

УДК 621.316.1-047.44
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-18-24

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

И.Н. Гладков, М.Ф. Носков

Аннотация. Сделан обзор концепции распределенной генерации как децентрализованного способа производства электроэнергии вблизи точек потребления распределительной сети с использованием различных источников энергии, включая возобновляемые. Проведен анализ ключевых преимуществ распределенной генерации в аналогии с традиционным централизованным электроснабжением, таких как экономическая выгода, повышение качества и надежности электроснабжения и сокращение выбросов парниковых газов для источников возобновляемой энергии. Рассмотрены технологические аспекты распределенной генерации: силовая преобразовательная электроника, механизмы управления и хранения электроэнергии, которые способны обеспечить эффективное функционирование и интеграцию распределенной генерации.

Ключевые слова: система электроснабжения; распределительные сети; когенерация.

БӨЛҮШТҮРҮЛГӨН ГЕНЕРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА СЕРЕП САЛУУ ЖАНА АЛАРДЫН САЛЫШТЫРМА ТАЛДООСУ

И.Н. Гладков, М.Ф. Носков

Аннотация. Бул макалада ар кандай энергия булактарын, анын ичинде кайра жаралуучу энергияны колдонуу менен бөлүштүрүүчү тармактын керектөө чекиттерине жакын электр энергиясын өндүрүүнүн борбордон ажыратылган жолу катары бөлүштүрүлгөн муун концепциясына сереп салынды. Бөлүштүрүлгөн генерациянын экономикалык пайда, электр менен камсыздоонун сапатын жана ишенимдүүлүгүн жогорулатуу жана кайра жаралуучу энергия булактары үчүн парник газдарын чыгарууну кыскартуу сыяктуу салттуу борборлоштурулган электр менен жабдуу аналогиясында негизги артыкчылыктарына талдоо жүргүзүлдү. Бөлүштүрүлгөн муундун технологиялык аспектиери каралат: бөлүштүрүлгөн муундун эффективдүү иштешин жана интеграциясын камсыз кылууга жөндөмдүү электр энергиясын трансформациялоочу электроника, башкаруу механизмдери жана электр энергиясын сактоо.

Түйүндүү сөздөр: электр менен жабдуу тутуму; бөлүштүрүүчү тармактар; когенерация.

REVIEW OF DISTRIBUTED GENERATION TECHNOLOGIES AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS

I.N. Gladkov, M.F. Noskov

Abstract. This article provides an overview of the concept of distributed generation as a decentralized method of producing electricity near the points of consumption of the distribution network using various energy sources, including renewable ones. Based on foreign experience, an analysis of the key advantages of distributed generation in analogy with traditional centralized power supply is carried out, such as: economic benefits, improved quality and reliability of electricity supply and reduced greenhouse gas emissions for renewable energy sources. Particular attention is paid to the technological aspects of distributed generation: power conversion electronics, control and storage mechanisms for electricity, which can ensure the efficient operation and integration of distributed generation.

Keywords: power supply system; distribution networks; cogeneration.

Введение. Распределенная генерация (РГ) – это децентрализованная генерация, расположенная вблизи точки потребления. Эти системы получают энергию из различных источников энергии, некоторые из них известны как возобновляемые [1].

Технологии РГ имеют ряд преимуществ перед традиционной централизованной генерацией электроэнергии, в том числе [2]:

- Снижение потерь в линии: РГ может уменьшить количество электроэнергии, которую необходимо передать на большие расстояния, что может привести к значительной экономии энергии вследствие снижения потерь на передачу.
- Повышение регулировочной способности: РГ может повысить устойчивость распределительной системы в узлах нагрузки, поддерживая номинальный уровень напряжения, особенно это важно для регионов со слабой сетью электроснабжения и сельской местности.
- Повышение надежности: РГ улучшает надежность электрических сетей, выступают в данном случае как альтернативный источник питания во время аварийных или плановых отключений.
- Улучшение экологической ситуации: РГ на возобновляемых источниках в общем случае снижает уровень выбросов парниковых газов.

Ключевые технологические аспекты РГ [3]:

- Силовые полупроводниковые преобразователи: инверторы, выпрямители и другие полупроводниковые преобразователи электрических параметров необходимы для обеспечения связи между источником РГ и нагрузкой, подключенных к распределительной сети.
- Механизм управления: эти системы контролируют функционирование блоков РГ, включая координацию работы нескольких блоков, регулирование их мощности в соответствии со спросом и обеспечение резервного питания в случае отключения электроэнергии.
- Хранение энергии: использование таких систем, как аккумуляторы и маховики позволяет аккумулировать избыточную энергию от агрегатов РГ, а затем высвобождать ее, когда это необходимо для удовлетворения спроса.

