

ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОРЕСУРСЫ

doi: 10.51639/2713-0576_2026_6_2_86

Научная статья

УДК 621.311

ГРНТИ 44.29.29

ВАК 2.4.3

Сравнительный анализ энергетической эффективности трекерных и стационарных фотоэлектрических систем для электроснабжения автономных потребителей

Владислав Владимирович Сугак, Татьяна Евгеньевна Черных*
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Воронеж, Россия
[*tany_ch@list.ru](mailto:tany_ch@list.ru)

Аннотация

В статье представлен результат сравнительного анализа энергетической эффективности трекерных и стационарных фотоэлектрических систем для автономного электроснабжения. На основе обобщённых расчётных данных о поступлении солнечной радиации проанализированы годовые и суточные профили выработки энергии. Показано, что трекерные системы с наклонной осью вращения обеспечивают прирост выработки электроэнергии ориентировочно на 32–37 % относительно стационарной ориентации под углом широты. Установлено, что помимо валового увеличения выработки энергии трекер выравняет суточный график выдачи мощности, продлевая генерацию в утренние и вечерние часы. Это позволяет снизить требуемую ёмкость аккумуляторных батарей и уменьшить глубину их циклирования, повышая надёжность и экономичность автономной системы энергообеспечения.

Ключевые слова: солнечная энергия, фотоэлектрическая система, трекер, стационарная ориентация, автономное электроснабжение, суточный профиль генерации, аккумуляторная батарея.

Развитие распределённой генерации на основе возобновляемых источников энергии является одним из приоритетных направлений модернизации систем сельского и автономного электроснабжения [1, 2].

В ряде исследований отмечается, что повышение энергоэффективности системы энергоснабжения возможно с использованием возобновляемых источников энергии, которая позволяет снизить потери энергии при её передаче. При этом распределённая генерация на возобновляемых источниках так же актуальна в общей системе электроснабжения [3–5].

Из числа источников возобновляемой энергии наиболее перспективной является солнечная энергия, благодаря ее распространённости, а также возможности получения непосредственно тепловой и электрической энергии (при этом важно выбрать установки с учётом особенности поступления солнечной энергии) [6]. Солнечное излучение, которое поступает на поверхность Земли, складывается из двух составляющих (прямой и рассеянной солнечной радиации).

Рассмотрим эти понятия. Прямая радиация – это поток излучения, направленный от солнечного диска (измеряемого на плоскости), которая перпендикулярна направлению луча. Рассеянная – это солнечная радиация, которая поступает на измеряемую плоскость от остальной части небесной полусферы. На рисунке 1 [6] изображено, как солнечная радиация зависит от положения Земли относительно Солнца.

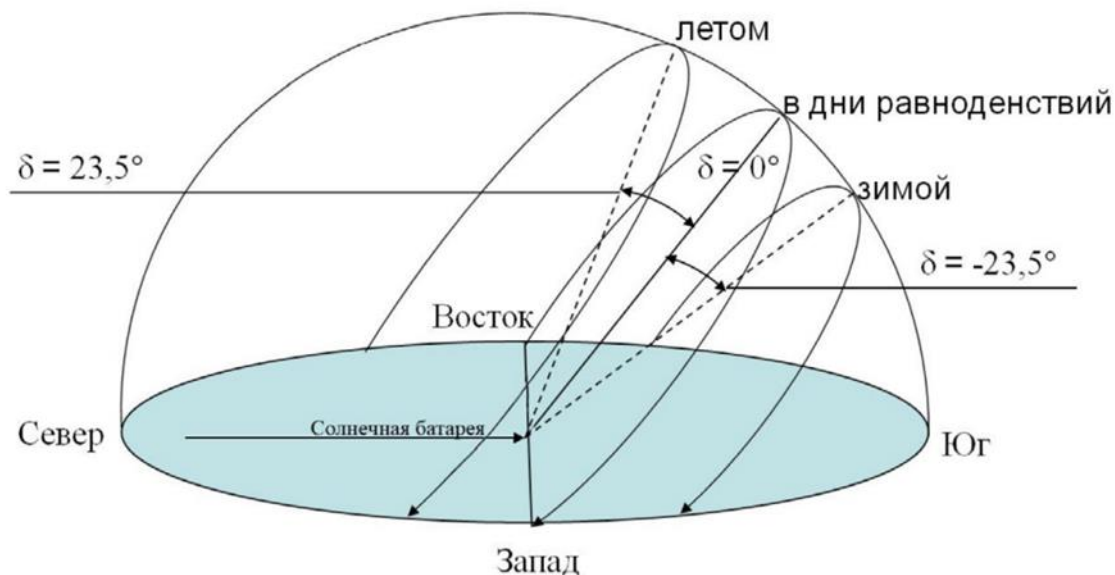


Рисунок 1 – Траектория движения Солнца относительно солнечной батареи в течение года

