

Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света

Н. Р. Костик ^{1✉}, С. А. Тарасов ¹, Г. Е. Айвазян ²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

✉ nrkostik@etu.ru

Аннотация

Введение. Фотовольтаика является одной из лидирующих отраслей возобновляемой энергетики. Наибольшее распространение фотовольтаика получила в использовании фотоэлектрических преобразователей для создания гибридных автономных систем электрификации, поскольку фотовольтаика не привязана к конкретным факторам и может быть применена практически повсеместно.

Цель работы. Определение потенциала метеорологических и географических особенностей Республики Армения для внедрения автономных гибридных систем возобновляемых источников энергии (АГСВИЭ) с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света. Моделирование условий эксплуатации различных конфигураций АГСВИЭ для снабжения электроэнергией базовой станции сотовой связи (БССС). Оптимизация и анализ технико-экономических параметров оптимальных конфигураций.

Материалы и методы. Исследуются климатические, географические, социальные и экономические особенности Республики Армения. Выполняется оценка регионов с высоким потенциалом для внедрения АГСВИЭ и сравнение результатов с исследованиями, проведенными комитетом энергоэффективности Effergy-irsolav. Осуществляется подбор компонентов на основе потребительской нагрузки БССС для моделирования системы автономного гибридного энергоснабжения и непосредственное моделирование условий эксплуатации АГСВИЭ при помощи программного обеспечения HOMER Pro для последующего анализа технической и экономической эффективности внедряемой АГСВИЭ в регионе рядом с населенным пунктом Тцовинар.

Результаты. Были получены 10 основных разновидностей конфигураций АГСВИЭ. Наиболее эффективной является конфигурация В1, со стоимостью энергии 0.322 \$/кВт·ч, компонентами которой являются массив солнечных элементов общей мощностью 4.5 кВт, 12 В аккумуляторных батарей емкостью 100 А·ч, дизельная генераторная установка мощностью 3 кВт. Основными критериями эффективности являются низкие экономические затраты на реализацию и процесс эксплуатации данной конфигурации АГСВИЭ. Дополнительные варианты АГСВИЭ были смоделированы с целью оптимизации компонентной базы конфигурации АГСВИЭ.

Заключение. В ходе проведенного исследования и моделирования условий эксплуатации было выявлено, что в зависимости от потребительской нагрузки солнечные фотопреобразователи ограничены и могут выступать как вспомогательный источник электроэнергии. Использование реального профиля потребительской нагрузки в виде БССС позволило охватить максимально широкий диапазон конфигураций компонентной базы, что свидетельствует о высокой точности результатов моделирования и, как следствие, технико-экономических результатов исследования.

Ключевые слова: фотовольтаика, солнечная энергетика, возобновляемые источники энергии, автономные системы энергоснабжения

Для цитирования: Костик Н. Р., Тарасов С. А., Айвазян Г. Е. Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 106–122. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-106-122

Источник финансирования. Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2020-0008, который выполнялся в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.02.2023; принята к публикации после рецензирования 24.05.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules

Nikita R. Kostik^{1✉}, Sergey A. Tarasov¹, Gagik Ye. Ayvasyan²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia

✉ nrkostik@etu.ru

Abstract

Introduction. Solar energy is one of the leading renewable energy industries. Solar photovoltaic modules are most widely used to create hybrid autonomous electrification systems, since photovoltaics are not limited to specific limitations and can be applied almost everywhere.

Aim. To determine the potential of meteorological and geographical features of the Republic of Armenia for the implementation of autonomous hybrid renewable energy sources systems (AHRESS) using solar photovoltaics (PV). To simulate operating conditions for various AHRESS configurations providing electric power to a cellular communication base station.

Materials and methods. Climatic, geographical, social and economic features of the region of the Republic of Armenia are investigated. Regions are evaluated based on the key factors of AHRESS implementation potential and compared with studies performed by the Effergy-Irsolav. The simulations and technical and economic analysis were performed using the HOMER Pro software in Ttsovinar region.

Results. The most efficient configuration is found to be B1, with an energy cost of 0.322 \$/kW·h. The parameters of winning system: PV array with capacity of 4.5 kW, 12V battery with 100 A·h capacity, diesel generator with 3 kW capacity. The main efficiency criterion is the low economic costs for the implementation and operation of this AHRESS configuration. Ten additional variants of AHRESS were modeled in order to optimize the component base of the configuration.

Conclusion. It was found that, depending on the consumer load, solar photovoltaic converters are limited and can only perform as supporting source of electricity. The use of the existing consumption load profile in the form of BSSS made it possible to cover the widest possible range of configurations of the component base, which indicates the high accuracy of the simulated results and, as a result, the technical and economic relevance of the study.

Keywords: photovoltaics, solar energy, renewable energy sources, autonomous power supply systems

For citation: Kostik N. R., Tarasov S. A., Ayvasyan G. Ye. Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 106–122. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-106-122

Acknowledgments. The study was carried out as part of project No.FSEE-2020-0008, which was carried out as part of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 14.02.2023; accepted 24.05.2023; published online 28.09.2023

Введение. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволяет не только снизить нагрузку на основную энергетическую сеть, обеспечить устойчивое энергетическое развитие государства, но благодаря диверсификации источников энергии снизить зависимость от внешних факторов, например политических [1]. Также с диверсификацией связано возможное снижение себестоимости генерации элект-

троэнергии, что в дальнейшем позволяет создать условия для интеграции страны в электроэнергетические коридоры [2].

В [3] можно наблюдать, как изменяется распределение в энергетическом балансе Республики Армения: уголь и нефть, а также нефтепродукты все реже используются для генерации электроэнергии. Доля использования газа возрастает до 70%. Больше внимания

Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света
Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules

начинает уделяться ВИЭ (в том числе гидро-энергии) и "мирному атому" [3, 4]. Также автор упоминает о мерах правительства Армении, направленных на модернизацию производств, которая, в свою очередь, направлена на снижение энергопотребления. В этом плане Армения имеет определенные успехи, которые выражаются в удельном потреблении электроэнергии на душу населения на уровне $3.6 \text{ МВт} \cdot \text{ч/чел.}$, в сравнении с среднесоюзным уровнем в $5.5 \text{ МВт} \cdot \text{ч/чел.}$ [3]. Тем не менее в энергетическом балансе Республики Армении все еще преобладает топливная технология – более 85 % энергии вырабатывается именно с ее помощью.

Республика Армения обладает также высоким возобновляемым потенциалом. Приход солнечной энергии за год на поверхность земли здесь в два раза больше, чем в Европе, и составляет $1720 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ [4]. Малая площадь страны и большой процент пахотных земель ограничивают возобновляемый потенциал. В ближайшие 15 лет правительство планирует увеличение доли солнечной энергии с 1 до 10 % – это максимум территориальных возможностей. Доля солнечных электростанций (СЭС) в структуре внутреннего потребления составила 10 % к 2022 г. [5]. Совместно с Европейским банком реконструкции и развития в Армении начались подготовительные работы по строительству пяти СЭС общей мощностью 120 МВт [6]. Также правительством республики была одобрена инвестиционная программа компании Masdar (ОАЭ) по строительству СЭС общей мощностью 400 МВт в Арагацотнской и Котайкской областях Армении [7–11]. Таким образом, можно утверждать, что отрасль возобновляемой, в частности солнечной, энергетики является перспективным развивающимся направлением, которое способно не только привлечь инвестиции, но и способствовать решению социально-экономических аспектов.

В то же время солнечная энергетика обладает значительным недостатком – это прямая зависимость мощности СЭС от площади массива солнечных элементов. Данный факт может играть решающую роль в условиях ограниченности площадей, пригодных для размещения фотовольтаических (Photovoltaic – PV) модулей. Однако, если рассматривать комбинированный

подход к использованию доступных земельных ресурсов в виде применения технологии агровольтаики, возможно, удастся повысить эффективность занимаемого пространства [12].

Исходя из распределения общего солнечного излучения, максимум излучения сосредоточен на южных склонах горного рельефа. Данная местность частично электрифицирована, однако полная электрификация этих районов может быть затруднительна. Поэтому автономные гибридные системы на основе ВИЭ могут быть рассмотрены в качестве альтернативы подключению к сети энергоснабжения.

