



Анализ потребления электроэнергии и стратегии интеграции солнечной фотоэлектрической системы, подключённой к электрической сети для повышения её эффективности, на примере Республики Нигер

О.В. Косарева-Володько^{1✉}, А.С.М. Кабиру², А. Тинга³

^{1,2}Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

³Университет Абду Мумуни, Ниамей, Нигер

Резюме. Цель – провести анализ потребления электроэнергии и стратегии интеграции солнечной фотоэлектрической системы в электрическую сеть с целью повышения ее эффективности и уровня электрификации сельских регионов в Нигере. Анализ потребления электроэнергии в Нигере с 2010 по 2022 год осуществляли с помощью программы «Система энергетической информации SIE-UEMOA». Прогнозирование количества энергии, вырабатываемой фотоэлектрическими установками мощностью 11 МВт, подключенными к электрической сети в Нигере во всех 8 регионах страны, проводили с одновременным использованием трех различных программ: PVsystem, PVGIS и PVWatts. При прогнозе были учтены все параметры (используемая технология, потери и выбор типа системы), влияющие на выработку энергии системой. С помощью программного обеспечения PVsystem создана модель изучаемой системы. Согласно проведенному моделированию системы установлено, что подключение 8 фотоэлектрических установок к электрической сети в Нигере позволит увеличить среднегодовую выработку электроэнергии на 130,91784 ГВтч и сократить на 5,99% импорт электроэнергии из соседней страны Нигерии. Выяснилось, что предложенное подключение сможет увеличить национальный уровень электрификации еще на 1,80% (на 21,80% по сравнению с 20% в 2022 г.) и поможет избежать выбросов CO₂. Результаты моделирования, полученные с помощью программного обеспечения PVSystem, показали, что количество предотвращенных выбросов CO₂ составляет 3763,016 т в одном регионе, а установка этой системы в 8 регионах страны даст возможность сократить выбросы в 8 раз. Установлено, что оптимизация угла наклона при проектировании системы также позволяет генерировать больше энергии. Таким образом, проведенный анализ подтвердил необходимость подключения дополнительных фотоэлектрических установок к электрической сети, что обеспечит повышение ее эффективности.

Ключевые слова: энергетическая информационная система SIE-UEMOA, PVSystem, PVWatts, PVGIS, интеграция солнечных фотоэлектрических систем, производство энергии, оптимизация

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности НИТУ МИСИС, Омар Иди Анго, президенту Независимого центра размышлений и гражданских действий (CIRAC -NIGER), генерал-лейтенанту Абду Сидику Исса, чрезвычайному и полномочному послу Республики Нигер в РФ, за ценные советы при подготовки рукописи.

Для цитирования: Косарева-Володько О.В., Кабиру А.С.М., Тинга А. Анализ потребления электроэнергии и стратегии интеграции солнечной фотоэлектрической системы, подключённой к электрической сети для повышения её эффективности, на примере Республики Нигер // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 1. С. 72–84. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-72-84>. EDN: DMZAJK.

POWER ENGINEERING

Original article

Analysis of power consumption and strategy for integrating a solar photovoltaic system into the electrical grid to improve its efficiency as applied to the Republic of Niger

Olga V. Kosareva-Volodko^{1✉}, Alilu Sani Maman Kabiru², Abdoulaye Tinga³

^{1,2}University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

³Abdou Moumouni University, Niamey, Niger

Abstract. The present study aims to conduct the analysis of power consumption and strategy for integrating a solar photovoltaic system into the grid to improve its efficiency and electrification level of rural regions in

the Republic of Niger. The analysis of power consumption in Niger from 2010 to 2022 was performed using the SIE-UEMOA Energy Information System software. The amount of power generated by 11 MW photovoltaic plants connected to the Niger grid in all 8 regions of the country was forecasted with three different software tools: PVsystem, PVGIS, and PVWatts. All parameters, including the used technology, losses, and system type selection, affecting the system power generation were considered in the forecast. The PVsystem software was used to create a model of the studied system. According to the system simulation, 8 photovoltaic plants connected to the electrical grid of Niger will increase the annual power generation by 130.91784 GWh and reduce the import of electricity from the neighbouring Nigeria by 5.99%. The proposed integration was found to increase the national electrification rate by another 1.80% (21.80% from 20% in 2022) and help avoid CO₂ emissions. The results of PVSystem simulation showed that prevented CO₂ emissions comprise 3763.016 t per one region: the installation of this system in 8 regions of the country would lead to 8-fold reduction in emissions. An optimization of the tilt angle in the system design can also increase power generation. Thus, the performed analysis confirmed the need to connect additional photovoltaic plants to the electrical grid of Niger in order to increase its efficiency.

Keywords: energy information system SIE-UEMOA, PVSystem, PVWatts, PVGIS, solar photovoltaic system integration, energy production, optimization

Acknowledgments. The authors express their gratitude to all members of the Department of Energy and Energy Efficiency in the Mining Industry of the University of Science and Technology MISIS, as well as to Omar Idi Ango, the President of the Independent Center for Reflection and Civic Action (CIRAC -NIGER), and Lieutenant General Abdou Sidik Issa, the Ambassador Extraordinary and Plenipotentiary of the Republic of Niger to the Russian Federation they express their gratitude for valuable advice during the preparation of the manuscript.

For citation: Kosareva-Volodko O.V., Kabiru A.S.M., Tinga A. Analysis of power consumption and strategy for integrating a solar photovoltaic system into the electrical grid to improve its efficiency as applied to the Republic of Niger. *iPolytech Journal*. 2026;30(1):72-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-72-84>. EDN: DMZAJK.

ВВЕДЕНИЕ

При быстром росте мирового спроса на энергию постоянное использование возобновляемых источников энергии (особенно фотоэлектрической солнечной энергии) способствует их технической и экономической интеграции в электросети. В контексте энергетического перехода фотоэлектрическая солнечная энергия является идеальным решением для обеспечения глобальной энергетической безопасности и защиты окружающей среды от воздействия парниковых газов [1]. Из всех технологий производства возобновляемой энергии технология производства фотоэлектрической считается наи-

более широко используемой и перспективной. Выбор этой технологии обусловлен ее надежностью, быстрым технологическим развитием в области исследований и низкими затратами на техническое обслуживание [2, 3]. Кроме того, в глобальном масштабе установленная мощность подключенных к сети солнечных фотоэлектрических установок растет экспоненциально: в 2020 году было установлено около 126 ГВт новой мощности, согласно отчету комиссии агентства Solar Power Europe в 2024 г. На рис. 1 показана динамика установленной мощности солнечных фотоэлектрических установок во всем мире с 2010 по 2022 год [4].

