ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

5. Penrose E. The Theory of the Growth of the Firm. Oxford: Blackwell, 1959. 272 p.
6. Roberts M. Copper price supercycles and the green energy transition // Mineral Economics. 2021. Vol. 34. No. 3. P. 411-426.
7. Михайлов А.В. Управление ценовыми рисками металлургических предприятий на основе сценарного анализа // Экономика промышленности. 2018. No. 2. С. 45-58.
8. Юсупов Б.А., Рашидова М.К. Горнодобывающий сектор в структуре экспорта Узбекистана // Экономика и инновационные технологии. 2021. No. 1. С. 34-46.
9. World Bank. Commodity Markets Outlook. Washington, D.C.: World Bank Group, 2024.
10. London Metal Exchange. LME Annual Report 2024. London: LME, 2024.

ISSN 3030-3907

КЛАССИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УРОВНИ ИХ СЕТЕВОЙ ИНТЕГРАЦИИ.

Насруллаев Юсуф Закирович
Каршинский государственный технический университет, (PhD), м.н.с.
Хидиров Мираббос Мирзаёр ўғли
Каршинский государственный технический университет, старший преподователь.

Аннотация. Возрастающая доля возобновляемых источников энергии способствует развитию распределённых энергетических ресурсов и требует совершенствования методов их интеграции в электрические сети. В статье рассматриваются классификация распределённых фотоэлектрических систем и основные уровни их подключения к сети. Особое внимание уделено вопросам выбора точки общего присоединения, уровням напряжения, а также влиянию инверторных технологий на качество электроэнергии и устойчивость сети. Проанализированы основные технические проблемы интеграции, включая гармонические искажения, перекос фаз и колебания напряжения. Показано, что эффективная интеграция распределённых фотоэлектрических систем связана с развитием интеллектуальных инверторов, систем накопления энергии и технологий интеллектуальных электрических сетей.

Ключевые слова: распределённые энергетические ресурсы; фотоэлектрические системы; распределённая генерация; сетевые уровни интеграции; точка общего присоединения; инверторные технологии; качество электроэнергии; интеллектуальные сети; возобновляемые источники энергии; интеграция ВИЭ.

Abstract. The growing penetration of renewable energy sources is driving the rapid development of distributed energy resources and increasing the need for effective integration into electrical power networks. This paper reviews the classification of distributed photovoltaic (PV) systems and the main levels of their grid integration. Particular attention is paid to grid connection voltage levels, point of common coupling selection, and the role of inverter technologies in PV-grid interaction. Key technical challenges, including power quality, harmonic distortion, phase imbalance, and voltage stability, are also discussed. The study highlights that the future development of distributed PV systems depends on intelligent inverters, energy storage technologies, and smart grid solutions to ensure reliable and efficient power system operation.

Keywords: Distributed energy resources (DERs); photovoltaic (PV) systems; distributed generation; grid-level integration; point of common coupling (PCC);

inverter technologies; power quality; smart grids; renewable energy sources (RES); renewable energy integration.

Annotatsiya. Qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi ortib borishi taqsimlangan energetik resurslar rivojlanishini jadallashtirib, ularni elektr tarmoqlariga samarali integratsiya qilish zaruratini kuchaytirmoqda. Ushbu maqolada taqsimlangan fotoelektrik modullarning tasnifi hamda ularning elektr tarmoqlariga integratsiyalashuv darajalari tahlil qilindi. Fotoelektrik tizimlarning quvvati, ulanish rejimi va tarmoq bilan o‘zaro ishlash xususiyatlari ko‘rib chiqildi. Shuningdek, umumiy ulanish nuqtasi (PCC), kuchlanish darajalari va inverter texnologiyalarining elektr energiyasi sifati hamda tarmoq barqarorligiga ta’siri yoritildi. Integratsiya jarayonida yuzaga keladigan asosiy texnik muammolar, jumladan garmonik buzilishlar, fazalar nomutanosibligi va kuchlanish barqarorligi masalalari tahlil qilindi.

Kalit so‘zlar: taqsimlangan energetik resurslar (DER); fotoelektrik (PV) tizimlar; taqsimlangan generatsiya; elektr tarmoqlariga integratsiya darajalari; umumiy ulanish nuqtasi (PCC); invertor texnologiyalari; elektr energiyasi sifati; aqlli elektr tarmoqlari; qayta tiklanuvchi energiya manbalari (RES); qayta tiklanuvchi energiya manbalarini elektr tarmoqlariga integratsiyalash.

ВВЕДЕНИЕ.

