитию рынка микрогенерации и позволит обеспечить снижение ежегодных выбросов CO<sub>2</sub>, способствуя достижению поставленной Правительством Российской Федерации цели по достижению углеродной нейтральности к 2060 году [22]. Финансовые стимулы должны быть дифференцированы в зависимости от типа используемых технологий, установленной мощности и, соответственно, уровня снижения углеродного следа.

Во многих странах действуют программы субсидирования и льготного кредитования для физических и юридических лиц в рамках развития распределенной генерации. В Германии, например, банк KfW предоставляет льготные кредиты и гранты на установку генерирующих объектов на базе ФЭП, а также на их подключение к сети [23]. В США действует федеральная налоговая льгота Solar Investment Tax Credit (ITC), которая позволяет возместить до 30% расходов на установку генерирующих объектов на базе ФЭП [24]. Австралия стимулирует физических лиц через схему Small-scale Renewable Energy Scheme (SRES), предоставляя скидки и субсидии физическим лицам на покупку и установку оборудования для электростанций небольшой мощности [25]. В Великобритании широкую популярность до 2023 г. имела программа Green Home Grant [26], предусматривающая частичное возмещение затрат на энергоэффективные технологии для домохозяйств (в том числе на установку генерирующих объектов на базе ВИЭ).

4. Поскольку объекты микрогенерации оказывают серьезное воздействие на режимы работы РЭС НН, согласно исследованиям, проведенным в [9, 14], для своевременного обнаружения и предотвращения отклонений ПКЭ, а также для удаленного управления работой объектов микрогенерации со стороны энергоснабжающей компании (при проведении ремонтных работ, возникновении недопустимых режимов со значительными отклонениями режимных параметров и т. д.) необходимо экономическое стимулирование развития инфраструктуры, включая современные системы мониторинга и контроля режимов функционирования объектов микрогенерации и параметров качества электроэнергии.

Так, в Австрии действует программа цифровых двойников (Digital Twin) [27], которая позволяет энергоснабжающим компаниям (в частности, операторам распределительных сетей) оптимизировать развитие инфраструктуры и производить оценку воздействия новых объектов распределенной генерации на параметры сети. В Германии при интеграции генерирующих объектов в РЭС НН осуществляется прогнозирование выработки и потребления электроэнергии с помощью технологий машинного обучения. Методики и алгоритмы прогнозирования разработаны в рамках инициатив Smart Grid и документально закреплены в национальных планах энергоперехода, таких как программа BMWK Energiewende [28].

Статистика прироста мощностей фотоэлектрических систем в жилищно-коммунальных секторах для упомянутых государств приведена на рисунке 4 [29]. Наблюдаемый значительный ежегодный прирост мощностей фотоэлектрических систем свидетельствует об эффективности реализуемых мер, направленных на стимулирование развития распределенной генерации в жилищно-коммунальном секторе и указывает на наличие значительного потенциала для масштабирования рассмотренных решений.

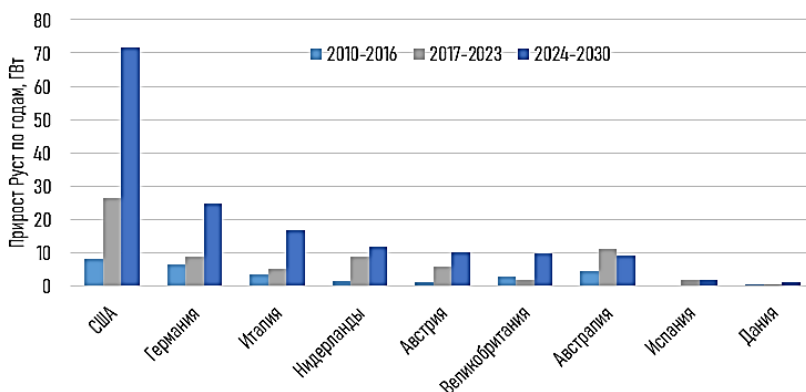


Рис. 4. Статистика прироста мощностей фотоэлектрических систем в жилищно-коммунальных секторах различных стран / Fig. 4. Statistics of the growth in the capacity of photovoltaic systems in the housing and communal sectors of various countries

\*Источник: составлено авторами по данным [29] / Source: compiled by the authors according to data [29]