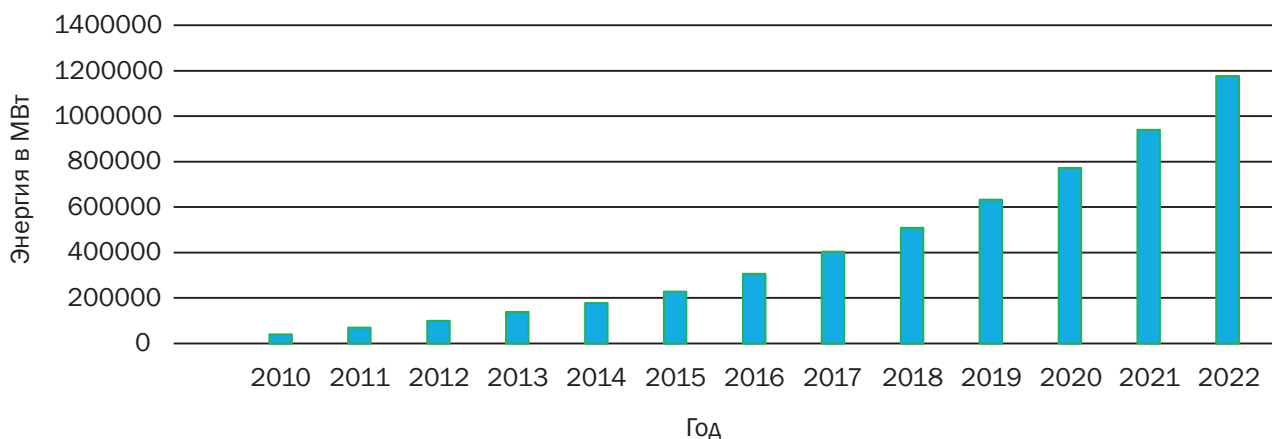


Рис. 1. Динамика мировой мощности солнечной фотоэлектрической энергетики с 2010 по 2022 год
Fig. 1. Dynamics of global solar photovoltaic power generation capacity from 2010 to 2022

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НИГЕРЕ

Среди стран Западной Африки, где ежедневное количество солнечного света составляет от 5 до 7 кВт·ч/м²/день, Нигер является одной из наименее электрифицированных стран в Африке. Данная ситуация обусловлена такими проблемами страны, как отсутствие безопасности, бедность, коррупция, климат и большая территория, которые препятствуют развитию электроэнергетического сектора Нигера. При уровне доступа к электроэнергии в 20% в 2022 г. большинство домохозяйств, подключенных к национальной электросети, расположены в столице Ниамее и регионах Доссо и Тиллабери. Согласно исследованию 2020 г., проведенному Центром энергетики и климата IFRI, конечное потребление электроэнергии в Нигере оценивается в 1450 ГВт/ч, из которых более 75%, оцениваемых в 1107 ГВт/ч, импортируется из Нигерии [5]. Что касается местного или национального производства, то оно обеспечивается предприятиями NIGELEC с 269 ГВт/ч и SONICHAR с 64,5 ГВт/ч с середины 2021 г. в рамках 15-летнего государственно-частного партнерства Build, Own, Operate, Transfer с тепловыми электростанциями мавританской компании Istithmar West Africa, которые производят и продают электроэнергию NIGELEC.

Соглашение между государством Нигер и Istithmar включает строительство тепловой электростанции Goudel мощностью 89 МВт и тепловой электростанции Zinder мощностью 22 МВт, которые уже введены в эксплуатацию. Несмотря на эти проблемы, сектор электроэнергетики Нигера в последние годы вырос, в частности, благодаря строительству государством Нигер (при поддержке технических и финансовых партнеров) нескольких солнечных электростанций, включая строительство солнечной электростанции GOROU BANDA 1 мощностью 30 МВт, солнечной электростанции Malbaza мощностью 7 МВт, которая была единственной действующей фотоэлектрической электростанцией в 2020 г. и поставляла 11 ГВт/ч.

В Нигере ведется строительство гибридной электростанции для снабжения электроэнергией г. Агадес и его окрестностей мощностью 13 МВт фотоэлектрической и 6 МВт тепловой энергии, а также мини-гибридных электро-

станций D'INGALL и DIRKOU. Большинство этих проектов финансировалось международными организациями в сотрудничестве с государством Нигер. Кроме того, NIGELC строит несколько автономных мини-дизельных электростанций в деревнях по всей стране. С быстрым ростом населения и развитием новой инфраструктуры спрос на электроэнергию будет расти очень быстро в ближайшие годы. Именно поэтому реализуются проекты по увеличению дополнительных производственных мощностей. К ним относится гидроэлектростанция Кандаджи мощностью 130 МВт, которая, как ожидается, будет введена в эксплуатацию около 2027–2028 гг. Также имеется угольный комплекс Салкадамна, где правительство Нигера подписало партнерство с компанией из США на строительство тепловой электростанции мощностью 600 МВт, что сделает Нигер экспортером электроэнергии в субрегионе Западной Африки [5]. Эксплуатация этих двух крупных проектов поможет стать Нигер энергетически независимой страной, что будет способствовать ее социально-экономическому развитию.

ПЕРВИЧНОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ

Общее первичное энергоснабжение страны представляет собой совокупное количество энергии, состоящее из импортируемой, экспортируемой энергии, а также энергии местного производства (из природных ресурсов) [6]. Тогда первичную энергию можно определить как форму энергии, полученной из возобновляемых и невозобновляемых источников энергии, которая не подверглась никакому искусственному преобразованию. Согласно Международному энергетическому агентству, методология баланса первичного энергоснабжения основана на количестве энергетических товаров и общепринятой единице учета – тонне нефтяного эквивалента, которая определяется как 107 ккал (41,868 ГДж) [6]. Формула для расчета общего первичного энергоснабжения страны выглядит следующим образом:

$$PES = [EP + \dots (EX - Ib) \pm SC], \quad (1)$$

где PES – Primary Energy Supply – первичное энергоснабжение;

EP – Energy Production – производство энергии;

EI – Energy Imports – импорт энергии;

Ib – International bunkers – международное бункерное топливо (потребляемое международным морским и воздушным транспортом, учитывается отдельно от всех иных выбросов парниковых газов);

SC – Stock Changes – изменения запасов.

ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТУПА К ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УСЛУГАМ

Рассматриваемое электричество как существенный фактор экономического развития страны сегодня играет ключевую роль в уровне жизни человека. Для измерения надежности системы электроснабжения часто используются два показателя: средний индекс продолжительности прерываний электроснабжения (SAIDI) и средний индекс частоты прерываний электроснабжения (SAIFI). Несмотря на весь энергетический потенциал, который содержат недра Нигера, эта страна имеет самый низкий уровень доступа к электричеству в субрегионе.

ОПИСАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ SIE-UEMOA

Рассматриваемая как инструмент принятия решений энергетическая информационная система SIE-UEMOA позволяет разрабатывать, контролировать и управлять структурированной, последовательной, эффективной и действенной энергетической политикой для страны – члена UEMOA. Помимо теоретической, технической и социально-экономической информации, система включает в себя другие важные данные,

такие как энергетические ресурсы и потенциал, используемые технологии и их эффективность, а также информацию об энергетическом секторе. Упрощенная структура этой системы представлена на рис. 2.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PVSYSYSTEM

PVSystem – это программное обеспечение для определения размеров подключенных к сети автономных солнечных установок и солнечных насосных систем. Система предоставляет различную информацию о производстве энергии, освещенности, стоимости установки, требуемой площади или годовом производстве энергии [7–10]. Упрощенная схема процесса обработки данных PVSystem представлена на рис. 3.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PVGIS И PVWATTS

В целях оценки производства энергии любой фотоэлектрической системой Институт энергетики и транспорта разработал онлайн программное обеспечение PVGIS [11, 12], а National Renewable Energy Laboratory (Национальная лаборатория возобновляемой энергии) разработала онлайн программное обеспечение PVWatts [13, 14]. PVGIS предоставляет глобальную информацию о рассеянном и лучевом облучении любой поверхности, расположенной в Европе, Африке и Юго-Западной Азии [14, 15]. Программное обеспечение PVGIS содержит данные о солнечной радиации, измеренные на земле и полученные со спутника. Однако данные о солнечной радиации для африканского, европейского и азиатского континентов по-

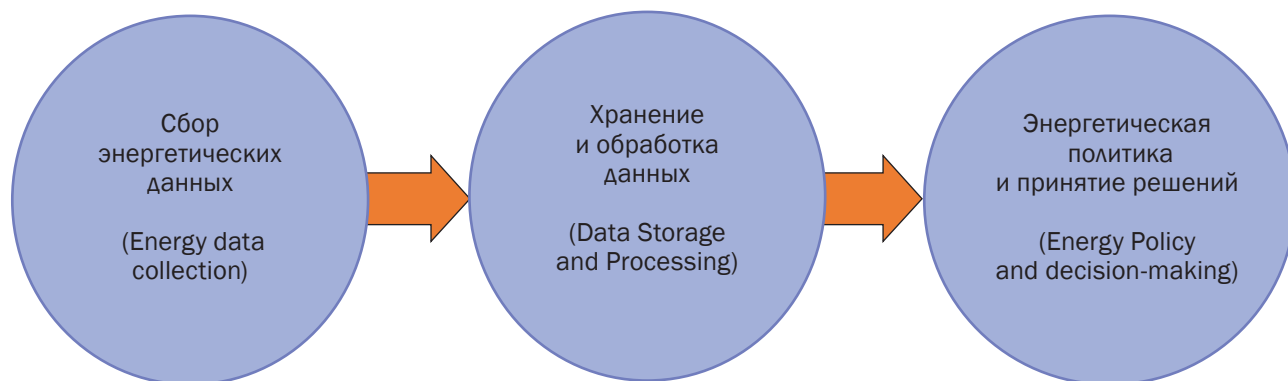


Рис. 2. Упрощенная структура энергетической информационной системы SIE-UEMOA
Fig. 2. Simplified structure of the SIE-UEMOA energy information system [8]

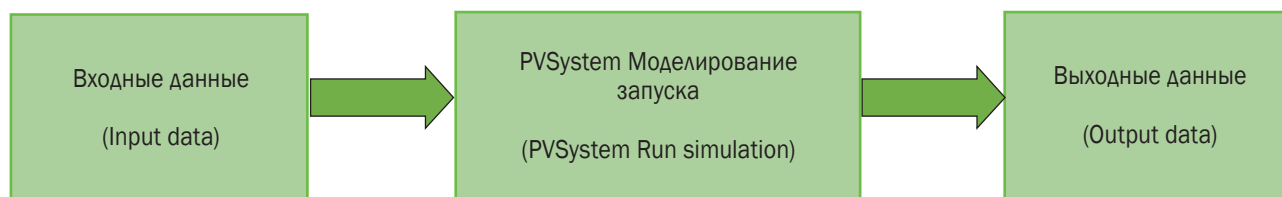


Рис. 3. Упрощенная схема процесса PVSystem
Fig. 3. Simplified PVSystem process diagram

ступают из двух баз данных PVGIS-CMSAF и PVGIS-SARAH [15, 16]. В этих работах использовалась база данных PVGIS-SARAH3, реализованная в последней версии PVGIS5.2. В отличие от модели PVGIS, модель PVWatts – эта программа, которая моделирует данные в часах в течение одного года как для солнечного излучения, так и для температуры окружающей среды при средней скорости ветра 10 м/с. На основе типичных метеорологических данных за год, после определения места, программное обеспечение PVWatts определяет для каждого часа два компонента фотоэлектрического модуля, а именно температуру и падающее солнечное излучение [15–17].

МЕТОДОЛОГИЯ

Для выполнения этой работы был применен метод, который заключается в использовании энергетической информационной

системы SIE-UEMOA для анализа потребления электроэнергии в Нигере с 2010 по 2022 год и предлагается с помощью трех программ – PVSystem, PVGIS и PVWatts – разработать стратегию оценки и интеграции количества энергии, вырабатываемой фотоэлектрической солнечной электростанцией мощностью 11 МВт, которая уже существует [18]. Стоит отметить, что ранее моделирование с использованием трех этих программ одновременно не проводилось. Данный метод является совершенно новым решением комплексной проблемы с использованием большего количества исходных данных. Выбор одинаковой мощности установки во всех восьми регионах обусловлен необходимостью приблизительно знать общее годовое количество энергии, вырабатываемой электростанциями, которое будет поступать в национальную электросеть. Входные параметры и спецификация для моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Входные параметры и спецификация для моделирования
Table 1. Input parameters and specification for simulation

Место	Название программного обеспечения		
Ниамей/Нигер	PV Watts	PVGIS	PVSyst
Широта	5,6° с.ш.	13,51° с.ш.	13,53° с.ш.
Долгота	0,17° в.д.	2,16° в.д.	2,16° в.д.
Источник использованных метеорологических данных	(INTL) ACCRA/КОТОКА INTL, GHANA (Международный аэропорт Аккра Котока, Гана)	PVGIS-SARAH 2 (База данных о солнечной радиации)	Meteonorm 8,1 (2010–2021), Sat = 100% (Международная климатическая база данных)
Фотоэлектрическая технология	Стандартная	Кристаллический кремний	Монокристаллический кремний
Установленная мощность фотоэлектрических установок P, кВтп*	11000	11000	11000
Потери фотоэлектрических систем	14,08%	14%	20%
Затенение	Не определено	Не определено	Не определено
Собственное потребление (self-consumption)	Не определено	Не определено	Не определено
3D сцена	Не определена	Не определена	Не определена

Примечание. *кВтп – киловатт-пик означает максимальную мощность фотоэлектрической системы при стандартных условиях: $T = 25^{\circ}\text{C}$, $I_r = 1000 \text{ Вт/м}^2$.

Чтобы ввести данные в программное обеспечение SIE UEMOA, нужно войти в базу данных системы, выбрать страну (в данном случае Нигер) и необходимые показатели на основе прошедших лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ SIE-UEMOA

Результаты, полученные с помощью энергетической информационной системы, показаны на рис. 4–7.