Технологии РГ быстро развиваются, постоянно появляются новые технологии. Поскольку стоимость технологий РГ продолжает снижаться, а преимущества РГ становятся все более широко признанными, РГ готова взять на себя ключевую роль в эволюции энергосистемы в ближайшие годы.

Вот несколько примеров технологий РГ [4]:

- Солнечные фотоэлектрические панели.
- Ветряные турбины.
- Электростанции на энергии биомассы.
- Геотермальные генераторы.
- Газовые генераторы.
- Топливные элементы.

Технологии РГ могут использоваться для питания многочисленных потребителей, в том числе домов, предприятий, школ, больниц, ферм, промышленных объектов, военных баз и отдаленных населенных пунктов [5]. РГ также способствует созданию автономных электрических сетей, микросетей, которые способны функционировать независимо от первичной сети.

РГ размер и планирование. РГ является новейшим достижением в энергетике, однако в имеющейся литературе до сих пор не существует конкретной общепризнанной терминологии РГ. Обычно РГ можно определить как распределительную сеть, которая в энергетическом секторе ограничена объектами, поставляющими электроэнергию потребителям, и электрическими службами, которые занимаются распределением или управлением розничной торговлей. В некоторых секторах РГ также может рассматриваться с разных точек зрения, таких как генерирующая мощность, разная величина напряжения на участке передачи/распределения, технологии распределения, предоставляемые услуги, зона подачи электроэнергии, режим работы или наличие некоторых базовых особенностей, таких как когенерация, использование возобновляемых ресурсов, микрогенерация и т. д. В ряде случаев РГ

рассматривается в соответствии с базовой теорией, где РГ трактуется как «напрямую подключенный источник энергии к распределительной сети в месте подключения счетчика у потребителя». РГ можно также рассматривать как систему сбора и использования возобновляемых источников энергии.

Оптимальное определение РГ можно определить так: РГ представляет собой маломощную, по сравнению с работающими в централизованной системе, электростанцию, расположенную рядом с потребителем [6]. Что касается номинала, то из имеющихся литературных источников нами выбраны некоторые из основных определений РГ, исходя из цели, номинала, местоположения и технологии:

- Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения определяет «РГ как все генерирующие блоки с максимальной мощностью 50–100 МВт, которые обычно подключены к распределительной сети и не подлежат ни централизованному планированию, ни диспетчеризации».
- Международная ассоциация «Институт инженеров электротехники и электроники» определяет РГ как производство электроэнергии объектами значительно меньшей мощности, чем центральные электрические станции, с возможностью их подсоединения практически в любой точке системы электроснабжения.
- Международное энергетическое агентство определяет РГ как электростанцию, которая обслуживает потребителя на месте или поддерживает распределительную сеть, обычно подключенную к сети с напряжением на уровне распределения.

Объекты РГ также классифицируются по-разному в зависимости от их установленной мощности. Например, ограничения по мощности для малой генерации варьируются от страны к стране. В Англии и Уэльсе объекты электроэнергетики с номинальной мощностью около 50 МВт не имеют права к вовлечению в оптовом рынке электроэнергии. Диспетчерское управление в данном случае осуществляется лишь на энергоблоках, номинальное значение мощности которых не менее 100 МВт; граничная электромощность для малых генераторных установок в Швеции составляет 1,5 МВт.

За исключением определения Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения, все остальные определения отмечают, что агрегаты РГ напрямую связаны с распределительной сетью или установлены у потребителя. Эти децентрализованные системы предлагают жизнеспособную альтернативу традиционным централизованным электростанциям, которые предоставляют электроэнергию ближе к месту ее использования. Различные номиналы РГ показаны на рисунке 1.