Материалы и методы. Станции на основе фотовольтаики обладают наибольшей эффективностью при соответствии как минимум одному из перечисленных критериев: локация обладает достаточным уровнем солнечной иррадиации, локация не располагает более доступными и эффективными способами снабжения потребительской нагрузки, размещение массива солнечных модулей может быть реализовано с учетом особенностей рельефа, территория не является запрещенной для размещения ВИЭ зоной (аэропорты, заповедники, центральные площади городов и т. д.). В зависимости от назначения и поставленных целей перед СЭС значимость критериев может изменяться, однако данные условия являются ключевыми при выборе места размещения СЭС [13].

В исследовании была выбрана локация рядом с населенным пунктом Тцовинар. Выбор обусловлен достаточной удаленностью от сетей энергоснабжения, высокими параметрами инсоляции, пиковые значения которой достигают $6 \text{ кВт/м}^2/\text{день}$, и рельефом, пригодным для установки массива солнечных элементов. Выдвинутое предположение также подтверждается исследованием, проведенным Effergy Irsolav [7–11], в рамках которого была выполнена оценка возобновляемого потенциала Республики Армении. Исследование было сосредоточено на повышении уровня знаний о возобновляемом потенциале, составлении базы данных и солнечных атласов, с использованием информации о климатологических параметрах региона со спутников. На основе данных со спутников была построена модель с применением нейронных



Рис. 1. Распределение ресурса солнечной энергии в Республике Армения

Fig. 1. Solar energy resource yield map of Republic of Armenia

сетей для оценки распределения инсоляции на территории республики за 2000–2016 гг. С использованием полученной теоретической информации были построены солнечные атласы региона (рис. 1), затем были апробированы данные и начата кампания по сбору и анализу экспериментальных данных солнечного излучения, достигающего поверхности, при помощи 5 метеорологических станций, размещенных в максимально различающихся локациях. В соответствии с результатами анализа экспериментальных данных за 4 месяца были внесены корректировки в оценку возобновляемого потенциала и сформирован отчет о возобновляемом потенциале и перспективных регионах Республики Армения, пригодных для размещения СЭС [14]. На основе данного исследования можно подтвердить предположение авторов статьи о высоком возобновляемом потенциале района населенного пункта Тцовинар [10, 11].

Моделирование условий эксплуатации СЭС. Оптимальные решения по использованию ВИЭ в Армении анализируются с использованием метода компьютерного моделирования с помощью программного обеспечения

HOMER Pro. Процесс моделирования основывается на исследовании периода окупаемости системы (Payback Period), чистой приведенной стоимости (Net Present Cost – NPC) и выбросов загрязнений для каждого сценария. Процесс моделирования можно разделить на три части: определение входных данных, анализ результатов каждого сценария и обоснование выходных результатов.

1. *Определение входных данных.* Входная информация собирается из общедоступных источников. Входными данными является информация о климатических параметрах региона, структура энергопотребления в регионе, капитальные затраты на систему (Capital Cost), стоимость установки, стоимость обслуживания и сведения о выбранном местоположении.

2. *Моделирование каждого сценария.* Собранная информация была введена в программу HOMER для последующего моделирования. Моделирование проводилось для различных сценариев в зависимости от потребления электроэнергии, комбинации используемых технологий ВИЭ и типа системы. На основе входных

данных был осуществлен подбор соответствующих компонентов системы ВИЭ:

$$NPC = \sum_{t=25 \text{ лет}}^{\text{Компоненты}} \frac{R_t}{(1+i)^t}, \quad (1)$$

где t – период эксплуатации системы; R_t – общие затраты за эксплуатационный период системы; i – средства, которые возможно вернуть в процессе эксплуатации (продажа электроэнергии, сдача оборудования в аренду, продажа компонентов, сдача в переработку и т. д.).

Один из основных экономических показателей – приведенная стоимость – был рассчитан в программе HOMER Pro по (1).

3. *Анализ результатов.* После моделирования были проанализированы технико-экономические параметры систем, чтобы выбрать лучшую инвестиционную стратегию для использования ВИЭ в рассматриваемом регионе.

Описание методологии определения параметров системы. Местоположение определяется параметрами широты и долготы, что позволяет приложению загружать годовые профили освещенности (рис. 2–4), скорости ветра и температуры. Агрегированный профиль нагрузки создается в соответствии с измерениями мощности, выполненными в локальных элементах микросети (например, в зданиях). Могут быть добавлены некоторые вариации в отношении суточного и часового потребления

электроэнергии, но не более 10%. Вместе с определением объекта и нагрузки генераторы и электросеть рассматриваются в качестве энергоресурсов, включая интерфейсы питания, связанные с каждым генератором. На данном этапе рассматривается информация о возможных ограничениях по выработке электроэнергии, а также капитальные затраты и затраты на техническое обслуживание. Эти данные должны быть максимально точными, так как от них напрямую зависит тип и количество источников энергии.

В качестве энергетической поддержки добавляются системы хранения с конкретными техническими и экономическими параметрами. Без дополнительных ограничений велика вероятность того, что параметры некоторых компонентов не соответствуют коммерческим спецификациям или целочисленным значениям. Дополнительно некоторые дискретные расчетные параметры (например, количество фотоэлектрических панелей или батарей) необходимо ограничить техническими возможностями и доступной площадью. Фактически большинство автономных систем энергоснабжения требуют согласования требований потребителя энергии и источников электроэнергии по напряжению или току, в соответствии с используемым типом подключения и разновидностями компонентов системы.

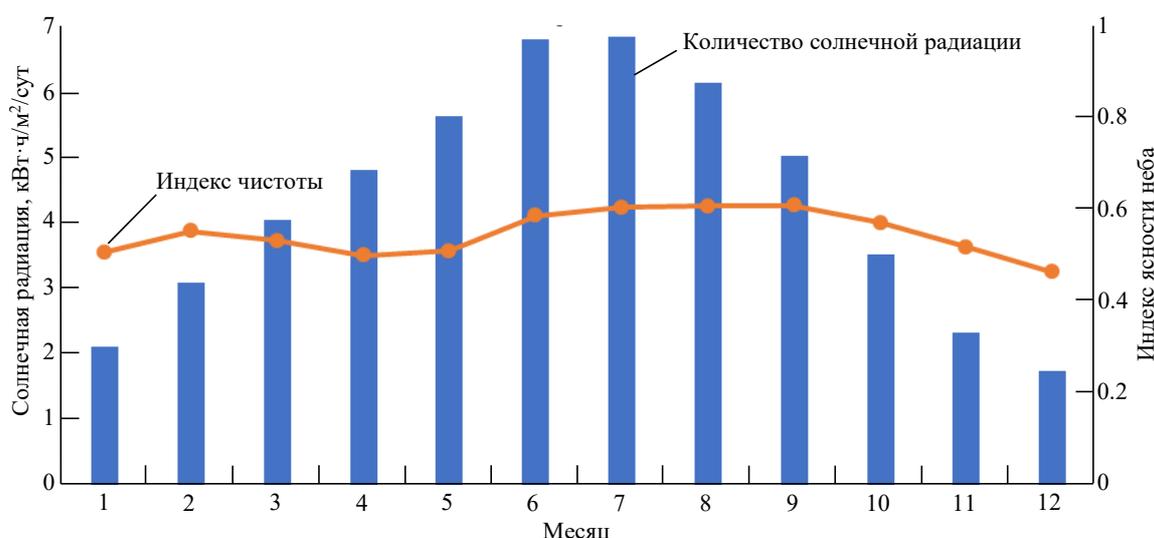


Рис. 2. Распределение глобального горизонтального солнечного излучения (GHI) в Талине