Проанализировав эти данные, можно сделать вывод, что зимой максимальное значение интенсивности солнечных лучей можно получить под углом наклона солнечной панели, близким к 90° (перпендикулярно поверхности земли), а летом это значение близкое к 0° (относительно горизонта). Базовые принципы проектирования солнечных электростанций предполагают, что для максимальной производительности энергии фотоэлектрические модули должны быть смонтированы таким образом, чтобы солнечные лучи падали на рабочую поверхность модуля под углом 90° .

Достичь этого можно только при использовании специальных поворотных конструкций (трекерных систем) с системой слежения за солнцем [7]. Однако такие установки являются достаточно дорогими устройствами и потребляют энергию на собственные нужды. Также они требуют большей площади для установки по сравнению с фиксированными конструкциями.

Чтобы найти компромисс между производительностью системы и стоимостью конструкции, применяют обычно стационарные конструкции, которые ориентируют на юг с фиксированным или изменяемым углом наклона. Вместе с тем, для автономных потребителей, не подключённых к централизованным электрическим сетям, выбор типа ориентации фотоэлектрической станции смещается от снижения капитальных затрат в сторону повышения надёжности энергоснабжения.

При этом учитывается уменьшение стоимости жизненного цикла системы, включающей затраты на накопители энергии. В данной работе выполнен сравнительный анализ энергетических характеристик трекерных и стационарных систем с учетом

специфики их применения у автономных потребителей. В основу анализа положены расчётные данные о годовом поступлении солнечной энергии на единицу площади для четырёх конфигураций приёмной поверхности, приведённые в работе [6].

Расчёты выполнялись для горизонтальной поверхности, стационарной ориентации под углом, равным широте местности. Установка проводилась с посезонным ручным изменением угла элевации. Одноосевой трекинг был выбран с вертикальной осью вращения и с наклонной осью вращения.

Дополнительно, для анализа, использованы сведения о производительности фотоэлектрических систем в зависимости от типа монтажной конструкции, представленные в литературе [3], а также о ресурсных характеристиках аккумуляторных батарей при циклическом режиме работы в составе солнечных электростанций.

Обобщённые расчётные данные для рассмотренных конфигураций ориентации приёмной поверхности [6] представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Годовое поступление солнечной энергии на единицу площади

Тип ориентации	E, кВт·ч/м ²	Относительный прирост, %	
		к горизонтальной	к углу широты
Горизонтальная	1101,5	–	-18,1
Стационарная (угол широты)	1344,6	22,1	–
Посезонная (ручная)	1446,2	31,3	7,6
Одноосевой трекинг (вертикальная ось)	1879,8	70,6	39,8
Одноосевой трекинг (наклонная ось)	1887,8	71,4	40,4

Как видно из таблицы 1 прирост поступления солнечной энергии относительно горизонтальной поверхности составляет для стационарной ориентации под углом широты 22,1 %, для посезонной ориентации 31,3 % и для трекерных систем с вертикальной и наклонной осями вращения 70,6–71,4 % (соответственно). Наиболее распространённое техническое решение — это стационарная ориентация под углом широты для фиксированных систем. Для такой системы прирост при ручной посезонной ориентации составляет примерно 7,6 %. Для сравнения при использовании трекерных систем прирост составляет 39,8 % для вертикальной оси и 40,4 % для наклонной оси вращения.

При этом не следует напрямую связывать прирост поступающей солнечной энергии при использовании трекерных систем с приростом выходной полезной мощности. Это связано с тем, что сначала необходимо вычитать соответствующие электрические потери на функционирование трекерных систем (фотодатчик, привод).