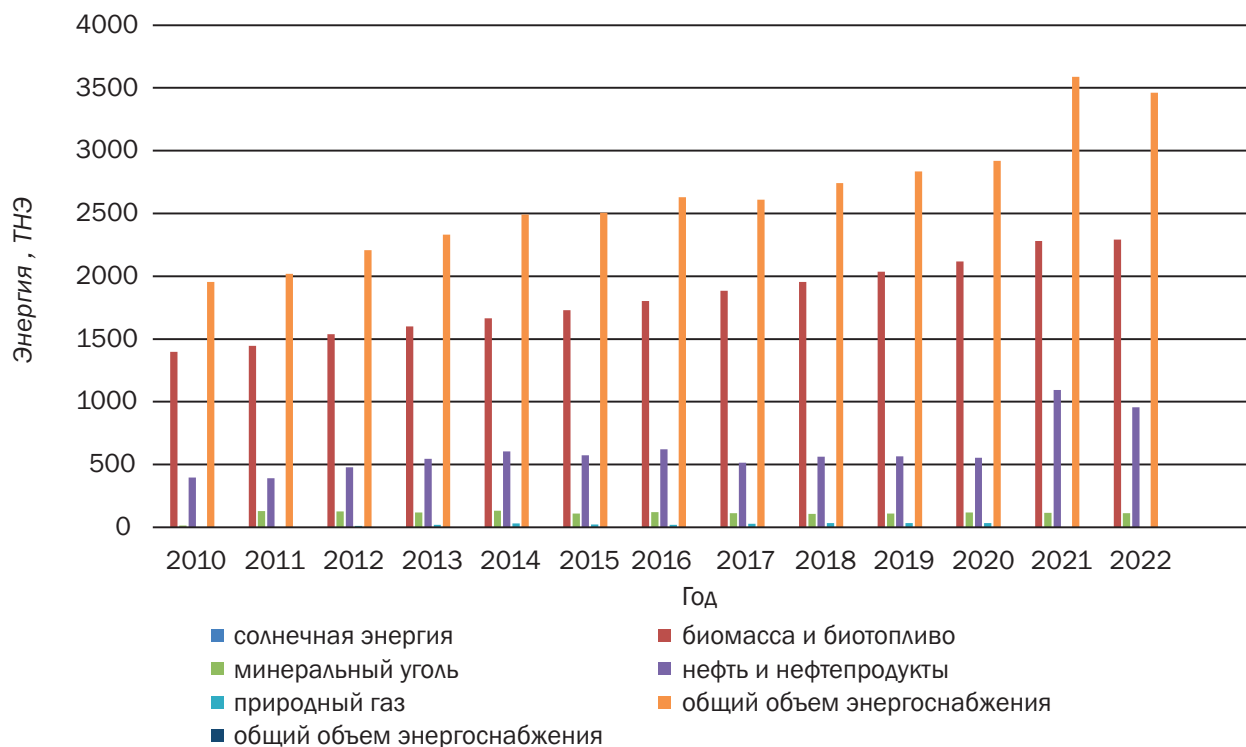


Рис. 4. Общее потребление первичной энергии по источникам в Нигере с 2010 по 2022 год
Fig. 4. Total primary energy consumption by sources in Niger from 2010 to 2022

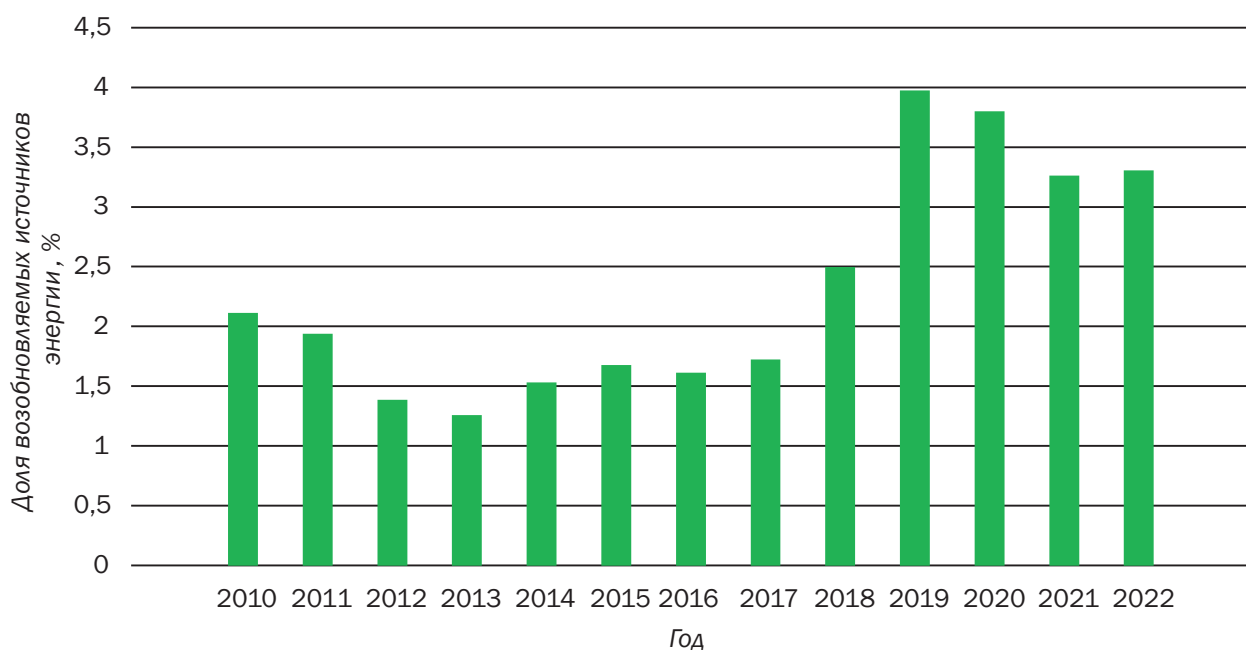


Рис. 5. Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии в Нигере с 2010 по 2022 год
Fig. 5. Share of renewable energy sources in electricity generation in Niger from 2010 to 2022