Fig. 2. Global horizontal irradiance distribution in Talin

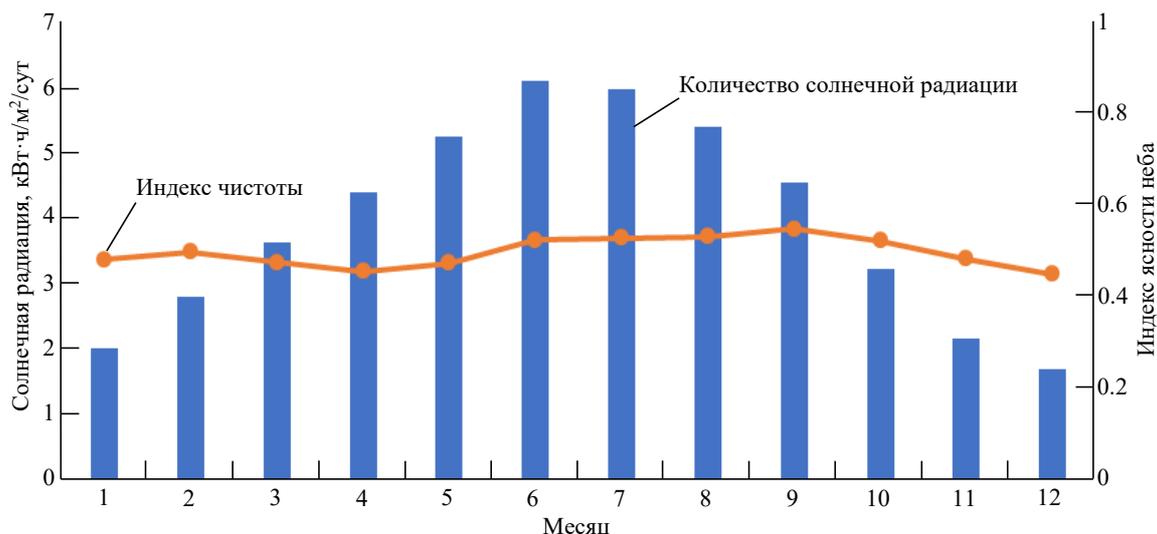


Рис. 3. Распределение глобального горизонтального солнечного излучения (GHI) в населенном пункте Тцовинар
 Fig. 3. Global horizontal irradiance distribution in Tsovinar

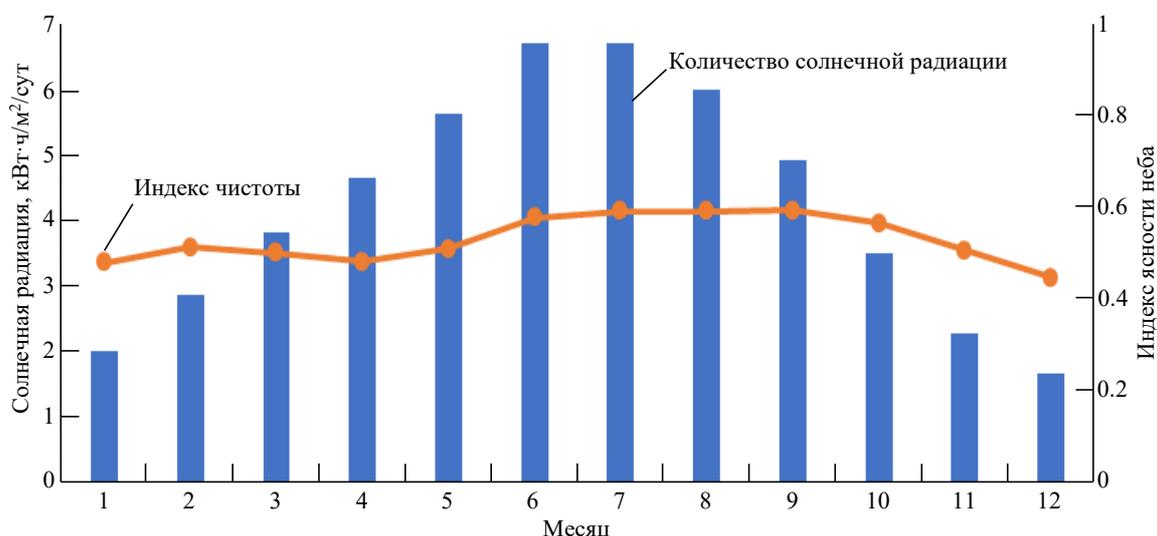


Рис. 4. Распределение глобального горизонтального солнечного излучения (GHI) в Ереване
 Fig. 4. Global horizontal irradiance distribution in Yerevan

HOMER Pro требует в качестве входных экономических данных капитальные затраты на реализацию, затраты на техническое обслуживание, замену и эксплуатационные расходы для каждого компонента: генераторов, накопителей энергии и элементов питания. Кроме того, требуется указать срок жизни проекта, ставку дисконтирования, уровень инфляции и другие экономические параметры. Затраты и экономические параметры используются для расчета NPC для проекта на весь срок службы, что является одним из основных критериев оптимизации для рационального выбора параметров компонентов. Чистая приведенная стоимость (NPC), которая, другими словами, является стоимо-

стью всего жизненного цикла системы, рассчитывается по (1).

По сути, NPC является функцией мощности компонентов, стоимости и экономических параметров, которая представляет собой сложную, нелинейную и смешанную целочисленную функцию. Чистая приведенная стоимость минимизируется с помощью инструмента оптимизации HOMER, в результате получается наиболее оптимальная конфигурация гибридной системы ВИЭ.

Другим немаловажным показателем является стоимость энергии (Cost of Energy – COE), которая выражается в \$/кВт·ч и сопоставима с платой за электроэнергию при покупке энер-

гии. Этот показатель можно использовать для оценки экономической целесообразности гибридной системы ВИЭ по сравнению с обычными традиционными источниками электричества, такими как электросеть или дизельные электростанции:

$$\text{COE} = \frac{\text{CRF}(i, t) \cdot \text{NPC}}{E_{\text{served}}}, \quad (2)$$

где CRF – коэффициент восстановления платежеспособности; i – годовая учетная ставка; t – эксплуатационный период системы; E_{served} – количество энергии для покрытия нагрузки в течение года.

Пример расчета. *Определение расположения и сбор данных.* Каждый сценарий был разработан с учетом потребностей в энергии, местоположения, климатических особенностей и доступного пространства для размещения станции. Населенные пункты были выбраны исходя из удаленности от сетей электроснабжения: Ереван как наименее удаленный населенный пункт, являющийся социально-экономическим центром региона; населенный пункт Тцовинар как наиболее удаленный пункт в сложной местности; Талин в качестве среднего по показателям удаленности пункта. Климатологические данные о температуре и солнечном излучении берутся из базы данных НАСА, являющейся информационной системой, к которой обращается HOMER Pro.

Исходя из климатического анализа и оценки возобновляемого потенциала в регионе, было принято решение о моделировании условий эксплуатации условного объекта, находящегося в районе села Тцовинар. Данный регион демонстрирует средний по Республике Армении социально-экономический показатель плотности населения и предпочтителен для внедрения гибридных систем энергоснабжения.

Нагрузка. Стоимость электроэнергии, произведенной рассматриваемой системой, рассчитывается по (2). В качестве потребительской нагрузки в работе выступает базовая станция сотовой связи (БССС). Данный объект предпочтителен для рассмотрения, поскольку может выступать в качестве сетевого и автономного потребителя энергии. На рис. 5 изображен график потребительской нагрузки типовой базовой сотовой станции. Основные параметры работы БССС:

- постоянное напряжение 48 В;
- наличие малой аккумуляторной батареи (АКБ) емкостью 100 А · ч;
- режим работы: вероятность потери нагрузки (loss of load probability – LOLP).

Параметры тока в течение дня варьируются между 52 и 58 А. Как видно из графика, минимальный ток наблюдается в послеполуночные периоды (с 2:00 до 8:00): ток принимает минимальное значение 51.85 А. Максимум тока при-

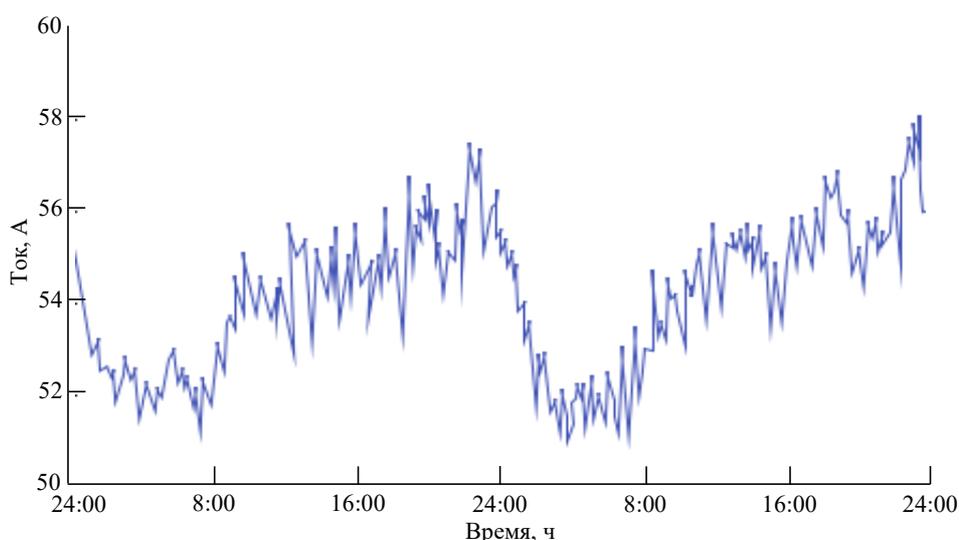


Рис. 5. Среднесуточное энергопотребление базовой станции сотовой связи 15–16 декабря 2022 г.