Также трекерные системы увеличивают затеняемую площадь вокруг каждой солнечной панели, а это требует увеличения расстояния между соседними модулями и, следовательно, увеличивает общую площадь земельного участка, выделяемого под размещение установки. Но для автономного потребителя (располагающего, как правило, ограниченной площадью для размещения солнечных модулей) важен показатель удельной выработки на единицу площади именно приёмной поверхности.

В таком случае трекерная система является наиболее предпочтительным решением. Здесь критерием выступает «максимум энергии» с ограниченной площади.

Реальный же прирост выработки электроэнергии будет несколько ниже. Это происходит за счёт потребления энергии приводами и системой управления трекера (ориентировочно 3–8 % от дополнительной выработки).

Суточное распределение энергии

Для автономных систем электроснабжения, в состав которых входит блок аккумуляторных батарей (АКБ), важен не только абсолютный годовой объём выработанной энергии, но и форма суточного графика её поступления. Эффективность фиксированной системы (на широтах от 25° до 50°) относительно оптимальной двухосевой трекерной системы составляет порядка 74–76 % [3], результаты анализа эффективности стационарных систем по сравнению с трекерными системами сведены в таблицу 2.

Из таблицы видно, что стационарная система на всех рассмотренных широтах недобирает от 24 до 26 % энергии относительно трекерной. В зимний же период солнечные панели ориентированы достаточно эффективно, по сравнению с трекерной системой (захват энергии составляет от 81 до 88 %).

Но такой угол наклона является хорошим решением только на тех территориях, где зимой нагрузка больше, чем летом. Весной, летом и осенью эффективность будет ниже (весной и осенью 74–75 %, летом 68–74 %).

Это происходит потому, что в эти сезоны Солнце проходит большой участок неба. Фиксированная панель не может быть направлена большую часть дня на него под разными углами, приближающимися к 90°. В этот период трекерные системы слежения показывают наилучший эффект.

Таблица 2 – Эффективность стационарных систем на различных широтах

Широта, градусы	Летний угол, градусы	Зимний угол, градусы	% от оптимального (двухосевого трекера)
25	2,3	41,1	76
30	6,9	45,5	76
35	11,6	49,8	76
40	16,2	54,2	75
45	20,9	58,6	75
50	25,5	63,0	74

Для иллюстрации изменения мощности генерации в течение суток приведен рисунок 2. На нем представлены расчётные суточные графики выданной мощности для стационарной системы и системы с одноосевым трекингом (при условиях равной установленной мощности фотоэлектрических модулей, широте 45°, месяц июнь, ясное небо).

В условиях преобладания рассеянной радиации (пасмурная погода) изменение мощности трекерной и стационарной систем существенно уменьшается.