Анализ действующих нормативных актов, регламентирующих функционирование объектов микрогенерации (таблица 1), выявил ряд существенных пробелов и противоречий, препятствующих развитию данного сектора энергетики. В частности, отсутствуют четкие и систематизированные требования к обеспечению качества электроэнергии в РЭС НН с подключенными объектами микрогенерации. Отсутствие четких методических указаний по выбору и применению средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности затрудняет обеспечение соответствия ПКЭ требованиям ГОСТа 32144-2013. На основе теоретических расчетов и анализа литературных данных [4, 8, 9, 13, 14] подтверждено, что интеграция объектов микрогенерации в РЭС НН приводит к изменению режимов работы сети, в частности, к возникновению обратных потоков мощности, что может являться причиной повышенного напряжения в узлах подключения объектов микрогенерации [30], а однофазное подключение объектов микрогенерации, характерное для бытовых потребителей, является причиной возникновения несимметрии напряжений. На основе анализа зарубежного опыта сделан вывод о необходимости разработки и внедрения комплекса мер, направленных на повышение качества функционирования объектов микрогенерации в РЭС НН. Результаты проведенного исследования подтверждают и дополняют выводы, представленные в работах [4, 8, 9, 13, 14, 19], что для успешного развития микрогенерации в России существует необходимость в преодолении ряда нормативных и технических барьеров. Предложенные в настоящей работе рекомендации, основанные на обобщении зарубежного опыта, могут служить основой для разработки дорожной карты по развитию микрогенерации в России для обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей.

**Заключение / Conclusion.** Снижение выбросов CO<sub>2</sub> входит в число приоритетных задач экономического развития России. С учетом значительной доли жилищно-коммунального хозяйства в общей структуре потребления электроэнергии развитие рынка микрогенерации на основе ВИЭ представляет собой значимый инструмент достижения углеродной нейтральности. Однако интеграция объектов микрогенерации в РЭС НН может приводить к ухудшению ПКЭ, связанных с медленными изменениями напряжения и несимметрией напряжений.

Анализ нормативных требований к функционированию объектов микрогенерации выявил недостаточную проработанность нормативно-правовой базы в данной области, что создаёт правовые и технологические барьеры для развития микрогенерации в России.

В контексте данных проблем способствовать развитию микрогенерации возможно за счет работы по ряду направлений:

- 1) установка требований к коэффициенту мощности объектов микрогенерации и внедрению систем повышения качества электроэнергии в РЭС НН с объектами микрогенерации;
- 2) разработка унифицированных методических указаний по обеспечению качества электроэнергии в электрических сетях с объектами микрогенерации, учитывающими опыт зарубежных стран;
- 3) реализация программ субсидирования и льготного кредитования для домохозяйств и малого бизнеса, аналогичных европейским инициативам;
- 4) инвестиции в цифровую инфраструктуру – системы мониторинга, прогнозирования и управления режимами сети на основе технологий машинного обучения и цифровых двойников.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ). Конкурсные отборы инвестиционных проектов ВИЭ. URL: <https://rreda.ru/industry/competitive-selection/> (дата обращения: 03.11.2024).
2. Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ). URL: <https://rreda.ru/> (дата обращения: 15.05.2025).
3. Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ). Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития: информационный бюллетень (июль 2023). URL: [https://rreda.ru/upload/iblock/719/b1283yr9mdgl1n7bzzf5f01jzqx3ku48l/202307\\_RREDA\\_Annual\\_RES\\_report\\_v4.pdf](https://rreda.ru/upload/iblock/719/b1283yr9mdgl1n7bzzf5f01jzqx3ku48l/202307_RREDA_Annual_RES_report_v4.pdf) (дата обращения: 12.01.2025).