Fig. 5. Daily average energy consumption of cell phone base station on 15–16 of December 2022

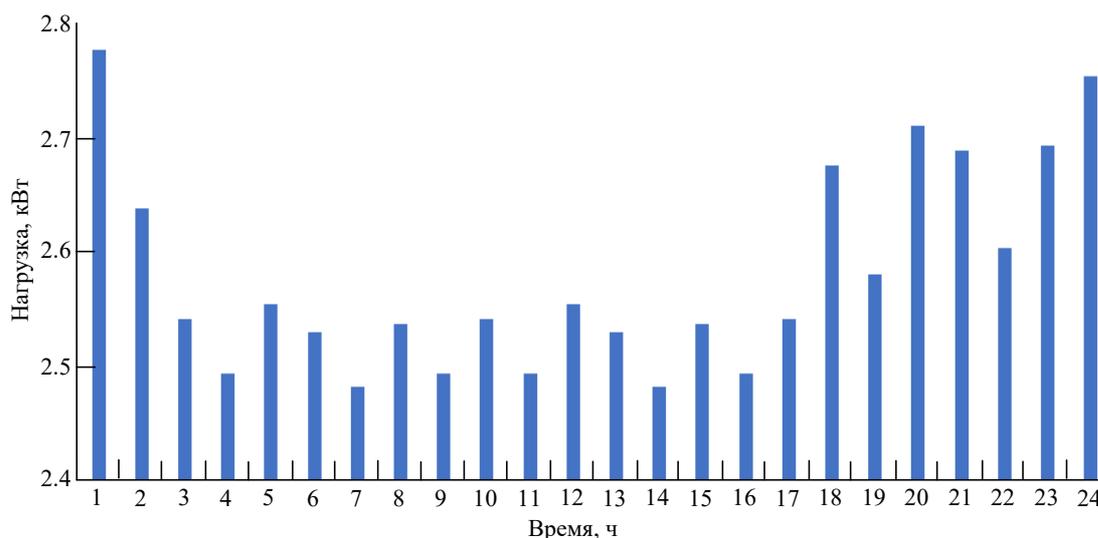


Рис. 6. Профиль потребительской нагрузки базовой станции сотовой связи

Fig. 6. Daily energy consumption load profile of cell phone base station

ходится на вечернее время: с 16:00, с небольшими просадками, значения тока стремятся к максимуму – 58 А.

Для приближения моделирования к реальным условиям эксплуатации в профиль нагрузки были внедрены случайные временные и суточные изменчивости значения нагрузки в пределах 2 %. Исходя из вышеописанных данных можно составить профиль нагрузки в HOMER Pro. На рис. 6 изображен профиль нагрузки, использованный при моделировании условий эксплуатации.

Максимум нагрузки составляет около 2.9 кВт, среднее значение мощности составляет 2.58 кВт, в то время как среднесуточное потребление энергии достигает значения 61.98 кВт · ч/день.

Конфигурация системы.

1. Система накопления энергии. Предпочтительным вариантом накопителя энергии для потребителей среднего напряжения являются аккумуляторные батареи из-за соотношения стоимости и эффективности. Особенно предпочтительны АКБ глубокого разряда, эффективность и срок службы которых практически не снижаются в течение жизненного цикла. Наиболее распространены свинцово-кислотные и литий-ионные аккумуляторы. Основным преимуществом литий-ионных аккумуляторов является более высокая эффективность к концу срока службы (78 % по сравнению с 70 % свинцово-кислотных аккумуляторов), а также более высокая плотность энергии. Однако их стоимость

более чем вдвое превышает стоимость свинцово-кислотных аккумуляторов. Для минимизации начальных затрат и снижения стоимости электроэнергии в исследовании был выбран свинцово-кислотный 12 В АКБ емкостью 100 А · ч.

2. PV-преобразователи. Для максимальной выработки электроэнергии при помощи солнечных фотопреобразователей необходимо учитывать изменение положения солнца в течение года. Наиболее эффективным является изменение угла наклона солнечных панелей каждый месяц. В случае отсутствия возможности изменять угол наклона панелей необходимо выбрать оптимальный угол, который бы позволил максимизировать выработку в любое время года. Для нахождения оптимального угла наклона используются данные о местоположении объекта (долгота, широта), времени года (количество дней с начала года), высота над уровнем моря и азимут рассматриваемой локации. В работе был рассмотрен угол наклона солнечных панелей 43° как наиболее оптимальный для падающего на поверхность ФЭП-элемента солнечного излучения в течение всего года в рассматриваемом регионе. Технико-экономические характеристики используемых в моделировании солнечных элементов взяты в виде усредненных технических параметров моделей, представленных на рынке в пределах одной ценовой категории (табл. 1).

3. Инвертор необходим для эффективного соединения источников переменного (в виде

Табл. 1. Технические параметры солнечного модуля
 Tab. 1. Technical parameters of photovoltaic module

Параметр	Значение
Угол наклона массива солнечных панелей	43°
Коэффициент отражения поверхности земли	20 %
Температурный коэффициент мощности	-0.3 %/°C
Номинальная рабочая температура	38.8 °C
Ток в рабочей точке (I_{mp})	8.86 A
Напряжение в рабочей точке (V_{mp})	36.74 V
Ток короткого замыкания (I_{sc})	9.4 A
Напряжение холостого хода (V_{oc})	44.1 V

дизельного генератора или сети) и постоянного тока (в виде PV-модулей).

4. *Дизельный генератор.* Исходя из непостоянства генерации при помощи PV-элементов, в работе возникла необходимость в дополнительном источнике энергии. В качестве такого источника был выбран дизельный генератор мощностью 3.0 кВт (исходя из минимальной потребительской нагрузки). Стоимость 1 л дизельного топлива в Республике Армения была взята 1.07 \$ (по состоянию на 20.01.2023).

Результаты. Финальная конфигурация рассматриваемой системы представлена в табл. 2. В ходе моделирования HOMER Pro смоделировала 4348 вариантов комбинации компонентов системы с различными параметрами, из них 1478 вариантов были отсеяны в связи с низкими показателями энергетической и экономической эффективности. Оценка энергетического потенциала осуществлялась из условия способности компонентов гибридной системы

обеспечить выработку для закрытия установленной потребительской нагрузки. Экономическая эффективность оценивалась исходя из наименьшей приведенной стоимости (NPC) конфигурации системы и наименьшей стоимости электроэнергии (Levelized Cost of Energy – LCOE) в рассматриваемой. Оптимальная система состоит из следующих компонентов: массив PV-элементов мощностью 4.5 кВт; дизельный генератор мощностью 3 кВт; инвертор 4 кВт и АКБ 12 В 100 А · ч. Исходя из результатов, представленных в табл. 3, видно, что вклад ВИЭ можно увеличить, расширив массив солнечных панелей. Однако фокусировка на расширении солнечного массива ведет к увеличению затрат на строительство и эксплуатацию системы. С ростом мощности солнечного массива (B2–B5) увеличивается и избыточная генерируемая энергия, что вызвано ограничением системы накопления электроэнергии. Таким образом, растет и избыток электроэнергии, генерируемый ВИЭ.

Табл. 2. Компоненты рассматриваемой системы и их параметры
 Tab. 2. Components and parameters of the simulated system

Компонент	Стоимость, \$/кВт	Стоимость замены, \$/кВт	Стоимость обслуживания, \$/кВт/год	Срок службы, лет	Эффективность, %
PV-модуль	250.0	250.0	0	25.0	90.0
Дизельный генератор	200.0	200.0	0.001	20.0	50.0
Инвертор	300.0	300.0	0	25.0	98.0
Свинцово-кислотная АКБ	200.0	200.0	10.0	15.0	70.0

Табл. 3. Конфигурации систем
 Tab. 3. Investigated system configurations

№	ФЭП, кВт	ДГУ, кВт	АКБ, кВт · ч	Инвертор, кВт	NPC, \$	Доля ВИЭ, %	Расход топлива, л/год	Стоимость электроэнергии, \$/кВт · ч	Избыток энергии, %
B1	4.5	3.0	1.0	4.0	94796	14.7	6187	0.321	14.2
B2	5.5	3.0	1.0	6.0	94683	15.4	6139	0.322	19.1
B3	7.5	3.0	1.0	7.5	95700	16.5	6064	0.325	24.3
B4	10.0	3.0	1.0	11.0	96789	17.5	6006	0.328	32.1
B5	15.0	3.0	1.0	15.0	98576	19.9	5835	0.334	43.7

Можно утверждать, что, несмотря на снижение общего времени работы дизельной генераторной установки (ДГУ) и, соответственно, потребления топлива, увеличение мощности солнечного массива без увеличения объема системы накопления электроэнергии не является эффективным решением повышения автономности системы. Большая разница между суммарной избыточной энергией и возобновляемым потенциалом связана со значительными просадками в генерации ВИЭ в осенне-зимний период и избытком генерации в летние месяцы.