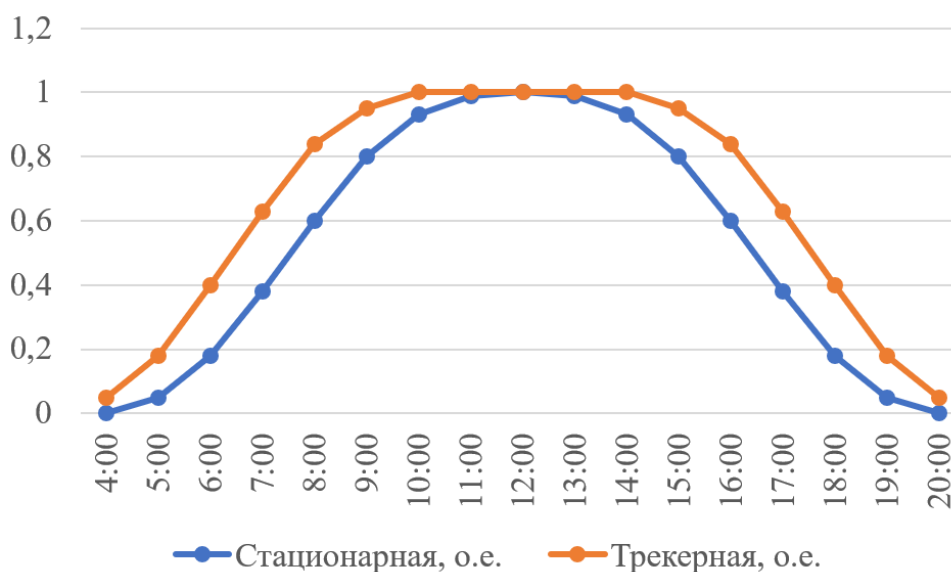


Рисунок 2 – Сравнение суточных графиков

Из рисунка можно увидеть, что трекерная система имеет более широкий временной интервал эффективной выработки энергии. Уровень относительной мощности 0,6 и выше удерживается порядка десяти с 7:00 до 17:00. При равных условиях у стационарной системы этот интервал ограничен восемью часами с 8:00 до 16:00. Площадь под кривыми (пропорциональная суточной выработке энергии) больше также для трекерной системы.

Также утром и вечером заметно сокращены «провалы» напряжения, что показывает снижение количества энергии, которое восполняется АКБ.

Влияние на параметры системы накопления энергии

В фотоэлектрических системах как правило применяются свинцово-кислотные аккумуляторы, которые предназначены для циклического режима работы. Эксплуатация аккумуляторов при условии глубоких разрядов ведёт к их частой замене и, соответственно, к удорожанию системы.

Глубину разряда аккумуляторов солнечных панелей стараются ограничить на уровне 30–40 %. Это достигается отключением нагрузки, снижением мощности или АКБ большей ёмкости. Зависимость количества циклов АКБ от глубины разряда приведена в таблице 3.

Стоимость АКБ составляет значительную часть общих капитальных затрат автономной системы электроснабжения. Этот фактор заставляет использовать обычные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, у которых срок службы в составе солнечной электростанции составляет не более 3–5 лет (при сроке использования солнечной панели 15–20 лет и более). Следовательно АКБ придется менять.

Трекерная система обеспечивает более равномерный суточный график выдаваемой мощности.

Это позволяет снизить процент отдачи емкости АКБ при той же установленной мощности фотоэлектрических модулей.

Таблица 3 – Зависимость количества циклов АКБ от глубины разряда

Глубина разряда, %	Количество циклов до потери 20 % ёмкости
100	150–200
80	250–300
50	500–600
30	1200–1400
20	2000–2500

Экономический эффект у автономного потребителя достигается при применении трекерной системы. Это происходит за счет увеличения годового объема генерации энергии и снижения требуемой ёмкости накопителя энергии. У АКБ при этом происходит увеличение ресурса работы за счёт уменьшения глубины разряда. Структурная схема автономной гибридной системы электроснабжения, с применением трекерной фотоэлектрической установки с АКБ представлена на рисунке 3.

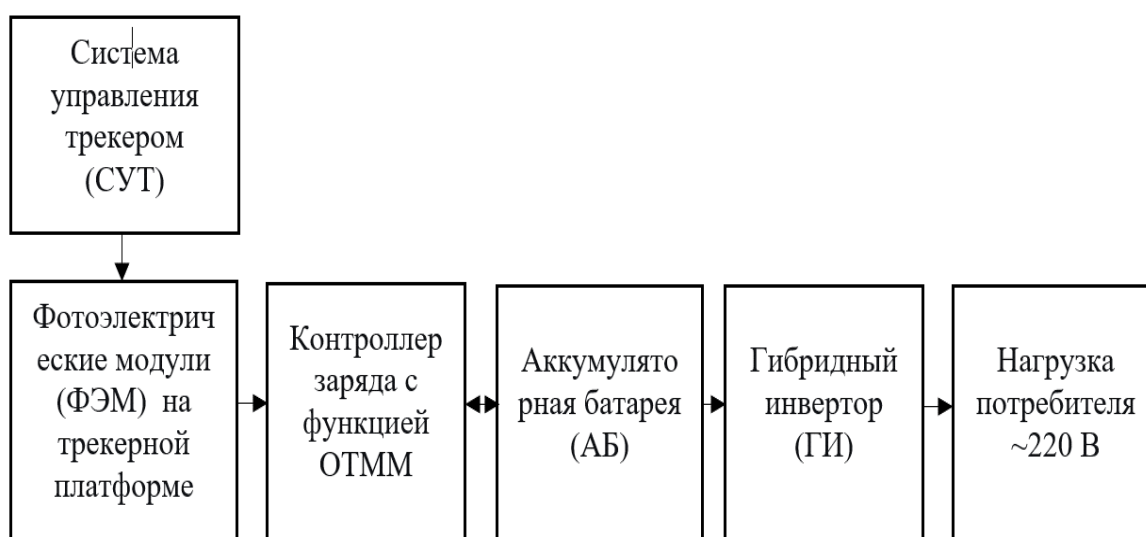


Рисунок 3 – Структурная схема автономной системы электроснабжения

Ограничения применения и конструктивные особенности

При проектировании трекерных систем необходимо учитывать ряд конструктивных и эксплуатационных ограничений.