4. Выборочный контроль показателей качества электроэнергии в распределительных сетях с большой долей генерации на основе возобновляемых источников энергии / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов // *Электричество*. 2022. № 7. С. 11–23. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-7-11-23>.
5. Федеральная служба государственной статистики. Электробаланс и потребление электроэнергии по субъектам РФ. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/elbalans-2023.xlsx> (дата обращения: 17.10.2024).
6. Соснина Е. Н., Шалухо А. В. Вопросы эффективного использования возобновляемых источников энергии в локальной системе электроснабжения потребителей // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2012. № 3(35). С. 214–218.
7. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 марта 2024 года № 581-р. // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://static.government.ru/media/files/25ZYOXchG4i2xbA5R2JYCucTbHOXFxwF.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).
8. Илюшин П. В., Вольный В. С. Обзор методов решения проблемных вопросов функционирования устройств защиты в microgrid напряжением до 1 кВ с распределенными источниками энергии // *Релейная защита и автоматизация*. 2022. № 4(49). С. 6–21.
9. 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.
10. Илюшин П. В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ*. 2022. № 4. С. 98–107. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-98-107>. – EDN FKOZMW.
11. Ali S., Pearsall N., Putrus G. Impact of high penetration level of grid-connected photovoltaic systems on the UK low voltage distribution network // *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela, Spain, 28–30 March 2012*; P. 519–522.
12. Gabdullin Y., Azzopardi B. Impacts of Photovoltaics in Low-Voltage Distribution Networks: A Case Study in Malta // *Energies* 2022. No. 15. P. 6731.
13. Чурин С. В., Рудых А. В. Исследование несимметрии напряжения в коммунально-бытовом секторе // *Актуальные вопросы аграрной науки*. 2022. № 42. С. 13–21.
14. Кугучева Д. К., Харитонов М. С. Способ снижения влияния объектов микрогенерации на базе ФЭП на несимметрию напряжений // *Будущее технической науки : сборник материалов XXIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения конструктора, испытателя, полярника, исследователя Арктики и Антарктиды А. Ф. Николаева, Нижний Новгород, 31 мая 2024 г. Нижний Новгород: Федеральное Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, 2024. С. 193.*
15. Global-regulation.com. Royal Decree 1699 / 2011, On 18 November, Which Regulates The Connection To Electric Power Of Small Power Production Facilities. URL: <https://www.global-regulation.com/translation/spain/618389/royal-decree-1699---2011%252c-on-18-november%252c-which-regulates-the-connection-to-electric-power-of-small-power-production-facilities.html> (дата обращения: 11.02.2025).
16. webshop.ds.dk. DS/EN 50549-1:2019 Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks. Part 1: Connection to a LV distribution network – Generating plants up to and including Type B. URL: <https://webshop.ds.dk/en/standard/M315016/ds-en-50549-1-2019> (дата обращения: 13.02.2025).
17. NEN. NEN 1010:2020+C1:2024. URL: <https://www.nen.nl/en/nen-1010-2020-c1-2024-nl-325089> (дата обращения: 14.02.2025).
18. globalspec.com. CEI 0-21-2022 Reference technical rules for the connection of active and passive users to the LV electrical Utilities. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14505609/0-21> (дата обращения: 14.02.2025).
19. Илюшин П. В., Березовский П. К., Филиппов С. П. Формирование технических требований к генерирующим установкам распределённой генерации для участия в регулировании напряжения // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: в 2 кн. Ташкент, 23–27 сентября 2019 года. Кн. 1. Выпуск 70. Ташкент : Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, 2019. С. 64–73.*

20. VDE VERLAG. VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel:2018-11 Generators connected to the low-voltage distribution network. URL: <https://www.vde-verlag.de/standards/0100492/vde-ar-n-4105-anwendungsregel-2018-11.html> (дата обращения: 11.02.2025).
21. IEEE Standards Association. IEEE 1547-2018 IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1547/5915/> (дата обращения: 11.02.2025).
22. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310270018> (дата обращения: 29.02.2024).
23. clean-energy-islands.ec.europa.eu. Loan (KfW Renewable Energy Standard). URL: <https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/countries/germany/legal/res-electricity/loan-kfw-renewable-energy-standard> (дата обращения: 13.02.2025).
24. EnergySage. Federal solar tax credit in 2025: How does it work? URL: <https://www.energysage.com/solar/solar-tax-credit-explained/> (дата обращения: 12.02.2025).
25. Clean Energy Regulator. Small-scale Renewable Energy Scheme. URL: <https://cer.gov.au/schemes/renewable-energy-target/small-scale-renewable-energy-scheme> (дата обращения: 14.02.2025).
26. GOV.UK. Green Homes Grant. URL: <https://www.gov.uk/guidance/apply-for-the-green-homes-grant-scheme> (дата обращения: 11.02.2025).
27. Energy Networks Australia. Digital twin essential for capacity. URL: <https://www.energynetworks.com.au/news/energy-insider/2023-energy-insider/digital-twin-essential-for-capacity/> (дата обращения: 12.02.2025).
28. BMWK. BMWK – Energiewende. URL: <https://www.bmwk.de/Navigation/DE/Home/home.html> (дата обращения: 12.02.2025).
29. IEA. Renewable Energy Progress Tracker. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker> (дата обращения: 12.02.2025).
30. 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>.