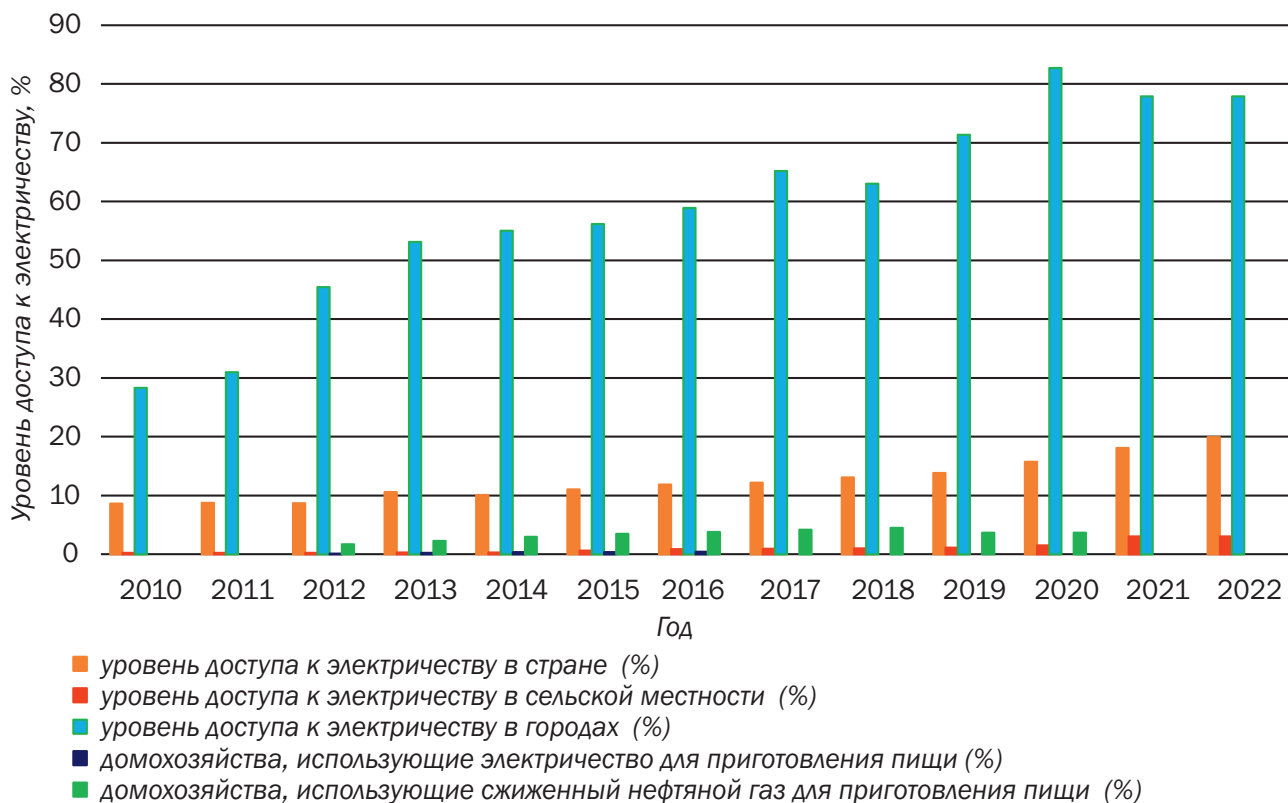


Рис. 6. Уровень доступа к электричеству в Нигере с 2010 по 2022 год

Fig. 6. Level of electricity access in Niger from 2010 to 2022

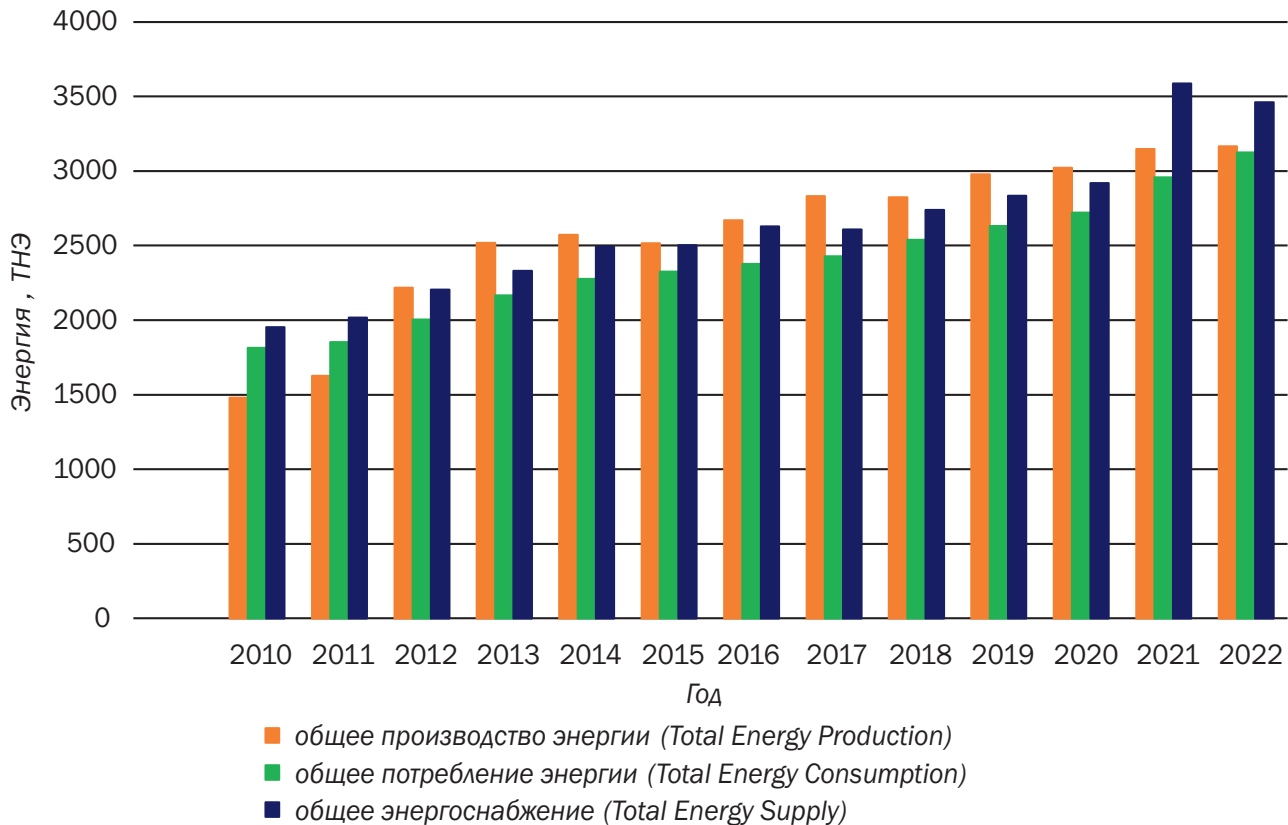


Рис. 7. Общее потребление энергии в Нигере с 2010 по 2022 год

Fig. 7. Total energy consumption in Niger from 2010 to 2022

Анализ рис. 4 показывает, что использование солнечной энергии очень незначительно по сравнению с другими источниками, с одной стороны, а с другой – общее потребление энергии увеличивается с каждым годом. Это незначительное использование солнечной энергии можно объяснить либо плохой политикой, либо нежеланием правительства способствовать интеграции солнечной энергии. Из рис. 5 видно, что в 2019 и 2020 гг. был зафиксирован высокий уровень использования возобновляемых источников энергии, соответственно, 3,97 и 3,8%, а анализ рис. 6 показывает, что самый высокий уровень доступа к электроэнергии в Нигере в городских районах составляет 82,72% в 2020 г., а в сельских районах – 3,04% в 2021 г. С 2010 по 2022 год производство электроэнергии превзошло потребление, что видно из рис. 7. С 2019 г. производство энергии выше, чем в предыдущие годы. Это объясняется интеграцией возобновляемых источников энергии в производство электроэнергии. Из вышеперечисленного можно сделать вывод, что интеграция солнечной энергии увеличит эффективное производство электроэнергии и улучшает эффективность национальной электросети Нигера.