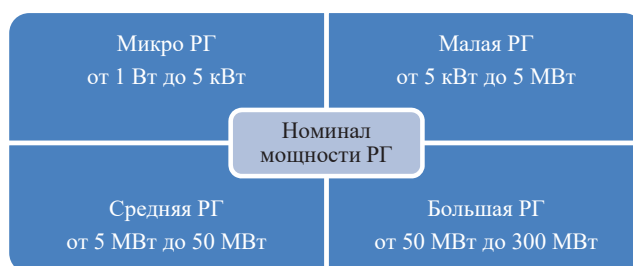


Рисунок 1 – Номинал мощности РГ

Термин «встроенная генерация» используется коммунальными предприятиями для объяснения оптимального расположения ресурсов РГ (локализованных или централизованных) в форме когенерации. Последний критерий предусматривает, что энергоблок подключается непосредственно к распределительному устройству или точке присоединения. В некоторых случаях его определяют как крупные генерирующие агрегаты, подключенные непосредственно к сети передачи, определяющей местоположение РГ.

Сравнительный анализ традиционных и современных технологий. Благодаря развитию инноваций и расширению размеров РГ коммунальные предприятия и потребители могут получать энергию из широкого спектра технологий РГ, представленных на рисунке 2. Различные типы технологий РГ, такие как коммерческие технологии и новые технологии, кратко приведены в таблице 1 с наиболее часто используемыми технологиями РГ, включая их общие данные, размер, электрический КПД, топливо, выбросы NO_2 , CO_2 , стоимость, применение, преимущества и недостатки [6–8].

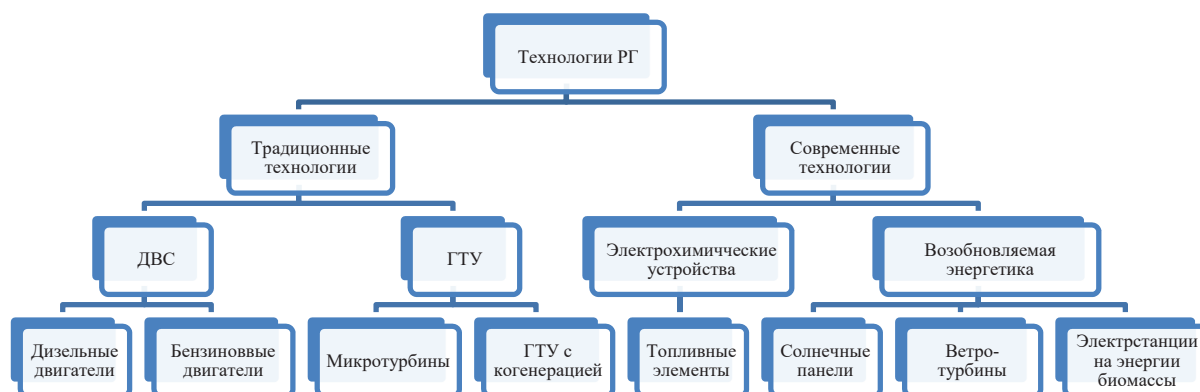


Рисунок 2 – Технологии РГ

Выбор наиболее подходящей технологии для конкретной ситуации во многом зависит от уникальных требований пользователя. Если важны надежность и простота использования, то лучшим вариантом могут стать традиционные технологии. Если важны эффективность и экологичность, то лучшим вариантом могут стать современные технологии. В таблице 1 представлен сравнительный анализ технологий РГ. В этой таблице приведено сравнение шести технологий РГ: поршневые двигатели, турбины внутреннего сгорания, микротурбины, топливные элементы, фотоэлектрические системы и ветряные турбины. В таблице также приведена общая информация: размер, электрический КПД, топливо, выбросы NO_2 , выбросы CO_2 , стоимость, применение, преимущества и недостатки. Из данных, приведенных в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

- Поршневые двигатели недороги и надежны, но имеют высокие выбросы в окружающую среду и не подходят для экологически чистой энергетики.
- Турбины с когенерацией лучше всего подходят для ТЭЦ, но они имеют высокую стоимость и требуют длительного времени запуска.
- Микротурбины имеют низкие затраты на установку и выбросы, но не имеют широкого распространения.
- Топливные элементы обладают высоким качеством энергии и гибкостью в выборе топлива, но они имеют высокую стоимость и еще не получили широкого распространения.
- Фотоэлектрические системы лучше всего подходят для экологически чистых источников энергии, но не подходят для непрерывной, пиковой мощности или теплоснабжения.
- Ветрогенераторы обеспечивают наиболее экологичное производство электроэнергии (отсутствие сжигания ископаемого топлива, хотя существует ряд экологических ограничений, связанных с вибрационными процессами во время работы таких систем и с утилизацией накопителей энергии), но данная установка является дорогостоящей, а выработка электроэнергии зависит от наличия и скорости ветра.