Глобальный энергетический ландшафт претерпевает глубокую трансформацию, вызванную растущим внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и необходимостью модернизации энергетических систем, причем, по данным Международного энергетического агентства (МЭА), на долю возобновляемой энергии в 2023 году пришлось почти 30% мировой выработки электроэнергии [1]. Распределенная генерация (РГ), интеллектуальные сети (ИС), микросети (МС) и передовые системы накопления энергии (ПСНЭ) выступают ключевыми факторами обеспечения устойчивого и отказоустойчивого энергетического будущего, при этом особое внимание уделяется участию методов искусственного интеллекта (ИИ) в оптимизации работы сети, управлении напряжением и стабильности [1]. В этом контексте распределенные энергетические ресурсы (РЭР) обычно описываются как любой ресурс, подключенный к распределительной сети, хотя единого определения не существует, и классификации варьируются в зависимости от организации.

Таблица 1.

Определения РЭР различными организациями.

Организация	Определение

ISSN 3030-3907

Федеральная комиссия по регулированию энергетики США (FERC)	**РЭР** — это любой ресурс, расположенный в распределительной сети, любой её подсистеме или за счётчиком потребителя. К РЭР могут относиться системы накопления электроэнергии, распределённая генерация, управление спросом, повышение энергоэффективности, тепловое накопление, а также электрические транспортные средства и соответствующая зарядная инфраструктура [2].
Европейская комиссия (ЕС)	**РЭР** представляют собой ресурсы малой и средней мощности, подключённые преимущественно к низковольтным уровням энергосистемы (распределительным сетям) либо расположенные вблизи конечного потребителя. Ключевыми категориями являются распределённая генерация, накопители энергии и управление спросом [2].
Австралийская комиссия по регулированию энергетического рынка (AEMC)	**РЭР** — это устройства, способные производить, накапливать или управлять энергией в домохозяйствах и коммерческих объектах, часто обозначаемые как устройства, расположенные «за счётчиком». К ним относятся фотоэлектрические системы на крышах зданий, системы накопления энергии, управление спросом, электрические транспортные средства и системы управления энергией, хотя многие из этих технологий применяются не исключительно за счётчиком [2].

ISSN 3030-3907

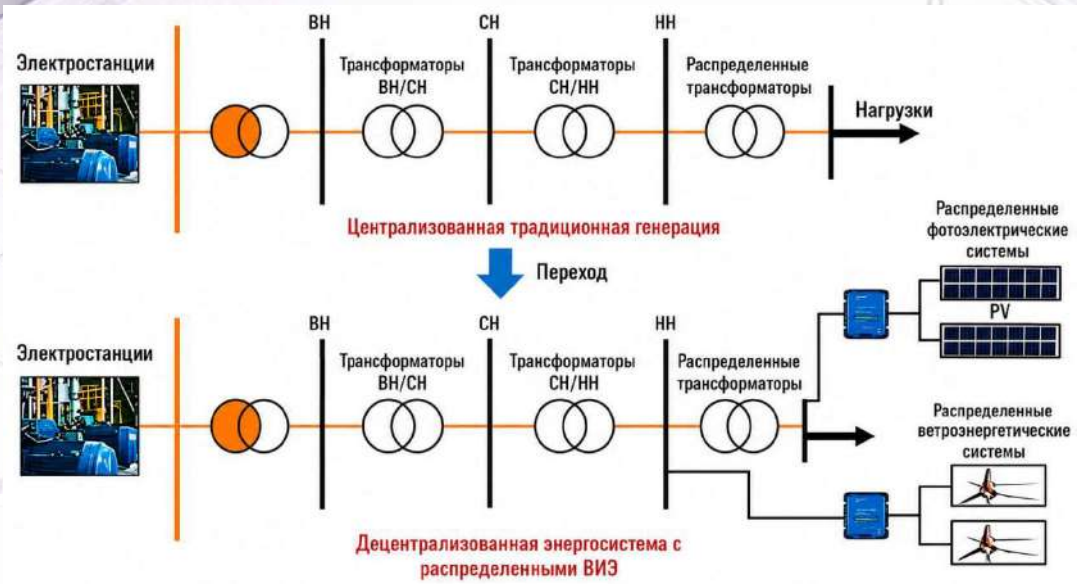


Рис. 1. Иллюстрация перехода энергосистемы от централизованной к распределённой генерации энергии (Iweh и др., 2021) [3].