СТРАТЕГИИ ИНТЕГРАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММ PVSYSYSTEM, PVGIS И PVWATTS

Стратегия, применяемая в этой работе, заключается в использовании различных конфигураций систем слежения (фиксированная система и двухкоординатная система слежения для разных углов наклона) в среде этих программ для оптимизации производства энергии [18]. Для реализации проекта подсистема мощностью 800 кВт была создана, учитывая различные потери, такие как потери в проводах (wiring losses), в массиве (array losses) и системные потери (system losses).

Эта подсистема, занимающая площадь 4223 м², состоит из фотоэлектрических модулей марки Trina Solar мощностью 385 Вт каждый и инверторов марки Delta Energy мощностью 66 кВт. Для получения мощности системы 11 МВт, которая принимается нами стандартной при проектировании в каждом из восьми регионов (для проведения сравнительного анализа), мощность этой подсистемы умножается на 14. Информация о подсистеме приведена в табл. 2, общие данные системы представлены в табл. 3.

Таблица 2. Информация о подсистеме
Table 2. Information about the subsystem

Мощность подсистемы	800 кВт
Количество панелей, подключаемых последовательно	16
Количество панелей, соединенных параллельно	130
Общее количество фотоэлектрических модулей	2080
Общее количество инверторов	19
Общая площадь подсистемы	4227м ²
Параметры модуля	
Модель панели	TSM-385 DE15H(II)
Мощность панели	385 Вт
Ток в точке максимальной мощности I_{mp} .	9,610 А
Напряжение в точке максимальной мощности V_{mp}	40,10 В
Напряжение холостого хода V_{oc}	48,50 В
Ток короткого замыкания I_{sc}	10,03 А
Параметры инвертора	
Модель инвертора	Solar Inverter M80H (400VAC)
Мощность	66 кВт переменного тока
Рабочее напряжение	200–800 В
Максимальная мощность переменного тока	66 кВт
Основное напряжение (Main voltage)	400 В
Абсолютное максимальное напряжение фотоэлектрической системы (Absolute Maximum PV voltage)	1000 В

Таблица 3. Информация об общих настройках системы
Table 3. Information about the general system settings

Положение фотоэлектрических модулей	Фиксированное положение и двухосное слежение
Наклон/азимут (Tilt/Azimuth)	15°, 30°, 45° / 0°
Количество фотоэлектрических модулей	29 120
Суммарная номинальная мощность модулей, рекомендуемая программным обеспечением	11,21 МВт
Общее количество инверторов	133
Общая номинальная мощность инверторов	8778 кВт переменного тока (KWac)
Предел мощности сети (Grid power limit)	11 МВт
Общая площадь	59 175 м ²
Внешний трансформатор среднего напряжения	11,04 МВА

Результаты, полученные для трех программ после моделирования с учетом всех перечисленных параметров [18–20] (выбор типа системы и используемой технологии, изучение детальных потерь), представлены на рис. 8 и 9.

На рис. 8 показаны прогнозы ежемесячного производства энергии в зависимости от используемой технологии и системы. Эти результаты показывают, что значения, полученные с использованием программного обеспечения PVGIS, выше по сравнению с

другим программным обеспечением. Это объясняется тем, что система учитывает системные потери, а потери из-за старения фотоэлектрических модулей рекомендованы на уровне 14%, и не учитываются другие факторы, влияющие на производство, а именно снег, частичное затенение, пыль и грязь.

На рис. 9 показано годовое производство электроэнергии фотоэлектрической системой в зависимости от угла наклона фотоэлектрических панелей и используемой технологии.

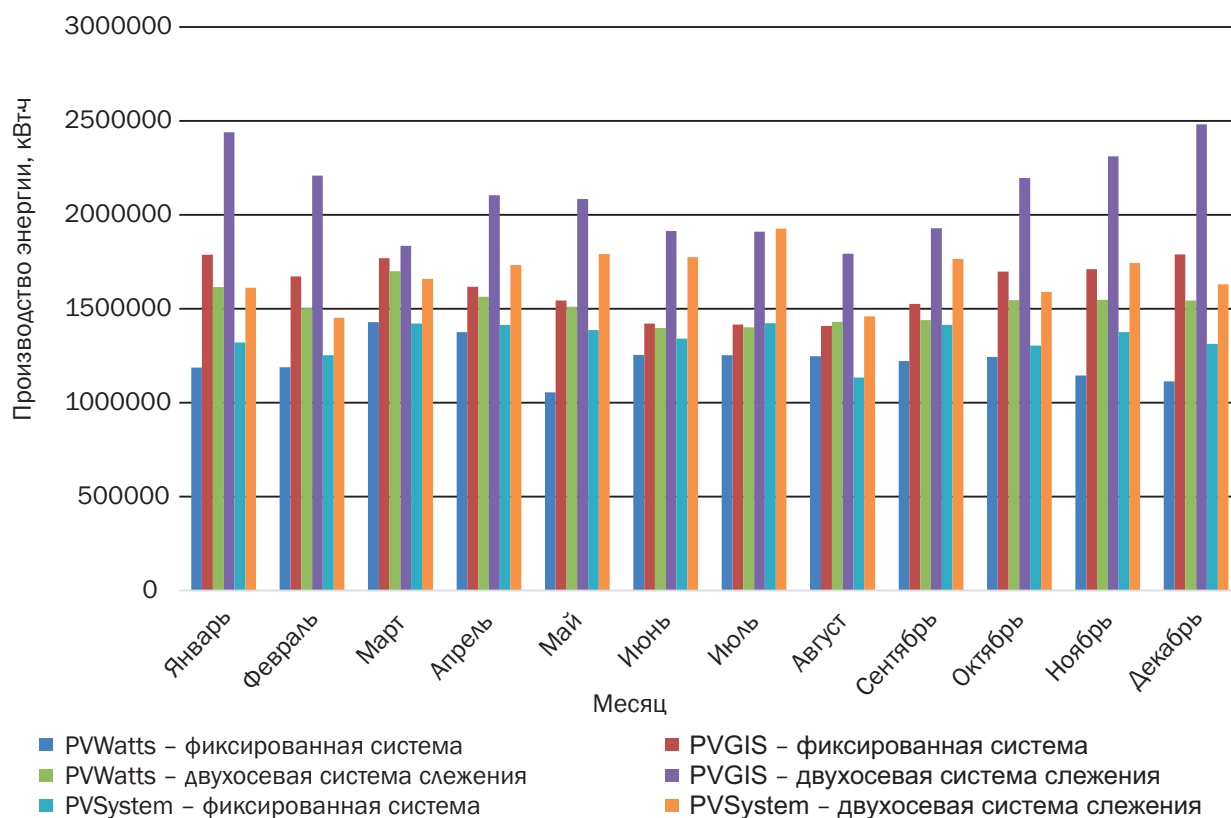
**Рис. 8.** Прогноз производства энергии при использовании различных технологий**Fig. 8.** Forecast of energy generation using various technologies



Рис. 9. Годовое производство фотоэлектрической энергии
Fig. 9. Annual photovoltaic energy production

Для угла 15° среднее значение, полученное для трех программ, использующих фиксированную систему, составляет 16881228,54 кВтч, и 21342893,7 кВтч для двухосной системы слежения.