## REFERENCES

1. Association for the Development of Renewable Energy (RREDA). Competitive selections of RES investment projects. Available from: <https://rreda.ru/industry/competitive-selection/> [Accessed 03 November 2024]. (In Russ.).
2. Association for the Development of Renewable Energy (RREDA). Available from: <https://rreda.ru/> [Accessed 15 May 2025]. (In Russ.).
3. Association for the Development of Renewable Energy (RREDA). Russian Renewable Energy Market: Current Status and Development Prospects: Information Bulletin (July 2023). Available from: [https://rreda.ru/upload/iblock/719/b1283yr9mdg1n7bzzf5f01jzqx3ku48l/202307\\_RREDA\\_Annual\\_RES\\_report\\_v4.pdf](https://rreda.ru/upload/iblock/719/b1283yr9mdg1n7bzzf5f01jzqx3ku48l/202307_RREDA_Annual_RES_report_v4.pdf) [Accessed 12 January 2025]. (In Russ.).
4. Kulikov AL, Ilyushin PV, Loskutov AB, Sevostyanov AA. Selective monitoring of power quality indicators in distribution networks with a high proportion of renewable energy generation. *Elektrichestvo*. 2022;(7):11-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-7-11-23>. (In Russ.).
5. Federal State Statistics Service. Electricity balance and electricity consumption by constituent entities of the Russian Federation. Available from: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/elbalans-2023.xlsx> [Accessed 17 October 2024]. (In Russ.).
6. Sosnina EN, Shalukho AV. Issues of efficient use of renewable energy sources in the local power supply system of consumers. *Vestnik of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*. 2012;3(35):214-218. (In Russ.).
7. Official Internet Portal of Legal Information. On the approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the fuel and energy complex until 2030: Decree of the Government of the Russian Federation No. 581-r of March 12, 2024. Available from: <http://static.government.ru/media/files/25ZYOXchG4i2xbA5R2JYCucTbHOXFxwF.pdf> [Accessed 12 February 2025]. (In Russ.).
8. Ilyushin PV, Volnyy VS. Review of methods for solving problematic issues of protection devices functioning in microgrids up to 1 kV with distributed energy sources. *Relay Protection and Automation*. 2022;4(49):6-21. (In Russ.).

9. Kharitonov MS, Kugucheva DK. Investigation of the influence of microgeneration facilities on the voltage level in low-voltage electrical networks. *Electricity. Transmission and distribution*. 2024;1(82):34-43. (In Russ.).
10. Ilyushin PV. Integration of power plants based on renewable energy sources in the Unified Energy System of Russia: a review of problematic issues and approaches to their solution. *Vestnik MEI*. 2022;(4):98-107. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-98-107>. EDN FKOZMW. (In Russ.).
11. Ali S, Pearsall N, Putrus G. Impact of high penetration level of grid-connected photovoltaic systems on the UK low voltage distribution network. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela, Spain, 28-30 March 2012*; P. 519-522.
12. Gabdullin Y, Azzopardi B. Impacts of Photovoltaics in Low-Voltage Distribution Networks: A Case Study in Malta. *Energies*. 2022;(15):6731.
13. Churin SV, Rudykh AV. Investigation of voltage unbalance in the municipal sector. *Actual problems of agrarian science*. 2022;(42):13-21. (In Russ.).
14. Kugucheva DK, Kharitonov MS. A method for reducing the influence of microgeneration facilities based on PV on voltage unbalance. In: *Future of technical science: collection of materials of the XXIII All-Russian Youth Scientific and Technical Conference, dedicated to the 110th anniversary of the birth of designer, tester, polar explorer, researcher of the Arctic and Antarctica A. F. Nikolaev, Nizhny Novgorod, May 31, 2024*. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after RE. Alekseev; 2024. P. 193. (In Russ.).
15. Global-regulation.com. Royal Decree 1699 / 2011, On 18 November, Which Regulates The Connection To Electric Power Of Small Power Production Facilities. Available from: <https://www.global-regulation.com/translation/spain/618389/royal-decree-1699---2011%252c-on-18-november%252c-which-regulates-the-connection-to-electric-power-of-small-power-production-facilities.html> [Accessed 11 February 2025].
16. webshop.ds.dk. DS/EN 50549-1:2019 Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks. Part 1: Connection to a LV distribution network – Generating plants up to and including Type B. Available from: <https://webshop.ds.dk/en/standard/M315016/ds-en-50549-1-2019> [Accessed 13 February 2025].
17. NEN. NEN 1010:2020+C1:2024. Available from: <https://www.nen.nl/en/nen-1010-2020-c1-2024-nl-325089> [Accessed 14 February 2025].
18. globalspec.com. CEI 0-21-2022 Reference technical rules for the connection of active and passive users to the LV electrical Utilities. Available from: <https://standards.globalspec.com/std/14505609/0-21> [Accessed 14 February 2025].
19. Ilyushin PV, Berezovsky PK, Filippov SP. Formation of technical requirements for generating units of distributed generation for participation in voltage regulation. *Methodological issues of studying the reliability of large energy systems: in 2 books, Tashkent, September 23-27, 2019*. Book 1. Issue 70. Tashkent: Institute of Energy Systems named after LA. Melentiev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. P. 64-73. (In Russ.).
20. VDE VERLAG. VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel:2018-11 Generators connected to the low-voltage distribution network. Available from: <https://www.vde-verlag.de/standards/0100492/vde-ar-n-4105-anwendungsregel-2018-11.html> [Accessed 11 February 2025].
21. IEEE Standards Association. IEEE 1547-2018 IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Available from: <https://standards.ieee.org/ieee/1547/5915/> [Accessed 11 February 2025].
22. Official Internet Portal of Legal Information. On the approval of the Climatic Doctrine of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 812 of October 26, 2023. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310270018> [Accessed 29 February 2024]. (In Russ.).
23. clean-energy-islands.ec.europa.eu. Loan (KfW Renewable Energy Standard). Available from: <https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/countries/germany/legal/res-electricity/loan-kfw-renewable-energy-standard> [Accessed 13 February 2025].
24. EnergySage. Federal solar tax credit in 2025: How does it work?. Available from: <https://www.energysage.com/solar/solar-tax-credit-explained/> [Accessed 12 February 2025].
25. Clean Energy Regulator. Small-scale Renewable Energy Scheme. Available from: <https://cer.gov.au/schemes/renewable-energy-target/small-scale-renewable-energy-scheme> [Accessed 14 February 2025].
26. GOV.UK. Green Homes Grant. Available from: <https://www.gov.uk/guidance/apply-for-the-green-homes-grant-scheme> [Accessed 11 February 2025].
27. Energy Networks Australia. Digital twin essential for capacity. Available from: <https://www.energynetworks.com.au/news/energy-insider/2023-energy-insider/digital-twin-essential-for-capacity/> [Accessed 12 February 2025].