Переход от централизованной к распределённой генерации энергии (рис. 1) предполагает вовлечение различных участников энергосистемы, включая возобновляемые источники и накопители энергии, для гибкого удовлетворения изменяющегося спроса [4]. В распределительных сетях всё шире применяются генераторы на основе ВИЭ, такие как фотоэлектрические системы, ветряные турбины и топливные элементы, что способствует снижению зависимости от ископаемого топлива [5]. В целом системы распределённых энергетических ресурсов классифицируются по режиму работы, области применения и масштабу энергоснабжения. Прежде всего, РЭС делятся на сетевые, работающие совместно с электрической сетью, и автономные (изолированные), функционирующие независимо от централизованного электроснабжения [6]. Сетевые системы обеспечивают двусторонний обмен энергией с сетью и позволяют компенсировать дефицит или избыток генерации, тогда как автономные ориентированы на питание удалённых объектов и требуют использования накопителей энергии или резервных источников. Кроме того, РЭС классифицируются по типу нагрузки и характеру энергопотребления. В системах малой мощности, предназначенных для жилых и коммерческих зданий, РЭС обычно включают комбинацию солнечных фотоэлектрических установок, ветроэнергетических установок и систем накопления энергии. В качестве накопителей широко применяются современные технологии, такие как твердооксидные топливные элементы (SOFC), топливные элементы с протонно-обменной мембраной (PEMFC), а также аккумуляторные системы хранения энергии. Совместное использование различных источников

ISSN 3030-3907

генерации повышает энергоэффективность и надёжность электроснабжения, а также снижает зависимость от традиционных энергоресурсов. На городском и региональном уровнях интеграция РЭС требует комплексного подхода к управлению энергетической системой.. В таких условиях необходимо учитывать особенности распределения нагрузки, динамику потребления электроэнергии и уровень интеграции возобновляемых источников энергии [6]. Для обеспечения надёжной работы энергосистем применяются интеллектуальные методы управления и технологии Smart Grid, обеспечивающие баланс между генерацией и потреблением энергии. Основные области применения распределённых энергетических систем представлены в следующей таблица.

Таблица 2.

Применение РЭС на различных масштабах.

Уровень	Тип сети	Тип нагрузки	Технология РЭС
Уровень района	Сетевая система	Стабильная	Интеграция систем генерации на основе ветровой, фотоэлектрической и биомассовой энергии [6]
	Автономная система	Переменная	Фотоэлектрическая система [6]
	Сетевая система	Переменная	Многоэнергетическая комбинированная система ССНР (совместного производства холода, тепла и электроэнергии) [6]
	Сетевая система	Переменная	Фотоэлектрическая система и ветровые турбины [6]
	Автономная система	Автономная микро-сеть	Система ССНР с двунаправленным подключением к электрической сети [6]
Уровень сообщества	Сетевая система	Стабильная	Энергетические системы на основе солнечной энергии и биогазовых генераторов [6].
	Сетевая система	Переменная	Фотоэлектрическая система с накопителем энергии [6]

ISSN 3030-3907

	Автономная система	Стабильная	Система когенерации водорода, тепла и электроэнергии на основе солнечной энергии [6].
	Сетевая система	Переменная	Регионально распределённые системы водородной энергетики [6]
	Сетевая система	Стабильная	Фотогальваническая система и ветряная турбина [6]
	Сетевая система	Стабильная	Гибридная система ФЭС, ветра и аккумуляторов [6]
	Автономная система	Автономная микро-сеть	Гибридные микро-сети ветра, солнечной энергии и аккумуляторов [6]
	Сетевая система	Стабильная	ВИЭ-CCHP-MG [6]
Городской уровень	Сетевая система	Переменная	CCHP с гибридным централизованным накопителем энергии [6]
	Сетевая система	Стабильная	Геотермальная система с ORC [6]

Для классификации уровней интеграции фотоэлектрических систем принципиально различать установки коммунального масштаба («utility-scale»), мощность которых обычно превышает 5 мегаватт (МВт) и которые подключаются к основной энергосистеме, и малые системы, подключаемые на уровнях распределения, такие как жилые и небольшие коммерческие объекты [7]. В ответ на рост возобновляемой энергетики были выделены четыре фазы интеграции переменной возобновляемой энергии (ПВЭ) для описания прогрессивных этапов ее проникновения в сеть, при этом каждая фаза связана с определенным набором проблем взаимодействия и эксплуатации системы [7]. При низких уровнях проникновения ПВЭ (обычно ниже 5–10 процентов от установленной мощности) изменчивость и ошибка прогнозирования чистой нагрузки определяются предсказуемыми колебаниями спроса, и энергосистемы обычно могут адаптироваться за счет существующих резервов [7]. Однако по мере увеличения доли ПВЭ изменчивость и неопределенность превышают типичные уровни, требуя дополнительных мер и адаптации планирования энергосистемы [7].

Важнейшим компонентом любой фотоэлектрической установки является инвертор, который преобразует мощность постоянного тока, поступающую

ISSN 3030-3907

от солнечных модулей, в мощность переменного тока, предназначенную для сети [7]. Его роль и схема интеграции отражены на рисунке Рис. 2.: Основные компоненты солнечной фотоэлектрической установки [7].