Для угла наклона 30° среднее значение, полученное для трех программ, использующих фиксированную систему, составляет 16364731,4 кВтч, и 21342867 кВтч для двухосной системы слежения.

Для угла наклона 45° среднее значение, полученное для трех программ, использующих фиксированную систему, составляет 14286926,9 кВтч, и 21342867 кВтч для двухосной системы слежения.

Анализ полученных результатов показывает:

- для двухосной системы среднее значение вырабатываемой энергии практически не меняется при трех углах наклона (15, 30 или 45°);

- для неподвижной системы наблюдается снижение среднего значения вырабатываемой энергии при угле наклона 45°. Это снижение объясняется тем, что модули не получают достаточного количества солнечного излучения, поскольку солнечное излучение не перпендикулярно поверхности фотоэлектрических модулей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье данные о потреблении электроэнергии в Нигере с 2010 по 2022 год ана-

лизируются с использованием энергетической информационной системы SIE-UEMOA и предлагается с помощью трех программ – PVSystem, PVGIS и PVWatts – разработать стратегию оценки и интеграции количества энергии, вырабатываемой фотоэлектрической солнечной электростанцией мощностью 11 МВт, чего ранее не предлагалось. В результате этот анализ показывает, что доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии в Нигере с 2010 по 2022 год очень низкая. Самый высокий уровень доступа к электроэнергии в Нигере в городских районах составляет 82,72% в 2020 г., а в сельских районах – 3,04% в 2021 г.

Впервые данное исследование было проведено в Нигере, и полученные результаты демонстрируют, что интеграция этой моделируемой фотоэлектрической солнечной электростанции мощностью 11 МВт в восьми регионах страны позволит увеличить годовую выработку электроэнергии на 130,91784 ГВтч с сокращением на 5,99% уровня импортируемой электроэнергии из соседней страны Нигерии, обеспечивающей более 70% потребляемой в Нигере электроэнергии.

Реализация этого проекта в Нигере также позволит увеличить национальный уровень электрификации на 1,80% (на 21,80% по сравнению с 20% в 2022 г.) Результаты моделирования, полученные с помощью

программного обеспечения PVSystem, показали, что количество предотвращенных выбросов CO₂ составляет 3763,016 т в одном

регионе, а установка этой системы в 8 регионах страны даст возможность сократить выбросы в 8 раз.

Список источников

1. Iakovleva E., Guerra D., Shklyarskiy Y., Tsvetkov P. Technical and economic analysis of modernization of solar power plant: a case study from the republic of Cuba // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 822. <https://doi.org/10.3390/su14020822>. EDN: PUJRJH.
2. AL-Rousan N., Isa N.A.M., Desa M.K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 2548–2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>.
3. Elomari Yo., Norouzi M., Marín-Genescà M., Fernández A., Boer D. Integration of solar photovoltaic systems into power networks: a scientific evolution analysis // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 15. P. 9249. <https://doi.org/10.3390/su14159249>.
4. Schmela M., Hemetsberger W., Dunlop S. Solar power Europe // Global Market Outlook for Solar Power 2024-2028. Режим доступа: <https://www.pveurope.eu/markets/global-market-outlook-solar-power-2024-2028-solar-continues-its-growth-path-challenges> (дата обращения: 25.09.2025).
5. Косарева-Володько О.В., Кабиру А.С.М., Шафоростова Е.Н. Экономическая оценка фотоэлектрической системы, подключенной к электрической сети при использовании программного обеспечения PVSystem // Омский научный вестник. 2025. № 3. С. 51–59. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-195-51-59>. EDN: DVSYSG.
6. Jamasb T., Nepal R., Timilsina G.R., Toman M. Energy sector reform, economic efficiency and poverty reduction. 2014. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/366740624_Energy_Sector_Reform_Economic_Efficiency_and_Poverty_Reduction (дата обращения: 25.09.2025).
7. Houdagba P., Dabo I. Le système d'information énergétique de l'UEMOA (SIE-UEMOA) // les politiques de maîtrise de l'énergie. Режим доступа: https://www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/759_IFDD_Ficheprisme_No15_syst_information_energetique.pdf (дата обращения: 25.09.2025).
8. Sharma A., Kolhe M. Techno-economic evaluation of PV based institutional smart micro-grid under energy pricing dynamics // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 264. P. 121486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121486>.
9. Zsiborács H., Baranyai N.H., Csányi S., Vincze A., Pintér G. Economic analysis of grid-connected PV system regulations: a Hungarian case study // Electronics. 2019. Vol. 8. Iss. 2. P. 149. <https://doi.org/10.3390/electronics8020149>.
10. Longares J.M., Garcia-Jimenez A., Garcia-Polanco N. Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparison // Solar Energy. 2023. Vol. 257. P. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.005>.
11. Sancar M.R., Bayram A.B. Modeling and economic analysis of greenhouse top solar power plant with Pvsyst software // International Journal of Engineering and Innovative Research. 2023. Vol. 5. Iss. 1. P. 48–59. <https://doi.org/10.47933/ijeir.1209362>.
12. Gracia A.M., Huld T., Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces // European Union. 2013. <https://doi.org/10.2790/91554>.
13. Milosavljević, D.D., Kevkić, T.S., Jovanović S.J. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study // Open Physics. 2022. Vol. 20. Iss. 1. P. 431–451. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0042>.
14. Barhdadi A., Bennis M. PVGIS approach for assessing the performances of the first PV grid-connected power plant in Morocco // Physics and Society. arXiv: 1208.4325. 2012. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1208.4325>.
15. Psomopoulos C.S., Ioannidis G.C., Kaminaris S.D., Mardikis K.D., Katsikas N.G. A comparative evaluation of photovoltaic electricity production assessment software (PVGIS, PVWatts and RETScreen) // Environmental Processes. 2015. Vol. 2. P. 175–189. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0092-4>.
16. Dobos A.P. PVWatts Version 1 Technical Reference // UNT Digital Library. 2013. <https://doi.org/10.2172/1096689>.
17. Ahmetovic H., Nukic E., Hivziefendic J., Saric M., Ponjavic M. PV system site selection using PVGIS and Fuzzy AHP // Infoteh-Jahorina: 21st International Symposium (East Sarajevo, 16–18 March 2022). East Sarajevo, 2022. P. 152–158. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH53737.2022.9751261>.
18. Косарева-Володько О.В., Кабиру А.С.М. Проектирование и моделирование фотоэлектрических систем с помощью программного обеспечения PVsystem // Омский научный вестник. 2024. № 4. С. 91–99. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-192-91-99>. EDN: CEQYVR.
19. Akshai K.N.B., Senthil R. Economic evaluation of grid connected and standalone photovoltaic systems using PVSyst // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 912. Iss. 4. P. 042074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/4/042074>.
20. Kosareva-Volodko O.V., Kabiru A.S.M. Software performance comparison PVWatts and PVGIS for simulating grid-connected photovoltaic system // Kazan digital week – 2024: Proceedings of the International Forum (Kazan, 9–11 September 2024). Kazan: Tatarstan Academy of Sciences, 2024. Part 1. P. 307–313. EDN: MAZVEV.