Так, одноосевые солнечные трекеры следят за солнцем от восхода до заката при его движении в течение дня с востока на запад. Ось может быть ориентирована по-

разному. Например, у трекера с полярной осью вращения панель стоит под постоянным к горизонту углом. У трекера с горизонтальной осью вращения угол относительно горизонта меняется.

Для местности в небольших широтах наиболее подходит конструкция с горизонтальной осью вращения, а трекеры с полярной осью больше подходят для больших широт.

Преимущество одноосных трекеров в том, что они имеют более простую конструкцию и являются более дешёвыми. Их эффективность наиболее достижима в местах, расположенных ближе к экватору (траектория движения Солнца по небу изменяется не сильно в течение дня). Немаловажным аспектом при выборе трекера является способ ориентации по солнцу.

Ручной способ, когда оператор выполняет сезонную ориентацию трекера, является более надёжным, но менее эффективным. При использовании фотодатчиков существует ряд недостатков (датчики могут загрязняться, они требуют калибровки, не работают в пасмурную погоду).

Программный способ управления автономной системой выполняется согласно циклам движения солнца и является более надёжным. Он редко требует вмешательства операторов.

Такие системы обычно используются в промышленных солнечных электростанциях. Конструкция трекера должна выдерживать сильные ветровые нагрузки. Чем больше размеры рабочей поверхности, тем больше парусность комплекса. Вес полезной нагрузки тоже имеет значение. В связи с этим конструкторам приходится перераспределять нагрузки на трекер, что ведет к увеличению габаритов системы, не забывая при этом про надёжность.

Для сравнения конструктивных особенностей различных видов трекерных систем на рисунке 4 представлены схемы одноосевого трекера с полярной осью вращения и горизонтальной осью вращения [3].

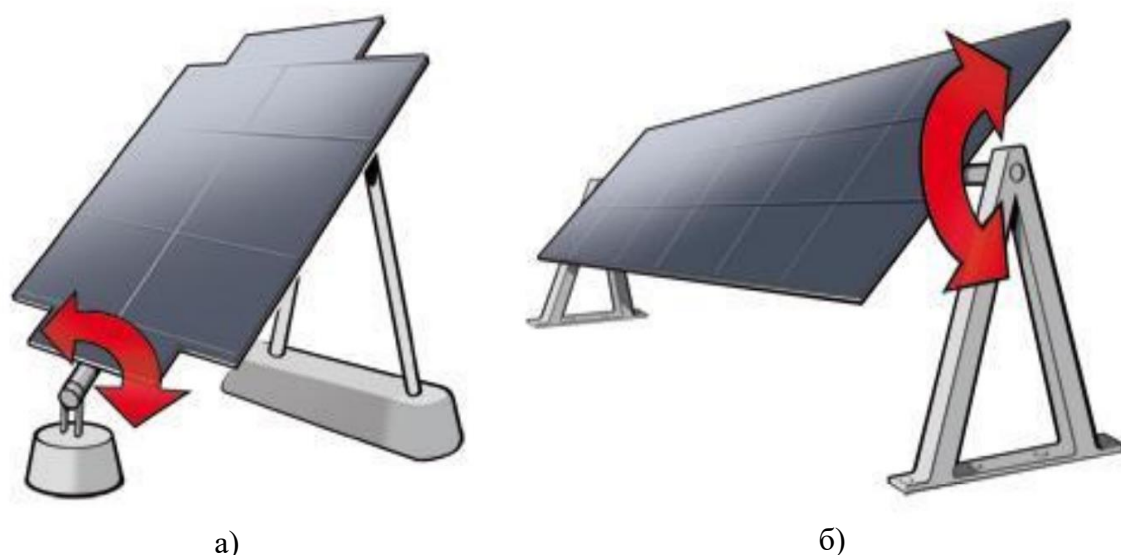


Рисунок 4 – Схемы одноосевых трекерных систем:
а) трекер с полярной осью вращения; б) трекер с горизонтальной осью вращения