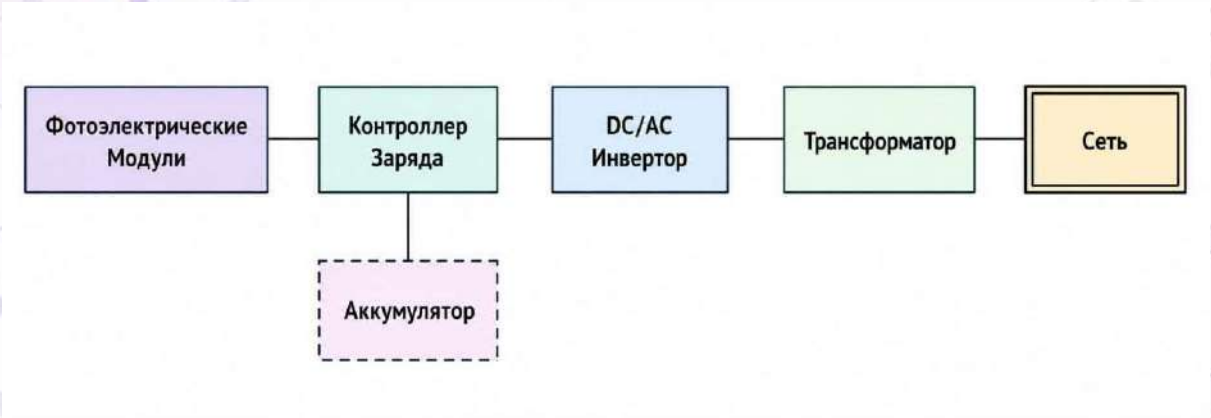


Рис. 2. Основные компоненты солнечной фотоэлектрической установки.

Мощность инвертора (кВА) может быть определена на основе параметров индуктивной нагрузки, прочих нагрузок и коэффициента мощности системы по Equation (13) [8]. С ростом проникновения распределенных фотоэлектрических систем требования сетевых кодов (СК) становятся все более строгими, включая обязательное прохождение через неисправности (ПВЭ) [9]. ПВЭ требует, чтобы возобновляемые станции действовали подобно традиционным электростанциям, оставаясь подключенными к сети во время сбоев и обеспечивая вспомогательные услуги, такие как инжекция или поглощение реактивного тока, для поддержания стабильности напряжения и сети [9]. Проблемы, возникающие при интеграции, такие как колебания напряжения и гармонические искажения, требуют внедрения передовых стратегий управления, включая управление активной и реактивной мощностью (P-Q control) и использование систем хранения энергии для сглаживания выходной мощности [3]. Дальнейшее развитие распределенных систем неразрывно связано с концепцией «умных сетей» (smart grids), которые позволяют использовать расширенные функции инверторов, такие как регулирование напряжения и прохождение через частотные возмущения, для обеспечения надежного управления сетью [2].

Категоризация систем по масштабу и установленной мощности

Классификация систем распределенной генерации (РГ) варьируется в зависимости от региональных регуляторных норм и стандартов различных организаций. Микрогенерация, как правило, охватывает бытовые установки, ориентированные на самопотребление, которые, согласно стандартам IEEE, могут иметь установленную мощность ≤ 10 кВт и

ISSN 3030-3907

интегрироваться в любой точке энергосистемы [3]. В то же время такие организации, как AEMO, устанавливают порог для подобных систем на уровне ≤ 30 кВт [3]. Малая генерация включает коммерческие объекты и малые предприятия; в некоторых юрисдикциях, таких как Новая Зеландия, к этой категории относятся установки мощностью до 5 МВт [3]. Средняя генерация представлена локальными солнечными парками, интегрированными в распределительные сети. В технической литературе под «промышленным масштабом» (utility-scale) обычно понимаются реализации мощностью свыше 5 МВт, которые подключаются к магистральным энергосистемам [7].

Таблица 3.

Сравнительная классификация распределённой генерации (РГ) в различных странах и международных организациях [3].

Страны и организации	Мощность распределённой генерации	Местоположение распределённой генерации
В Новой Зеландии	< 5 МВт	-
В Швеции	≤ 1.5 МВт	-
Австралийский оператор энергетического рынка	≤ 30 кВт	-
Международный совет по большим электроэнергетическим системам	< 100 МВт	Распределительные центры
Болгарский энергетический холдинг	< 5 МВт	Распределительные центры
Институт исследования электроэнергетики	≤ 50 кВт	Подстанции среднего напряжения (СН) и распределительные центры
Энергетические рынки Уэльса и Англии	< 100 МВт	-
Эстонский энергетический рынок	< 50 МВт	Распределительные центры
Институт инженеров по электротехнике и электронике	≤ 10 кВт	Интеграция в любой точке электрической сети