На рис. 7–9 представлена выработка конфигурации В1 гибридной системы, состоящей из массива солнечных модулей общей мощностью 4.5 кВт; дизельного генератора мощностью 3 кВт; инвертора 4.5 кВт и АКБ 12 В 100 А · ч. На графике не отображена нагрузка системы АКБ, поскольку при общем ресурсе АКБ в 1.2 кВт · ч и потребительской нагрузке от 2.5 кВт накопленная энергия не задействуется.

Постоянная "подкачка" из АКБ привела бы к увеличению количества циклов заряда/разряда АКБ, что значительно сократило бы срок ее службы, даже при использовании оптимального параметра глубины разряда в 60 %. Общий годовой объем генерации массива солнечных элементов составил 19 469 кВт · ч, общая годовая генерация дизельного генератора составила 6711 кВт · ч, что соответствует 74.4 % и 25.6 % сгенерированного объема соответственно.

Рассматривая высокомоощную конфигурацию В5 с общей мощностью фотовольтаического массива 15 кВт, дизельным генератором на 3 кВт и 1 АКБ 12 В 100 А · ч, стоит отметить, что благодаря особенностям климата увеличенный массив солнечных элементов способен достигать пиковых показателей генерации в 11 кВт даже в зимний период. Пиковая выработка PV-массива в летние месяцы несколько ниже – 10 кВт, однако генерация при помощи фотовольтаических элементов начинается

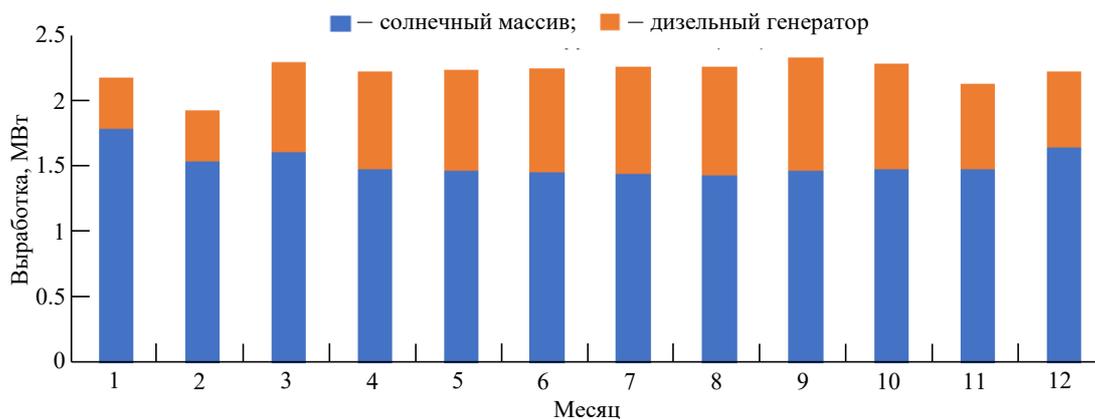


Рис. 7. Месячная выработка электроэнергии конфигурации В1
Fig. 7. Monthly electricity generation of B1 system configuration

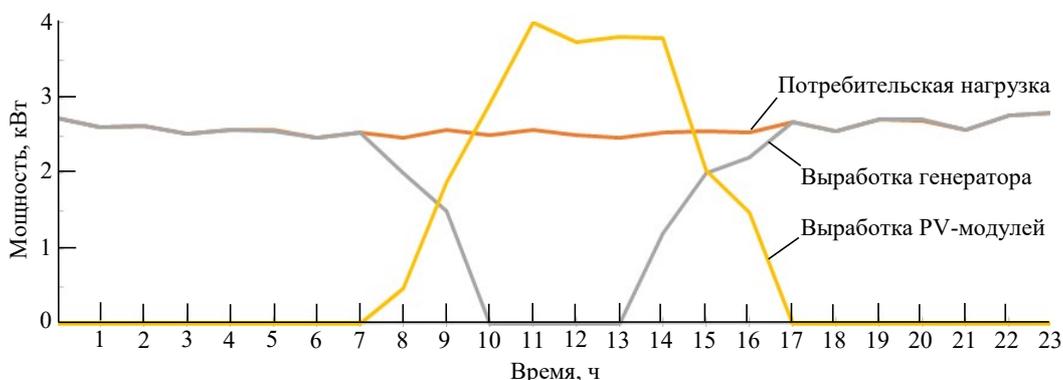


Рис. 8. Суточные выходные параметры конфигурации В1 в условиях 16 декабря
Fig. 8. Daily output parameters of B1 configuration on December 16

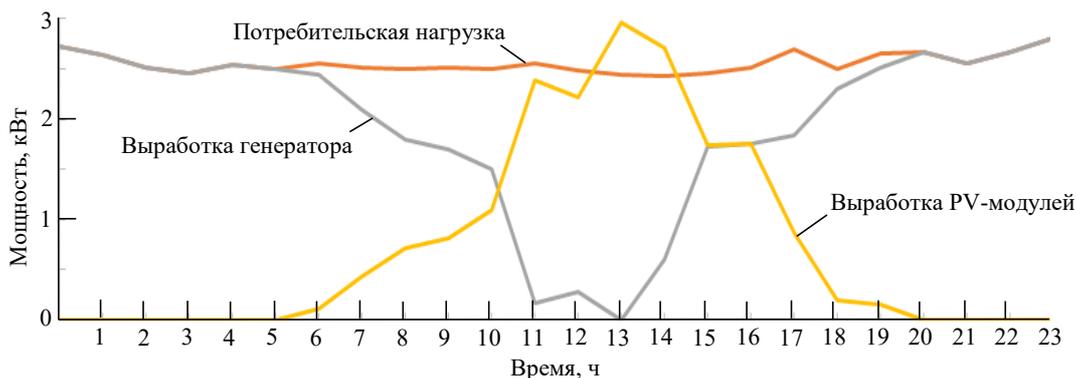


Рис. 9. Суточные выходные параметры конфигурации В1 в условиях 16 июля
 Fig. 9. Daily output parameters of B1 configuration on July 16

раньше (с 5:00) и заканчивается позже (около 20:00) (рис. 11). Увеличенный период работы солнечных элементов в летнее время с 5:00 до 20:00, связанный с продолжительностью светового дня, позволяет повысить суммарную выработку электроэнергии (рис. 9). По сравнению с зимним периодом период работы солнечных элементов дольше в среднем на 4.5 ч (рис. 11, 12).

При анализе рис. 7, 10 заметны периоды

максимальной и минимальной выработки в течение года. В конфигурациях В1 и В5 выработка солнечного модуля была минимальна в апреле, мае и декабре, что соответствовало усредненному показателю среднесуточной выработки в 1.40, 1.42, 1.4 кВт для конфигурации В1 и 4.62, 4.62, 4.60 кВт для конфигурации В5. Данные просадки коррелируют с относительно низкими показателями инсоляции, а также с низкими показателями индекса чистоты неба.