Заключение

Исходя из всего вышеизложенного можно сделать выводы, что одноосевые трекерные системы с наклонной осью вращения обеспечивают хороший процент прироста поступления солнечной энергии по сравнению со стационарной установкой. Для автономных систем электроснабжения, использующих АКБ, преимущество трекерных систем обусловлено несколькими факторами (продляется период выработки энергии в утренние и вечерние часы, что ведет к снижению времени работы от накопителя энергии), особенно в летний период (увеличение на 3–4 часа).

Решение о применении трекерной системы для автономного потребителя должно основываться на комплексном анализе. Так, дополнительные капитальные затраты на трекерное оборудование компенсируются экономией за счёт увеличения выработки электроэнергии и продления ресурса аккумуляторных батарей.

Для потребителей с ярко выраженной утренней и вечерней нагрузкой (животноводческие комплексы, оросительные системы) трекерные системы являются предпочтительным решением, в том числе при отсутствии жёстких ограничений на площадь размещения фотоэлектрических модулей.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что на момент подачи статьи в редакцию, у них нет возможного конфликта интересов с третьими лицами.

Список источников

1. Сугак В.В. Гибридные системы и технологический суверенитет в распределённой возобновляемой энергетике / В.В. Сугак, Т.Е. Черных // Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетике: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Невинномысск, 22-26 декабря 2025 г.) – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2026.с. 112-116
2. Ульянов А.Г., Белый О.Ю. Оптимизация структуры и состава оборудования перспективных автономных комбинированных систем электроснабжения удаленных объектов береговой инфраструктуры // Сборник научных трудов «Морская стратегия и политика России в контексте обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития в XXI веке».- Севастополь, ЧВВМУ им. П.С. Нахимова, Выпуск 4 (36), 2021 г., С. 189-195.
3. Дюсьмикеев А. Б. Базовые принципы солнечной энергетике для проектирования и строительства солнечных электростанций. Минск: Проект ПРООН/ГЭФ № 00077154, 2016. 79 с.
4. Сугак В.В. Анализ использования гибридных электростанций для стабилизации энергосистемы // Сборник трудов БрГУ «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири - 2025» [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, 2025. С 7-11
5. Зубков М.А. Анализ эффективности гибридной энергосистемы для частного дома / М.А. Зубков, В.В. Сугак, Я.С. Терехов, Т.Е. Черных // Теоретические и прикладные задачи энергетике. Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 50-летию первого выпуска инженеров-промтеплоэнергетиков. Воронеж, 2025. С. 60-64

6. Пашнин С. М. Сравнение стационарных и трекерных солнечных установок по поступлению солнечной энергии на единицу площади / С. М. Пашнин, А.В. Сакулин, Т.В. Чертова, С.К. Шерьязов // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения – 2021: сборник научных трудов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2023. С. 442–447.
7. Аржанов К. В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 324, № 4. С. 139–146.

Comparative analysis of the energy efficiency of tracker and stationary photovoltaic systems for power supply of autonomous consumers

Vladislav Vladimirovich Sugak, Tatyana Evgenyevna Chernykh*
Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russia
[*tany_ch@list.ru](mailto:tany_ch@list.ru)

Annotation

This article presents the results of a comparative analysis of the energy efficiency of tracker-based and stationary photovoltaic systems for autonomous power supply. Using generalized calculated solar radiation data, annual and daily energy generation profiles are analyzed. It is shown that tracker systems with an inclined axis of rotation provide an increase in electricity generation of approximately 32–37% compared to a stationary orientation at an angle of latitude. It is also established that, in addition to the overall increase in energy generation, the tracker aligns the daily power output schedule, extending generation in the morning and evening hours. This reduces the required battery capacity and reduces the depth of their cycling, increasing the reliability and efficiency of the autonomous power supply system.

Key words: solar energy, photovoltaic system, tracker, stationary orientation, autonomous power supply, daily generation profile, battery.