Таблица 1 – Сравнительный анализ технологий распределенной генерации

Параметры	Поршневые двигатели [8, 9]	ГТУ с когенерацией [10–13]	Микротурбина [9, 11–19]	Топливный элемент [9–30]	Фотоэлектрические [9, 17–19]	Ветроэлектростанция [9–20, 31]
Общая информация	Поршневые двигатели являются частью двигателей внутреннего сгорания, к которым также относятся роторные двигатели	Когенерационный принцип работы позволяет использовать непрерывную выработку тепловой и электрической энергии	Инновации, лежащие в основе микротурбин, основаны на системах управления мощностью, используемых в дирижаблях, турбокомпрессорах в дизельных двигателях и автомобильных конструкциях	Батарея топливных элементов – топливные элементы, содержащие электролитический материал	Фотоэлектрические системы, часто называемые солнечными панелями, генерируют электроэнергию посредством фотоэлектрических элементов	Отрасль энергетики, специализирующаяся на преобразовании кинетической энергии воздушных масс в атмосферную. Лопасти ветряных турбин обычно состоят из двух или трех лопастей, каждая длиной примерно 10–30 м
Мощность	кВт – 10 МВт	1 – 30 МВт	кВт – 1 МВт	кВт – 1 МВт	Каждая ячейка обеспечивает ток 2–4 А в зависимости от ее размера и выходным напряжением 0,5 В	20–100 кВт
КПД	– 42 %	Около 25 %	– 30 %	– 60 %	– 25 %	– 50 %
Источники энергии	Двигатель для выработки электроэнергии в первую очередь использует природный газ в качестве предпочтительного источника топлива	В качестве топлива используется преимущественно газ	Природный газ, но запасы природного газа ограничены, поэтому можно использовать уголь и биомассу	Анод: газообразный водород, катод: кислород, электролит. Вместо водорода можно использовать бензин, пропан или природный газ	Тонкая пластинка кристаллического кремния, Солнце	Кинетическая энергия атмосферных масс
Выбросы NO ₂	0,064–0,100 кг/МВт*ч	0,318–0,453 кг/МВт*ч	0,100 кг/МВт*ч	0,045–0,091 кг/МВт*ч	Отсутствие выбросов в окружающую среду	Отсутствие выбросов в окружающую среду
Выбросы CO ₂	Для ДВС Дизель: 748 кг/МВт*ч Бензин: 693 кг/МВт*ч Керосин: 727 кг/МВт*ч Торф: 1520 кг/МВт*ч Природный газ: 552 кг/МВт*ч Уголь: примерно 1234 кг/МВт*ч	408–907 кг/МВт*ч	кг/МВт*ч	430–522 кг/МВт*ч	Отсутствие выбросов в окружающую среду	Отсутствие выбросов в окружающую среду
Расходы	125–300 \$/кВт	250–600 \$/кВт	300–600 \$/кВт	1900–3500 \$/кВт	5000–7000 \$/кВт	4000–9000 \$/кВт