Уровни напряжения и точки общего присоединения (PCC)

ISSN 3030-3907

Выбор точки входа в энергосистему, часто называемой точкой общего присоединения (PCC) или точкой соединения (PoC), определяет технические требования к ФЭС [9]. PCC определяется как интерфейс, в котором распределенный ресурс подключается к общественной распределительной сети [10]. Малые системы мощностью до 30 кВт, как правило, подключаются к сетям низкого напряжения (НН, 0.4 кВ) без необходимости сложной верификации [7]. Для средних ФЭС мощностью от 0.15 до 20 МВт стандартом является подключение к сетям среднего напряжения (СН, 6–35 кВ), что требует установки комплектных трансформаторных подстанций [7]. Современные макеты энергосистем предусматривают двунаправленные потоки мощности, что позволяет энергии возвращаться от потребителя в сеть Рис. 3. [5].

Важным условием эксплуатации является соблюдение параметров повторного включения и синхронизации, чтобы избежать повреждения оборудования [10].

Таблица 4.

Общие правила выбора уровня напряжения точки подключения (POI) [7].

Номинальная мощность генерирующей установки	Уровень напряжения подключения к сети
До 30 кВт	Сеть низкого напряжения без проверки
От 30 до 200 кВт	Сеть низкого или среднего напряжения
От 0,15 до 20 МВт	Сеть среднего напряжения
От 15 до 80 МВт	Сеть высокого напряжения
От 80 до 400 МВт	Сеть сверхвысокого напряжения

ISSN 3030-3907

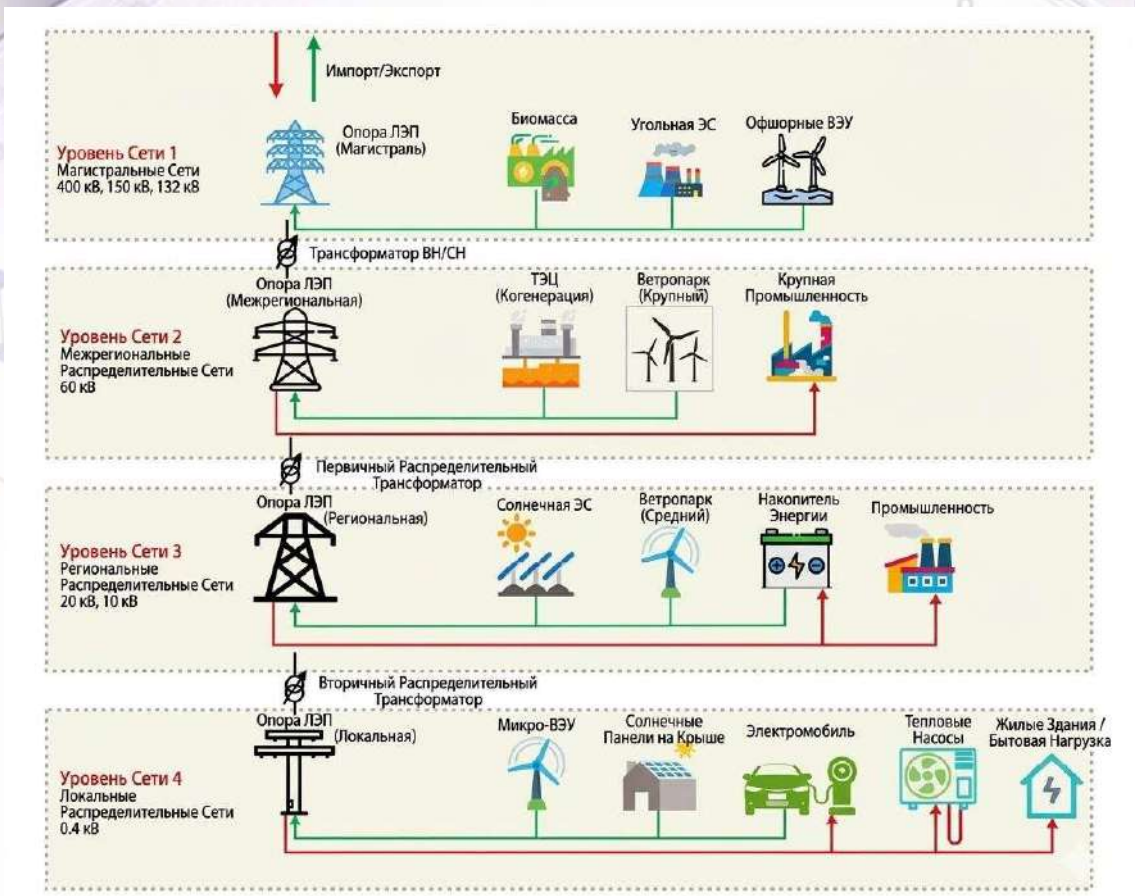


Рис. 3. Структурная схема современной электроэнергетической системы с указанием уровней напряжения в передающих и распределительных сетях.