References

1. Iakovleva E., Guerra D., Shklyarskiy Y., Tsvetkov P. Technical and economic analysis of modernization of solar power plant: a case study from the republic of Cuba. *Sustainability*. 2022;14(2):822. <https://doi.org/10.3390/su14020822>. EDN: PUJRJH.
2. AL-Rousan N., Isa N.A.M., Desa M.K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(3):2548-2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>.
3. Elomari Yo., Norouzi M., Marín-Genescà M., Fernández A., Boer D. Integration of solar photovoltaic systems into power networks: a scientific evolution analysis. *Sustainability*. 2022;14(15):9249. <https://doi.org/10.3390/su14159249>.
4. Schmela M., Hemetsberger W., Dunlop S. Solar power Europe. In: *Global Market Outlook for Solar Power 2024-2028*. Available from: <https://www.pveurope.eu/markets/global-market-outlook-solar-power-2024-2028-solar-continues-its-growth-path-challenges> [Accessed 25th September 2025].
5. Kosareva-Volodko O.V., Kabiru A.S.M., Shaforostova E.N. Economic evaluation of a grid-connected photovoltaic system using PVSystem software. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025;3:51-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-195-51-59>. EDN: DVSYSG.
6. Jamasb T., Nepal R., Timilsina G.R., Toman M. Energy sector reform, economic efficiency and poverty reduction. 2014. Available from: https://www.researchgate.net/publication/366740624_Energy_Sector_Reform_Economic_Efficiency_and_Poverty_Reduction [Accessed 25th September 2025].
7. Houdagba P., Dabo I. Le système d'information énergétique de l'UEMOA (SIE-UEMOA) // Les politiques de maîtrise de l'énergie. Available from: https://www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/759_IFDD_Ficheprisme_No15_syst_information_energetique.pdf [Accessed 25th September 2025].
8. Sharma A., Kolhe M. Techno-economic evaluation of PV based institutional smart micro-grid under energy pricing dynamics. *Journal of Cleaner Production*. 2020;264:121486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121486>.
9. Zsiborács H., Baranyai N.H., Csányi S., Vincze A., Pintér G. Economic analysis of grid-connected PV system regulations: a Hungarian case study. *Electronics*. 2019;8(2):149. <https://doi.org/10.3390/electronics8020149>.
10. Longares J.M., Garcia-Jimenez A., Garcia-Polanco N. Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparison. *Solar Energy*. 2023;257:155-163. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.005>.
11. Sancar M.R., Bayram A.B. Modeling and economic analysis of greenhouse top solar power plant with Pvsyst software. *International Journal of Engineering and Innovative Research*. 2023;5(1):48-59. <https://doi.org/10.47933/ijeir.1209362>.
12. Gracia A.M., Huld T., Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces. *European Union*. 2013. <https://doi.org/10.2790/91554>.
13. Milosavljević, D.D., Kevkić, T.S., Jovanović S.J. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*. 2022;20(1):431-451. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0042>.
14. Barhdadi A., Bennis M. PVGIS approach for assessing the performances of the first PV grid-connected power plant in Morocco. *Physics and Society*. *arXiv: 1208.4325*. 2012. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1208.4325>.
15. Psomopoulos C.S., Ioannidis G.C., Kaminaris S.D., Mardikis K.D., Katsikas N.G. A comparative evaluation of photovoltaic electricity production assessment software (PVGIS, PVWatts and RETScreen). *Environmental Processes*. 2015;2:175-189. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0092-4>.
16. Dobos A.P. PVWatts Version 1 Technical Reference. *UNT Digital Library*. 2013. <https://doi.org/10.2172/1096689>.
17. Ahmetovic H., Nukic E., Hivziefendic J., Saric M., Ponjavic M. PV system site selection using PVGIS and Fuzzy AHP. In: *Infoteh-Jahorina: 21st International Symposium*. 16–18 March 2022, East Sarajevo. East Sarajevo; 2022, p. 152-158. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH53737.2022.9751261>.
18. Kosareva-Volodko O.V., Kabiru A.S.M. Design and simulation of photovoltaic systems using PVsystem software. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024;4:91-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-192-91-99>. EDN: CEQYVR.
19. Akshai K.N.B., Senthil R. Economic evaluation of grid connected and standalone photovoltaic systems using PVSyst. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;912(4):042074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/4/042074>.
20. Kosareva-Volodko O.V., Kabiru A.S.M. Software performance comparison PVWatts and PVGIS for simulating grid-connected photovoltaic system. In: *Kazan digital week – 2024: Proceedings of the International Forum*. 9–11 September 2024, Kazan. Kazan: Tatarstan Academy of Sciences; 2024, part 1, p. 307-313. EDN: MAZVEV.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Косарева-Володько Ольга Владимировна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры энергетики и энергоэффективности
горной промышленности,
Университет науки и технологий МИСИС,
119049, г. Москва, Ленинский просп.,
д. 4, стр. 1, Россия
✉ kosareva-volodko@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga V. Kosareva-Volodko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Energy and Energy Efficiency in Mining Industry,
University of Science and Technology MISIS,
4/1 Leninskiy Prospekt, Moscow 119049, Russia
✉ kosareva-volodko@rambler.ru

Кабиру Алилу Сани Маман,

аспирант,
Университет науки и технологий МИСИС,
119049, г. Москва, Ленинский просп.,
д. 4, стр. 1, Россия
halilousani4@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-6656-7961>

Alilu Sani Maman Kabiru,

Postgraduate Student,
University of Science and Technology MISIS,
4/1 Leninskiy Prospekt, Moscow 119049, Russia
halilousani4@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-6656-7961>

Тинга Абдулай,

доктор физических наук кафедры физики,
Университет Абду Мумуни,
10896, г. Ниамей, Аробанда К 006, Нигер
atinga@gmail.com

Abdoulaye Tinga,

Dr. Sci. (Phys.),
Department of Physics,
Abdou Moumouni University Niamey,
006 Arobanda Cabinet, Niamey 10896, Niger
atinga@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 17.11.2025 г.; принята к публикации 02.12.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 29.08.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.