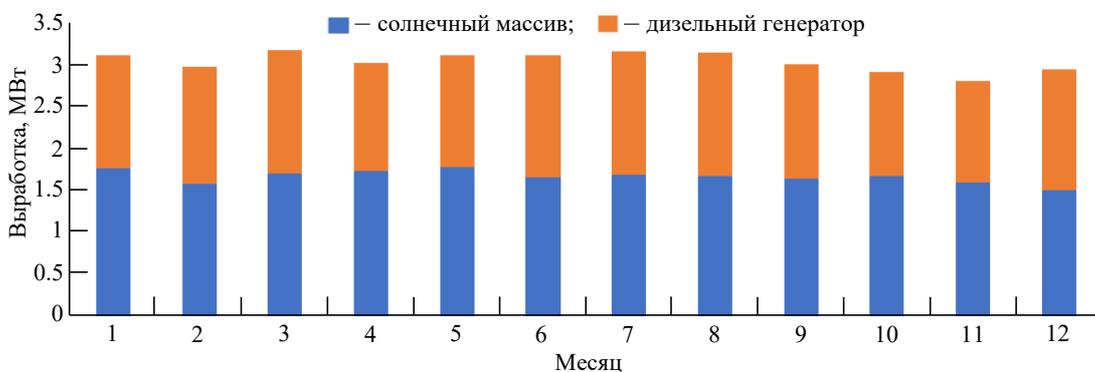


Рис. 10. Месячная выработка электроэнергии конфигурации В5
 Fig. 10. Monthly electricity generation of B5 system configuration

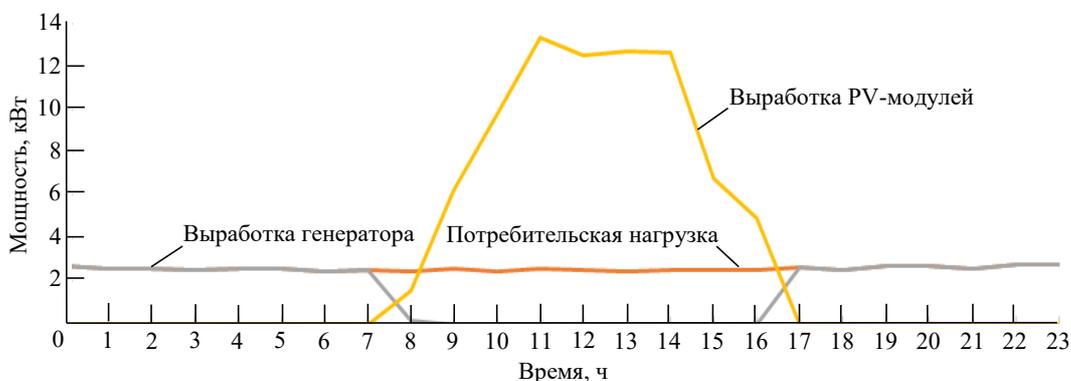


Рис. 11. Суточные выходные параметры конфигурации В5 в условиях 16 декабря
 Fig. 11. Daily output parameters of B5 configuration on December 16

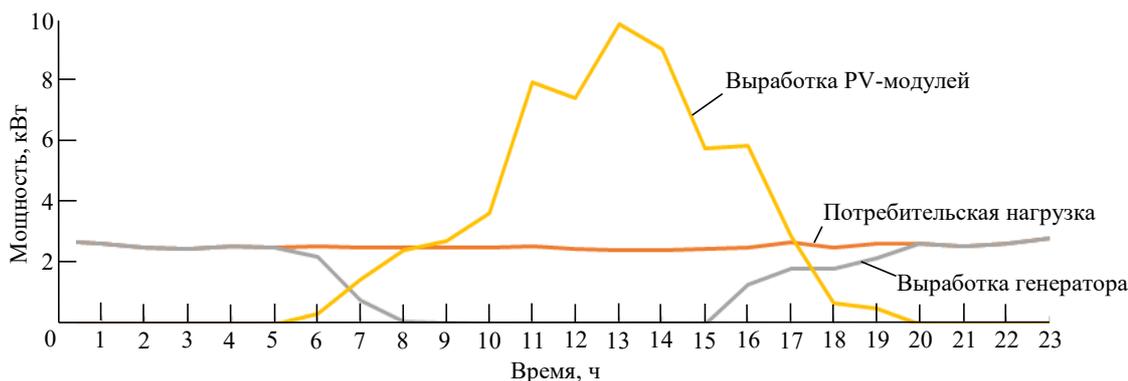


Рис. 12. Суточные выходные параметры конфигурации B5 в условиях 16 июля

Fig. 12. Daily output parameters of B5 configuration on July 16

На рис. 11, 12 представлены суточные выработки высокомощной конфигурации B5, обладающей мощностью массива солнечных элементов 15 кВт. Благодаря высокому солнечному потенциалу и увеличенной общей мощности массива солнечных элементов генерация электроэнергии значительно превышает потребительскую нагрузку, которая составляет в среднем 2.5 кВт · ч. На примере выработки одного дня зимнего периода (16 декабря) можно пронаблюдать, что генерация электроэнергии начинается около 7:00, достигает значения 13 кВт к 11:00, продолжается до 14:00, после чего идет на спад и останавливается к 17:00. Стоит отметить, что начало генерации совпадает со временем наступления навигационных сумерек 16 декабря – 07:14, пик генерации находится в районе времени нахождения солнца в зените – 12:58, а конец генерации заканчивается с началом астрономических сумерек – 18:09 [15].

В летний период, на примере суточной выработки 16 июля, зависимость генерации от

времени суток схожа с конфигурацией B1: генерация электроэнергии при помощи PV-элементов начинается около 5:00, достигает максимума в районе 10 кВт к 12:00, пиковая генерация продолжается до 15:00, после чего постепенно снижется в течение нескольких часов, к 19:00 генерация электроэнергии заканчивается. Генерация начинается в 05:15 – время утренних гражданских сумерек (интервал угла нахождения солнца под горизонтом от 0 до 6°), Солнце находится в зените в 13:09, что также соответствует периоду пиковой генерации, окончание генерации совпадает со временем захода солнца – 20:30 [14].

На основе полученных данных о выработке электроэнергии при помощи PV-элементов среднесуточные показатели выработки составляют от 31 до 40 % для конфигурации мощностью 4.5 кВт (B1) и от 30 до 40 % для конфигурации мощностью 15 кВт (B5), которые представлены на рис. 13–15. Расчет среднесуточных показателей выработки выполнялся исходя из

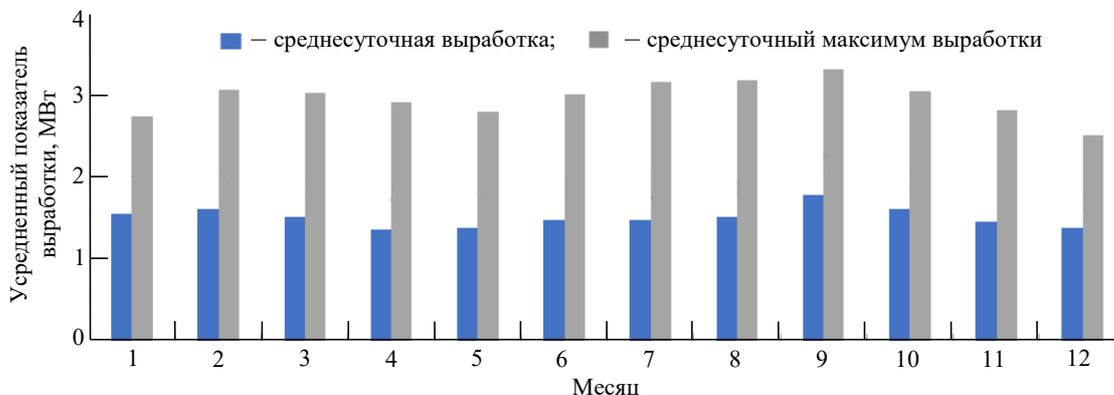


Рис. 13. Среднесуточные выходные параметры системы солнечных фотопреобразователей конфигурации B1

Fig. 13. Average daily output parameters of the photovoltaic system in configuration B1

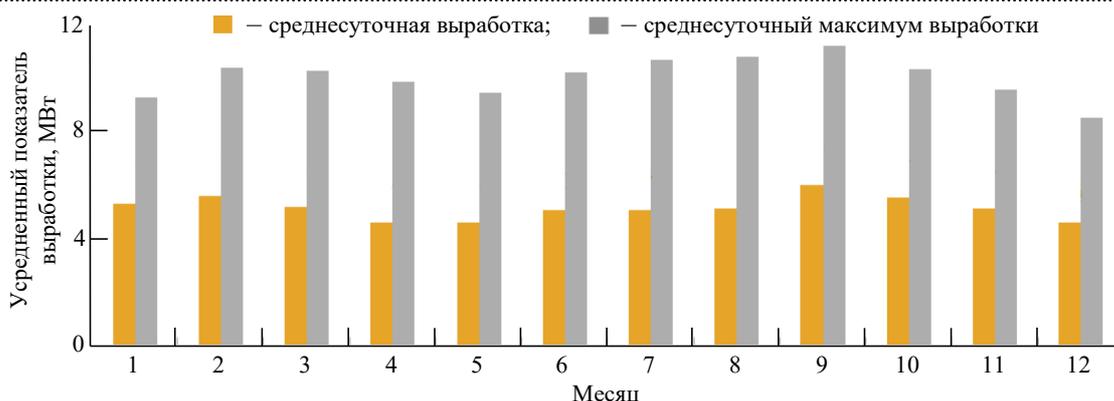


Рис. 14. Среднесуточные выходные параметры системы солнечных фотопреобразователей конфигурации B5
 Fig. 14. Average daily output parameters of the photovoltaic system in configuration B5