Влияние топологии инверторного оборудования на взаимодействие с сетью

Инвертор является одним из ключевых элементов фотоэлектрической системы (ФЭС), выполняющим функции преобразования постоянного тока (DC), вырабатываемого солнечными модулями, в переменный ток (AC), совместимый с параметрами электрической сети. Кроме преобразования энергии, инвертор обеспечивает синхронизацию ФЭС с сетью по частоте, напряжению и фазе, а также реализует функции мониторинга, защиты и управления режимами работы системы [7]. Благодаря этим функциям инвертор часто рассматривается как центральный управляющий элемент или «интеллектуальное ядро» фотоэлектрической установки. В распределённых фотоэлектрических системах малой и средней мощности наиболее широко применяются стринговые инверторы, обычно используемые в установках мощностью до 10–20 кВт. Их преимуществами являются сравнительно простая архитектура, высокая надёжность и возможность независимого управления отдельными группами фотоэлектрических модулей. Для крупных солнечных электростанций,

ISSN 3030-3907

напротив, преимущественно используются централизованные инверторы мощностью 500–800 кВт и выше, обеспечивающие расширенные возможности управления, централизованный контроль параметров сети и более эффективное взаимодействие с энергосистемой [7]. Современное развитие инверторных технологий связано с внедрением интеллектуальных инверторов (Smart Inverter), которые помимо базового преобразования энергии способны выполнять функции поддержки электрической сети. Такие инверторы обеспечивают регулирование напряжения и частоты, управление коэффициентом мощности, компенсацию реактивной мощности, а также повышение устойчивости сети при высоком уровне интеграции возобновляемых источников энергии [11]. Использование Smart Inverter рассматривается как один из важнейших факторов повышения гибкости и надёжности современных распределённых энергосистем. С конструктивной точки зрения инверторы подразделяются на трансформаторные и бестрансформаторные (рис. 4). Трансформаторные инверторы обеспечивают гальваническую развязку между фотоэлектрической системой и сетью, что повышает уровень электрической безопасности и снижает риск возникновения токов утечки. Однако наличие трансформатора увеличивает массу и габариты оборудования, а также приводит к дополнительным энергетическим потерям. Бестрансформаторные инверторы отличаются более компактной конструкцией, меньшей стоимостью и высоким коэффициентом полезного действия, что делает их особенно востребованными в современных фотоэлектрических системах. Вместе с тем их применение требует использования сложных схем управления и фильтрации для подавления токов утечки и обеспечения соответствия требованиям по качеству электроэнергии [5].