28. BMWK. BMWK – Energiewende. Available from: <https://www.bmwk.de/Navigation/DE/Home/home.html> [Accessed 12 February 2025].
29. IEA. Renewable Energy Progress Tracker. Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker> [Accessed 12 February 2025].
30. Kugucheva DK. Evaluating the effectiveness of output power control for photovoltaic converters to improve power quality. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;1(100):31-43. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.3>. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дарья Константиновна Кугучева** – преподаватель кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, Scopus ID: 57450694000, Researcher ID: AEF-1929-2022.

**Максим Сергеевич Харитонов** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, Scopus ID: 57222610456, Researcher ID: HQZ-5573-2023.

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Дарья Константиновна Кугучева.** Сбор, интерпретация и анализ нормативно-правовой базы, регламентирующей функционирование объектов микрогенерации, анализ результатов исследований влияния объектов микрогенерации на качество электроэнергии, обобщение и систематизация зарубежного опыта по обеспечению качества электроэнергии в РЭС НН с объектами микрогенерации, формирование практических рекомендаций по внедрению объектов микрогенерации в РЭС НН, подготовка и редактирование текста статьи.

**Максим Сергеевич Харитонов.** Определение целей и задач исследования, подготовка и редактирование текста статьи, проверка точности и обоснованности полученных результатов и обеспечение общего качества исследования, утверждение окончательного варианта статьи и принятие ответственности за все аспекты работы.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Darya K. Kugucheva** – Lecturer, Department of Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Scopus ID: 57450694000, Researcher ID: AEF-1929-2022.

**Maxim S. Kharitonov** – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Department of Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Scopus ID: 57222610456, Researcher ID: HQZ-5573-2023.

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Darya K. Kugucheva.** Collection, interpretation, and analysis of the regulatory framework governing the operation of microgeneration facilities; analysis of research results on the impact of microgeneration facilities on power quality; generalization and systematization of international experience in ensuring power quality in LVDNs with microgeneration facilities; development of practical recommendations for implementing microgeneration facilities in LVDNs; preparation and editing of the article text.

**Maxim S. Kharitonov.** Definition of the goals and objectives of the study, preparation and editing of the text of the article, verification of the accuracy and validity of the results obtained and ensuring the overall quality of the study, approval of the final version of the article and acceptance of responsibility for all aspects of the work.