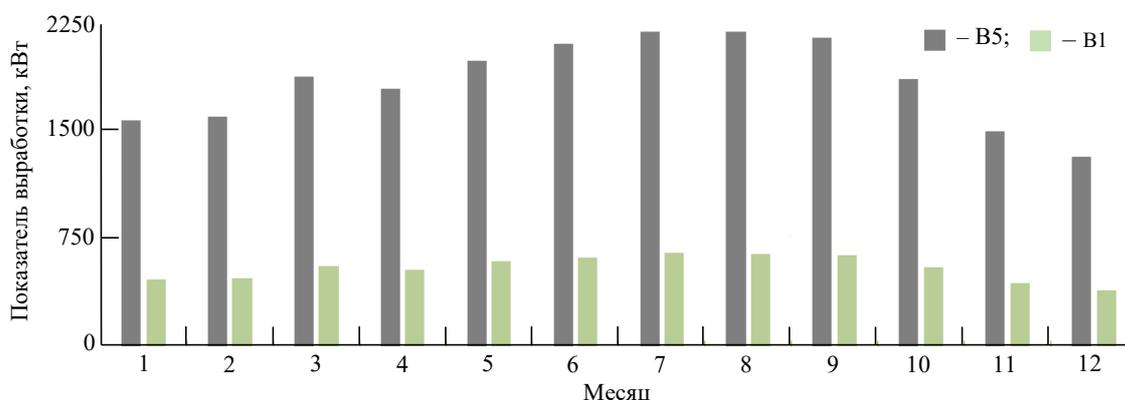


Рис. 15. Суммарная выработка за месяц солнечных массивов конфигураций B1 (4.5 кВт) и B5 (15 кВт)
 Fig. 15. Monthly total output of solar arrays of configuration B1 (4.5 kW) and B5 (15 kW)

продолжительности светового дня (периода генерации электроэнергии PV-модулями). Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения нагрузки в начале светового дня и его завершении необходим дополнительный источник питания, способный дополнять низкую генерацию в периоды малой солнечной активности.

В табл. 4 представлены результаты моделирования условий без ограничения по финансовым составляющим, что позволяет использовать компоненты больших мощностей. Стоит отметить, что с увеличением массива PV-панелей не

всегда происходит снижение стоимости электроэнергии (B8). Существует определенная точка в зависимости общей мощности массива PV-элементов и стоимости электроэнергии. При дальнейшем расширении системы происходит значительное увеличение стоимости электроэнергии. Это связано с ростом начальных капиталовложений, необходимых для масштабирования массива PV-компонентов. Стоит отметить вышеупомянутую зависимость роста избытков электроэнергии от увеличения общей мощности установленных PV-элементов. Для продления срока жизни компонентов системы накопления

Табл. 4. Конфигурации систем с неограниченным бюджетом

Tab. 4. System configurations with unlimited budget

№	ФЭП, кВт	ДГУ, кВт	АКБ, кВт·ч	Инвертор, кВт	NPС, \$	Доля ВИЭ, %	Расход топлива, л/год	Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	Избыток энергии, %
B6	12.0	3.0	11.0	12.0	79094	37.8	4359	0.268	29.7
B7	15.0	3.0	12.0	15.0	79383	39.0	4275	0.269	36.0
B8	20.0	3.0	20.0	20.0	8557	46.7	3920	0.277	43.7
B9	26.7	5.0	-	30	134590	69.5	5639	0.362	59.9
B10	53.1	3.0	150	53.5	112796	97.1	212	0.382	67.4

электроэнергии установлено значение максимальной глубины разряда – 60 %. При внедрении искусственного ограничения на глубину разряда системы АКБ и количество циклов заряда/разряда увеличивается общий объем системы накопления энергии и, соответственно, число АКБ. Таким образом, вместе с увеличением суммарной мощности солнечных фотопреобразователей необходимо увеличение системы накопления энергии. Комбинированный эффект увеличенной стоимости составляющих системы уже в большей степени оказывает влияние на стоимость электроэнергии.

Заключение. В ходе исследования был проведен анализ возобновляемого потенциала Республики Армения. На территорию страны поступает большое количество солнечной радиации – $1720 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а также в республике активными темпами ведется инвестирование и развитие отрасли солнечной энергетики. Составленные критерии оценки пригодных территорий для внедрения СЭС позволили выделить наиболее перспективные регионы для последующего моделирования условий эксплуатации СЭС. Рассмотренные регионы входят в области повышенного фотовольтаического потенциала, оценка которого была проведена Фондом возобновляемых ресурсов и энергоэффективности Армении (R2E2).

На основе проведенного анализа возобновляемого потенциала было принято решение выполнить моделирование условий эксплуатации СЭС для автономного энергоснабжения БССС. С использованием данных о потребительской нагрузке сотовой станции, которая в среднем составляла $2.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, и программного обеспечения HOMER Pro была сформирована компонентная база для моделирования автономной СЭС, для которой наиболее выгодным с точки зрения технико-экономических параметров является конфигурация гибридной СЭС с использованием массива солнечных элементов мощностью 4.5 кВт и дизельного генератора мощностью 3.0 кВт . Основными параметрами, по которым оценивалась эффективность системы, являлись приведенная стоимость системы, вклад возобновляемых источников в генерацию электроэнергии, расход топлива и стоимость произведенной электроэнергии. Для рассчитан-

ной конфигурации общая приведенная стоимость составила $94\,796 \text{ \$}$, стоимость электроэнергии – $0.321 \text{ \$/кВт} \cdot \text{ч}$, расход топлива – 6187 л/год .

Для определения наиболее оптимальной конфигурации гибридной СЭС в исследовании были смоделированы конфигурации с расширенной системой накопления электроэнергии (табл. 4). Наиболее выигрышной конфигурацией является гибридная СЭС с общей мощностью солнечного массива 12.0 кВт , дизельным генератором мощностью 3.0 кВт и системой накопления электроэнергии $11.0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Стоимость электроэнергии данной конфигурации составила $0.268 \text{ \$/кВт} \cdot \text{ч}$, а общая приведенная стоимость системы $79\,094 \text{ \$}$. Благодаря большому вкладу PV ВИЭ в генерацию электроэнергии и накопителям энергии расход топлива удалось сократить до 4359 л/год , что на 1828 л меньше (29.5%) конфигурации без накопителей электроэнергии. Сокращение расходов дизельного топлива позволяет сэкономить $1956 \text{ \$}$ в год.

Таким образом, при постановке задачи об использовании ВИЭ для повышения автономности электроснабжения отдельных объектов возможно рассмотреть два примера. Конфигурация В9, которая не содержит системы накопления электроэнергии, с 26.7 кВт PV-массивом, 5.0 кВт дизельным генератором и инверторной системой на 30.0 кВт . За счет сокращения системы накопления электроэнергии повышается общее время работы генератора: ночное время, периоды низкой выработки фотовольтаических элементов. Стоит отметить, что в такой конфигурации дизельный генератор был задействован в летнее время в большей степени – это обусловлено необходимостью генерации достаточного количества электроэнергии при нехватке выработки солнечными элементами. В такие периоды нагрузка ДГУ составляла от 30 до 50% от общей мощности генератора. Очевидно, что даже при минимальной нагрузке с увеличением продолжительности работы ДГУ растет и расход топлива, а общий эксплуатационный ресурс снижается.

За счет увеличения массива солнечных элементов на примере В10 с показателем доли генерации электроэнергии при помощи ВИЭ

97.1 % возможно добиться практически полного покрытия потребительской нагрузки при помощи солнечной электроэнергии. Однако оставшиеся проценты представляют собой пе-

риоды низкой солнечной активности в течение года, что вынуждает использовать вспомогательный источник электроэнергии в виде ДГУ.

Авторский вклад

Костик Никита Русланович – литературный обзор; исследование климатических особенностей региона; анализ данных; моделирование условий эксплуатации систем; подбор компонентов для моделирования систем; оптимизация результатов; оформление материала статьи и выводов по исследованию.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями.