ISSN 3030-3907

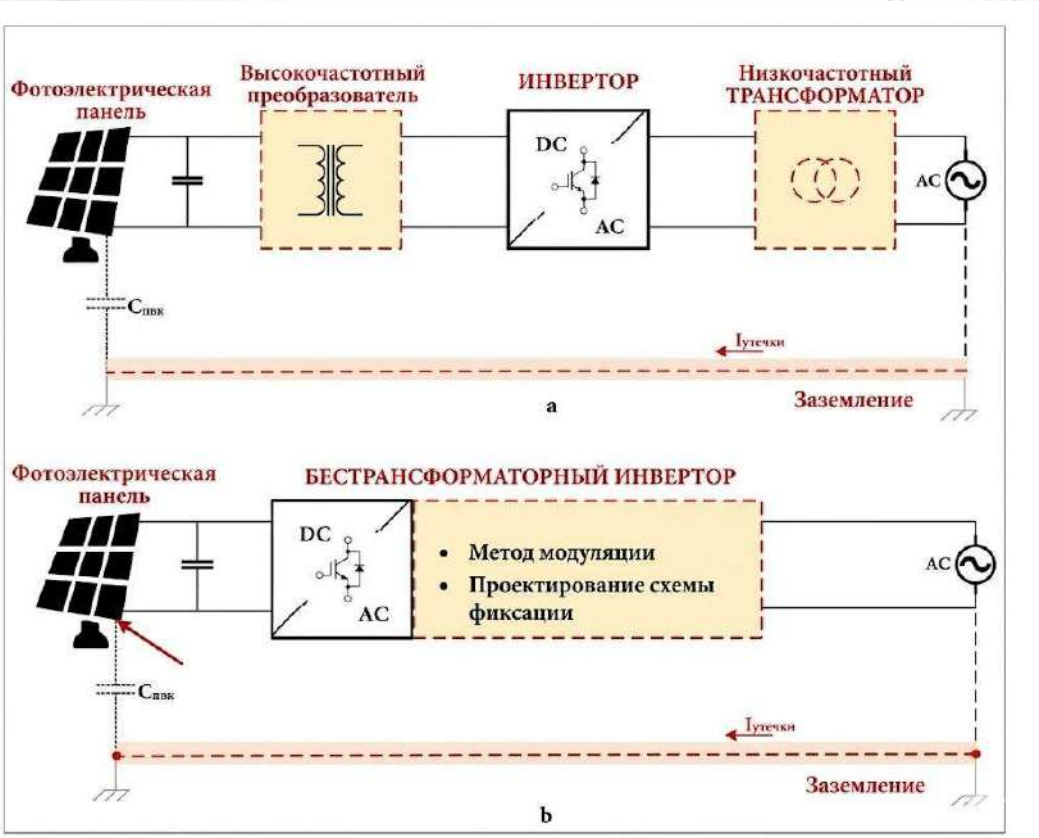


Рис. 4. Схематическая диаграмма инверторной системы фотоэлектрической станции, подключённой к электрической сети.

Для повышения стабильности применяются продвинутые алгоритмы, такие как синхронвертеры, которые эмулируют поведение синхронных генераторов для контроля частоты [12].

Технические требования и ограничения при сетевой интеграции

Интеграция ФЭС меняет режим работы фидера, что требует анализа его пропускной способности. Критическими факторами здесь выступают нарушения уровней напряжения на фидере и термическая перегрузка линий [4]. Инверторные установки могут ухудшать качество электроэнергии, внося гармонические искажения, которые измеряются общим коэффициентом нелинейных искажений (THD), лимитируемым стандартами IEEE на уровне 5% [9]. Однофазные установки, неравномерно распределенные по фазам в трехфазных четырехпроводных сетях, вызывают значительный перекос фаз [13]. Кроме того, ФЭС должны обладать способностью прохождения через провалы напряжения (LVRT), чтобы предотвратить каскадные отключения при сетевых авариях [9]. Двустороннее протекание мощности существенно усложняет работу релейной защиты и автоматики (РЗА), затрудняя обнаружение повреждений и требуя пересмотра принципов селективности [14].

ISSN 3030-3907

Таблица 5.

Список сокращений		List of Abbreviations	
ВИЭ -	Возобновляемые источники энергии	RES -	Renewable Energy Sources
МЭА -	Международное энергетическое агентство	IEA -	International Energy Agency
РГ -	Распределенная генерация	DG -	Distributed Generation
ИС -	Интеллектуальные сети	SGs -	Smart Grids
МС -	Микросети	MGs -	Microgrids
ПСНЭ -	Передовые системы накопления энергии	AESSs -	Advanced Energy Storage Systems
ИИ -	Искусственный интеллект	AI -	Artificial Intelligence
РЭР -	Распределенные энергетические ресурсы	DER -	Distributed Energy Resources
REGs -	Генераторы на основе ВИЭ	REGs -	Renewable Energy Generators
ФЭС -	Фотоэлектрические системы	PV -	Photovoltaic Systems
ВТ -	Ветряные турбины	WT -	Wind Turbines
ТЭ -	Топливные элементы	FC -	Fuel Cells
РЭС -	Распределенные энергетические системы	DES -	Distributed Energy Systems
СХЭ -	Система хранения энергии	ESS -	Energy Storage System
ТОТЭ -	Твердооксидные топливные элементы	SOFC -	Solid Oxide Fuel Cells
ПОМТЭ -	Топливные элементы с протонно-обменной мембраной	PEMFC -	Proton Exchange Membrane Fuel Cells
ЭЭС -	Электроэнергетическая система	PS -	Power System
РС -	Распределительная сеть	DN -	Distribution Network
ССНР -	Комбинированная система холодоснабжения,	CCHP -	Combined Cooling, Heating, and Power

ISSN 3030-3907

	теплоснабжения и электроснабжения		
ПВЭ -	Переменная возобновляемая энергия	VRE -	Variable Renewable Energy
РФЭС -	Распределенные фотоэлектрические системы	DPVS -	Distributed Photovoltaic Systems
СК -	Сетевые коды	GC -	Grid Codes
DC-	Постоянный ток	DC -	Direct Current
AC -	Переменный ток	AC -	Alternating Current
THD -	Коэффициент нелинейных искажений	THD -	Total Harmonic Distortion
LVRT -	Прохождение через провалы напряжения	LVRT -	Low Voltage Ride-Through
РЗА -	Релейная защита и автоматика	PAR -	Protection and Automation Relay

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Классификация распределённых фотоэлектрических систем и определение уровней их интеграции в электрические сети являются важными элементами эффективного развития современной энергетической инфраструктуры. Рост внедрения возобновляемых источников энергии, особенно солнечных фотоэлектрических систем, требует системного подхода к их подключению и управлению в распределительных сетях.