Применение	Лучше всего подходит для равномерной и пиковой мощности, простота внедрения мощностью менее 10 MWt	Лучше всего подходит для комбинированного производства тепла и электроэнергии (ТЭЦ), используется для аварийного питания	Коммерческое строительство, рынок легкой промышленности для когенерации. Идеально подходит для удаленных объектов нефтегазовой отрасли	Коммерческий и промышленный рынок, промышленная когенерация. Идеально подходит для моделей премиум-класса, непрерывное и экологически чистое энергоснабжение	Лучше всего подходит для экологически чистой энергетики. Космические программы, такие как космические передатчики и спутниковые устройства. Питание солнечной энергией малой нагрузки. Питание удаленных районов	Лучше всего подходит для экологически чистой энергетики. Применение в районах со стабильной ветровой нагрузкой.
Преимущества	Бюджетный, Надежный, требуется нечастое обслуживание, легкий запуск, хорошие характеристики, высокий потенциал рециркуляции тепла, высокая эффективность, производство энергии не зависит от погодных условий	Низкая стоимость установки, низкий уровень выбросов, требуется нечастое обслуживание, снижение выбросов NO_2 и CO_2 благодаря высококачественному системе дымоотвода, низкие расходы	Компактный размер, надежный, малый вес, высокоскоростной, сокращение выбросов CO_2 на 59 % и 95 % снижение NO_2 , более низкие затраты на электроэнергию, меньшие потери от износа	Высокое качество электроэнергии, гибкость в выборе топлива и коммерческая осущест्वимость, очень низкий уровень выбросов в окружающую среду, отсутствие движущихся частей, что связано с низким уровнем шума, экологически чистый, поскольку не сжигает топливо	Надежный, требует минимального обслуживания, отсутствие выбросов в окружающую среду, используются более дешевые компоненты, чтобы снизить стоимость, более низкая стоимость производства	Недорогой, отсутствие выбросов вносит вклад в глобальную безопасность, затраты на энергию ветра со временем снижаются по сравнению с традиционным топливом. Будущее устойчивое развитие
Недостатки	Низкое качество электроэнергии, высокий уровень выбросов в окружающую среду, не подходит для экологически чистой энергетики из-за высокого уровня выбросов	Низкая пригодность для экологически чистой энергетики, низкий электрический КПД из-за высоких выбросов CO_2 , высокая стоимость топлива, малый срок службы	Высокая стоимость, большое время запуска. Не подходит для резервной системы	Высокая стоимость Труднодоступное топливо, легковоспламеняющееся. Проблемы с хранением из-за водорода, его сложно хранить и транспортировать. Выбросы диоксида азота	Эта конкретная технология РГ является одним из наиболее доступных вариантов. Кроме того, его выходную мощность сложно контролировать, что делает его менее подходящим для ситуаций пикового спроса	Непредсказуемый характер ветровых усло-вий. Для производства электроэнергии необходима достаточная скорость ветра. Не подходит для непрерывной, пиковой мощности выработки тепла

Закключение. Выбор конкретной технологии РГ зависит от большого количества факторов и условий, в которых планируется внедрение системы, включая номинальную мощность, доступность и стоимость топлива, экологическую обстановку и финансирование.

В некоторых случаях газотурбинные установки с когенерацией могут выступить как наиболее подходящий вариант, несмотря на их стоимость и высокую продолжительность пуска, как в случае с электростанциями на паровых турбинах. При наличии жестких экологических ограничений и требований к «чистой» энергетике в качестве предпочтительного варианта могут быть выбраны электростанции на солнечных панелях, но необходимо учитывать их высокую стоимость, зависимость от ширины размещения и топографические условия.

Различные технологии имеют как индивидуальные преимущества, так и недостатки, что создает определенные сложности при выборе той или иной технологии для конкретного случая. Однако приведенный выше обзор большого количества случаев реального внедрения данной технологии по всему миру может быть полезен при выборе стратегии развития систем электроснабжения конкретного региона или участка распределительной системы.

Поступила: 14.05.2025; рецензирована: 28.05.2025; принята: 30.05.2025.

Литература

1. Salkuti S.R. Advanced technologies for energy storage and electric vehicles / S.R. Salkuti // *Energies*. 2023; 16(5):2312.
2. Salkuti S.R. Emerging and advanced green energy technologies for sustainable and resilient future grid / S.R. Salkuti // *Energies*. 2022; 15(18):6667.
3. Sharma S. Microgrids: a review of status, technologies, software tools, and issues in Indian power market / S. Sharma, Y.R. Sood // *IETE Tech Rev*. 2022; 39(2):411–32.
4. Zia M.F. Microgrid transactive energy: review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis / M.F. Zia, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, S.M. Muyeen, K. Techato, J.M. Guerrero // *IEEE Access*. 2020; 8:19410–32.
5. Wolsink M. Distributed energy systems as common goods: socio-political acceptance of renewables in intelligent microgrids / M. Wolsink // *Renew Sustain Energy Rev*. 2020; 127:109841.
6. Ligo X. Impact of innovation in marine energy generation, distribution, or transmission-related technologies on carbon dioxide emissions in the United States / X. Ligo, M. Ahmad, S.I. Khattak // *Renew Sustain Energy Rev*. 2022; 159:112225.
7. Al-Ismail F.S. Discussion on «A new formulation of distribution network reconfiguration for reducing the voltage volatility induced by distributed generation / F.S. Al-Ismail» // *IEEE Trans Power Syst*. 2020; 35:4974. URL: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2981700>.
8. Benalcazar P. Distributed photovoltaic generation in Ecuador: economic analysis and incentives mechanisms / P. Benalcazar, J. Lara, M. Samper // *IEEE Latin America Transactions*. 2020; 18:564–72. URL: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9090077>.