Айвазян Гагик Ерджаникович – сбор и анализ данных о потребительской нагрузке рассматриваемых систем; сбор данных о географическом положении рассматриваемого региона исследований; консультация о метеорологических, географических, социоэкономических особенностях Республики Армении.

Author's contribution

Nikita R. Kostik, literature review; study of the climatic features of the region; data analysis; modeling of operating conditions for systems; selection of components for modeling systems; optimization of results; preparation of the article material and conclusions of the study.

Sergey A. Tarasov, definition of research scope; discussing the results; supervising scientific research.

Gagik Ye. Aivasyan, collection and analysis of data of consumption load of the investigated systems; data collection of the study region; consultation on meteorological, geographical, socio-economic features of the Republic of Armenia.

Список литературы

1. Маркаров А. А., Давтян В. С. Развитие возобновляемой энергетики в Армении: вызовы диверсификации // Геоэкономика энергетики. 2021. № 3 (15). С. 116–129. doi: 10.48137/2687-0703_2020_15_3_116

2. Давтян В. С., Тевосян О. Тенденции развития энергетической политики Армении. Ереван: Фонд Конрада Аденауэра, 2019. С. 97–98.

3. Аршакаян Д. Т. Особенности развития энергетики Республики Армения при суверенизации и рыночной экономике // Теплоэнергетика. 1995. № 2. С. 74–77.

4. Тиробян К. Г. Армения, устремленная в будущее: солнечная энергетика, перспективы и проблемы // Современные тенденции в развитии экономики энергетики: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 03 дек. 2021. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2022. С. 179.

5. Программа деятельности Правительства Республики Армения, 2019. Приложение к Решению Правительства РА № 65-А. URL: <https://www.gov.am/files/docs/3133.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

6. Feasibility Study 55 MWp Masrik 1 PV Plant Mets Masrik (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-1-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

7. Feasibility Study 19.4MWp Masrik 2 PV Plant Vardenis, Gegharkunik Marz (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-2-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

8. Feasibility Study 15.24MWp Gagarin PV Plant Hrazdan-Kotayk (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Gagarin-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

9. Feasibility Study 12.5MWp Talin 2 PV Plant Archadzor-Talin (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Talin-2-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

10. Feasibility Study 5.5MWp Merdzavan PV Plant Merdzavan (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Merdzavan-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

11. Feasibility Study 12.5MWp Dashtadem 1 PV Plant dashtademtalin (Armenia). 2017. URL: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Dashtadem-1-FS-Eng.pdf> (дата обращения 22.01.2023)

12. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands / G. A. Barron-Gafford, M. A. Pavao-Zuckerman, R. L. Minor, L. F. Sutter, I. Barnett-Moreno, D. T. Blackett, M. Thompson, K. Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan, J. E. Macknick // Nature Sustainability. 2019. № 2. P. 848–855. doi: 10.1038/s41893-019-0364-5

13. Parthiban R., Ponnambalam P. An Enhancement of the Solar Panel Efficiency: A Comprehensive Review // Front. Energy Res. 2022. Vol. 10. Art. no. 937155. doi: 10.3389/fenrg.2022.937155

14. Movsisyan A. Investment Plan for Armenia, Scaling UP Renewable Energy Program (SREP). URL: https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Armenia%20SREP%20Investment%20Plan_final.pdf (дата обращения 22.01.2023)

15. Жаров В. Е. Сферическая астрономия. Фрязино: Век 2, 2006. С. 96.

Информация об авторах

Костик Никита Русланович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), аспирант 4-го года обучения по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии", ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агривольтаика; возобновляемая энергетика; фотовольтаика. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: nrkostik@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; физика и оптика полупроводников; светоизлучающие и фоточувствительные приборы. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: satarasov@etu.ru

Айвазян Гагик Ерджаникович – кандидат технических наук (1988), доцент (1995), заведующий лабораторией "Оптоэлектронные приборы" Национального политехнического университета Армении. Автор более 90 научных публикаций. Сфера научных интересов – микроэлектроника; солнечная энергетика; фоточувствительные приборы; кремниевые наноструктуры. Адрес: Национальный политехнический университет Армении, ул. Теряна, д. 105, 0009, Ереван, Армения
E-mail: agagarm@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-9245-6758>

References

1. Markarov A. A., Davtjan V. S. Renewable Energy Development in Armenia: Challenges to Diversification. *Geoeconomics of Energy*. 2021, no. 3 (15), pp. 116–129. doi: 10.48137/2687-0703_2020_15_3_116 (In Russ.)
2. Davtjan V. S., Tevosjan O. *Tendencii razvitiya jenergeticheskoj politiki Armenii* [Trends in the Development of the Energy Policy of Armenia]. Yerevan, Konrad Adenauer Foundation, 2019, pp. 97–98. (In Russ.)
3. Arshakjan D. T. *Osobennosti razvitiya jenergetiki Respubliki Armenija pri suverenizacii i rynochnoj jekonomike* [Peculiarities of Energy Development in the Republic of Armenia under Sovereignization and Market Economy]. *Teplotjenergetika*. 1995, no. 2. pp. 74–77. (In Russ.)
4. Tirobjan K.G. *Ustremennaja v budushhee: solnechnaja jenergetika, perspektivy i problemy. Sovremennye tendencii v razvitiu jekonomiki jenergetiki* [Armenia looking to the future: solar energy, prospects and problems. Modern trends in the development of energy economics]. Proc. of the II Intern. Scientific and Practical Conf. Minsk, December 3, 2021. Minsk, Belarusian National Technical University, 2022, p. 179. (In Russ.)
5. *Programma dejatel'nosti Pravitel'stva Respubliki Armenija* [Program of Activities of the Government of the Republic of Armenia]. Annex to the Decision of the Government of the Republic of Armenia No. 65-A. Available at: <https://www.gov.am/files/docs/3133.pdf> (accessed 22.01.2023)
6. Feasibility Study 55MWp Masrik 1 PV Plant Mets Masrik (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-1-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
7. Feasibility Study 19.4MWp Masrik 2 PV Plant Vardenis, Gegharkunik Marz (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Masrik-2-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
8. Feasibility Study 15.24MWp Gagarin PV Plant Hrazdan-Kotayk (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Gagarin-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
9. Feasibility Study 12.5MWp Talin 2 PV Plant Archadzor-Talin (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Talin-2-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
10. Feasibility Study 5.5MWp Merdzavan PV Plant Merdzavan (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Merdzavan-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
11. Feasibility Study 12.5MWp Dashtadem 1 PV Plant Dashtadementalin (Armenia). 2017. Available at: <https://r2e2.am/wp-content/uploads/2017/11/Dashtadem-1-FS-Eng.pdf> (accessed 22.01.2023)
12. Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L., Sutter L. F., Barnett-Moreno I., Blackett D. T., Thompson M., Dimond K., Gerlak A. K., Nabhan G. P., Macknick J. E. Agrivoltaics Provide Mutual Benefits Across the Food–Energy–Water Nexus in Drylands. *Nature Sustainability*. 2019, no. 2, pp. 848–855. doi: 10.1038/s41893-019-0364-5

13. Parthiban R., Ponnambalam P. An Enhancement of the Solar Panel Efficiency: A Comprehensive Review. *Front. Energy Res.* 2022, vol. 10, art. no. 937155. doi: 10.3389/fenrg.2022.937155

14. Movsissyan A. Investment Plan for Armenia, Scaling UP Renewable Energy Program (SREP). Available at: <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Armeni>

a%20SREP%20Investment%20Plan_final.pdf (accessed 22.01.2023)

15. Zharov V. E. *Voshod i zahod nebesnyh tel. Sfericheskaja astronomija* [Spherical Astronomy. Rise and Set of Celestial Bodies]. Fryazino, Century 2, 2006, p. 96. (In Russ.)

Information about the authors

Nikita R. Kostik, Master Degree in Electronics and Nanoelectronics (2019), 4-year Postgraduate Student in Photonics, instrumentation, optical and biotechnical systems and technologies (2023), Assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics, agrivoltaics; renewable energy; photovoltaics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: nrkostik@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2016), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific papers. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; physics and optics of semiconductors; light-emitting and photosensitive devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: satarasov@etu.ru

Gagik Ye. Ayvasyan, Cand. Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1995), Head of "Optoelectronic Devices laboratory" of the National Polytechnic University of Armenia. The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; solar energy; photosensitive devices; silicon nanostructures.

Address: National Polytechnic University of Armenia, 105, Teryan St., Yerevan 0009, Armenia

E-mail: agagarm@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0001-9245-6758>