Проведённый анализ показывает, что распределённые энергетические ресурсы могут классифицироваться по различным критериям, включая установленную мощность, масштаб применения, тип подключения к сети и уровень напряжения. Малые фотоэлектрические установки, как правило, подключаются к сетям низкого напряжения и ориентированы на локальное потребление энергии, тогда как более крупные станции интегрируются в сети среднего и высокого напряжения и могут обеспечивать значительный вклад в генерацию электроэнергии.

Особое значение при интеграции фотоэлектрических систем имеет выбор точки общего присоединения и соответствующего уровня напряжения, поскольку эти параметры определяют требования к оборудованию, системам защиты и режимам работы энергосистемы. Существенную роль в обеспечении стабильности сети играет инверторное оборудование, которое выполняет функции преобразования энергии и управления параметрами генерации.

ISSN 3030-3907

Также установлено, что увеличение доли распределённой генерации приводит к возникновению ряда технических проблем, включая колебания напряжения, гармонические искажения, перекос фаз и сложности в работе релейной защиты. Решение этих задач требует применения современных технологий управления, интеллектуальных инверторов и систем накопления энергии.

В целом дальнейшее развитие распределённых фотоэлектрических систем будет тесно связано с внедрением концепции интеллектуальных электрических сетей, совершенствованием нормативно-технических требований и развитием методов управления энергосистемами, что позволит обеспечить надёжную и устойчивую интеграцию возобновляемых источников энергии в электрические сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cavus, M. Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Transformation and Integration. Electronics 2025, 14, 1159. doi.org/10.3390/electronics 14061159.
2. International Energy Agency (IEA). Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources: Power system opportunities and best practices. Website: www.iea.org Contact information: www.iea.org/about/contact Typeset in France by IEA - May 2022.
3. Tiku Fidelis Etanya, Pierre Tsafack, Divine Khan Ngwashi. Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. Energy Reports 13 (2025) 3181-3203. doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050.
4. Forson Peprah, Samuel Gyamfi, Mark Amo-Boateng, Eric Effah-Donyina. Impact assessment of grid tied rooftop PV systems on LV distribution network. Scientific African 16 (2022) e01172. doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01172.
5. Rajendran G, Raute R, Caruana C. A Comprehensive Review of Solar PV Integration with Smart-Grids: Challenges, Standards, and Grid Codes. Energies 2025, 18, 2221. doi.org/10.3390/en18092221.
6. Cheng Q., Zhang Z.,Wang Y., Zhang L., “A Review of Distributed Energy Systems: Technologies, Classification, and Applications,” *Sustainability*, vol. 17, no. 1, p. 1346, 2025, doi:10.3390/su17041346.
7. ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) 2019. “Grid Integration Requirements for Variable Renewable Energy.” ESMAP Technical Guide, World Bank, Washington, DC.
8. Akinyele D, Amole A, Olabode E, Olusesi A, Ajewole T. Simulation and Analysis Approaches to Microgrid Systems Design: Emerging Trends and

ISSN 3030-3907

Sustainability Framework Application. Sustainability 2021, 13, 11299. https://doi.org/10.3390/su132011299

9. Ali Q. Al-Shetwi, Muhamad Zahim Sujod. Grid-connected photovoltaic power plants: A review of the recent integration requirements in modern grid codes. Wiley ENERGY RESEARCH DOI: 10.1002/er.3983.

10. Rebollal D, Carpintero-Renteria M, Santos-Martin D, Chinchilla M. Microgrid and Distributed Energy Resources Standards and Guidelines Review: Grid Connection and Operation Technical Requirements. Energies 2021, 14, 523. https:// doi.org/10.3390/en14030523

11. Giuseppe Marco Tina, Dario Garozzo, Pierluigi Siano. Scheduling of PV inverter reactive power set-point and battery charge/ discharge profile for voltage regulation in low voltage networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Volume 107, May 2019, Pages 131-139. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.009.

12. Ndirangu J.G, Nderu J.N, Muhia A.M. Power Quality Challenges and Mitigation Measures in Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. Department of Electrical and Electronic Engineering Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology Nairobi, Kenya. julzndirangu@gmail.com

13. Mehdi Zeraati, Mohamad Esmail, Hamedani Golshan, and Josep M. Guerrero. Voltage Quality Improvement in Low Voltage Distribution Networks Using Reactive Power Capability of Single-Phase PV Inverters. doi10.1109/TSG.2018.2874381.

14. System Costs of Balancing and Operating Electricity. Understanding the Full System Costs of the Electricity System. Quantified Carbon.