

А.Г. АЙВАЗЯН, Н.Р. КОСТИК, С.А. ТАРАСОВ, С.Х. ХУДАВЕРДЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ–ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ**

С помощью компьютерной программы HOMER исследованы экономические и технические особенности электропитания базовых станций мобильной связи на основе гибридной солнечной-дизельной системы. Основным требованием к этой системе является исключение возможности вероятности сброса нагрузки за годовой эксплуатационный период. Определены оптимальные характеристики фотовольтаических (солнечных) станций, дизель-генераторов и вспомогательных устройств (преобразователь, аккумуляторная батарея и др.). Представлены рекомендации по практической реализации гибридной солнечной-дизельной системы для автономной генерации электроэнергии.

**Ключевые слова:** базовая станция, дизель-генератор, фотовольтаическая (солнечная) станция, моделирование.

**Введение.** Использование автономных систем электропитания в базовых станциях (БС) сотовой связи обусловлено, в основном, техническими и финансовыми проблемами их подключения к традиционным источникам энергии, поскольку станции часто расположены на большом расстоянии от единой распределительной электрической сети, в труднодоступных местах (холмы, долины, леса и т.д.) [1]. В большинстве случаев автономное электропитание БС осуществляется с помощью дизель-генераторов (ДГ) [2, 3]. Современные ДГ имеют высокий уровень надежности и автоматизации. Однако главный их недостаток – большой расход дизельного топлива, которое еще необходимо доставлять в удаленные БС. Для различных типов ДГ удельный расход топлива в номинальном режиме, согласно паспортным характеристикам, составляет 210...280 г/кВт·ч и с уменьшением нагрузки ДГ имеет тенденцию к возрастанию. Кроме того, на расход топлива влияют техническое состояние двигателя, качество топлива и высота местности над уровнем моря.

В некоторых случаях в качестве альтернативы ДГ используют фотовольтаические (солнечные) станции (ФС) электропитания [4-6]. Преимуществами ФС являются экологичность, безопасность, бесшумность, надежность, длительный срок безаварийной службы и низкие эксплуатационные затраты. Солнечное электропитание БС сотовой связи имеет некоторые специфические особенности, связанные с необходимостью более эффективной генерации электро-

энергии и бесперебойного энергоснабжения БС. Основная трудность – стохастический характер нагрузки БС и энергии, генерируемой ФС. Это требует присутствия буферного накопителя энергии и специализированной системы удаленного мониторинга. Отметим также, что на сегодняшний день стоимость ФС выше стоимости традиционных источников энергии, в том числе вырабатываемой ДГ.

Вышесказанное заставляет разработчиков систем электропитания БС искать новые и совершенствовать известные технические решения, обеспечивающие повышение эффективности, производительности и снижение себестоимости генерируемой энергии, одновременно исключая возможность вероятности сброса нагрузки (LLP, loss of load probability) [7]. В этой ситуации оптимальное решение состоит в применении гибридных систем, в которых ДГ используются в сочетании с ФС [8-10]. Подобные системы становятся актуальными ввиду непрерывного роста цен на топливо ДГ, в то время как цена на ФС постоянно снижается. К тому же солнечная энергетика в Армении имеет большие перспективы с точки зрения ресурсов солнечного излучения и благоприятной инвестиционной среды [11].

При разработке гибридных ДГ–ФС систем следует максимально учитывать реальные условия эксплуатации, в том числе метеорологические и географические показатели, технические характеристики, масштабность и сроки использования, финансово-экономические показатели ДГ, ФС и их вспомогательных устройств (BOS, balance-of-system) [12-14]. С технической точки зрения, необходимо обеспечить эффективное сопряжение ДГ и ФС, а также согласовать режимы генерации энергии, особенно в периоды пиков энергетической нагрузки. Эффективным инструментом учета всех этих факторов и решения многокритериальной оптимизационной задачи является компьютерное моделирование.

В данной работе проведены моделирование и выбор оптимальной конфигурации гибридной ДГ–ФС системы электропитания БС мобильной связи.

**Программа моделирования.** В настоящее время существует широкий спектр компьютерных программ, предназначенных для решения оптимизационных задач гибридных энергосистем, среди которых в качестве наиболее популярных можно выделить Hybrid optimization by genesis algorithm (HOGA, Испания), Hybrid optimization modeling software (HOMER, США), Hybrid power optimized for rural/remote areas (HYPORA, США), PV system simulation (Швейцария). Критический обзор этих программ представлен в работе [15]. Нами был использован программный продукт HOMER (версия Pro 3), разработанный Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL) для проверки экономической и технической жизнеспособности различных конфигураций энергосистем [16].

HOMER содержит библиотеку компонентов энергосистем, включая как классические, так и энергооборудования на базе возобновляемых источников энергии, в том числе ДГ и ФС. В качестве входных данных используются технические характеристики компонентов, а также текущая информация о природных ресурсах, таких как солнечная радиация, температура, скорость ветра в зоне расположения исследуемого объекта. Программа состоит из трех блоков: 1) *симуляция*: моделирование системы для всех возможных комбинаций энергооборудования и условий эксплуатации; 2) *оптимизация*: моделирование системы в соответствии с критериями, в частности, экономической оптимизации, либо уменьшение расходов на топливо; 3) *анализ чувствительности*: моделирование влияния переменных, таких как скорость ветра, стоимость топлива и т.д., для оценки их влияния на оптимальность гибридной системы.

При моделировании основным требованием было исключение LLP за годовой период эксплуатации. Ограничением служило условие, согласно которому годовой вклад ФС должен составить не менее 14% от общего объема выработки энергии. Искомыми переменными оптимизационной задачи являются масштабность и технические характеристики компонентов гибридной системы. В качестве целевых показателей использованы параметры “чистая приведенная стоимость” (NPS, net present cost) электроэнергии и “нормированная стоимость электроэнергии” (LCOE, levelized cost of energy). Первый из них зависит от установочной мощности, стоимости и экономических параметров компонентов системы и характеризует стоимость всего жизненного цикла системы по формуле [14]

$$NPS = \sum_t^i \frac{R_t}{(1+i)^t} \rightarrow \min,$$

где  $R_t$  – общие затраты за период эксплуатации;  $t$  – период эксплуатации системы (применялся  $t = 25$  лет);  $i$  – средства, которые возможно вернуть в процессе эксплуатации.

LCOE характеризует экономическую целесообразность гибридной системы по сравнению с традиционными источниками электричества и определяется по формуле [14]

$$LCOE = \frac{Cap + Main}{E_{year}} \rightarrow \min,$$

где  $Cap$  – общие капитальные затраты на проект;  $Main$  – стоимость технического обслуживания;  $E_{year}$  – годовой объем электроэнергии, генерируемой гибридной системой.

Эти показатели минимизируются с помощью инструмента оптимизации HOMER, который имитирует многофакторные компоненты системы для достижения оптимальной конфигурации гибридной системы.

**Объект моделирования.** Исходя из климатического анализа и оценки солнечного потенциала в республике, в качестве условного объекта была выбрана макро-БС сотовой связи, находящаяся в районе с. Цовинар Гегаркуникского марза РА. Данный регион демонстрирует средние по республике социально-экономические показатели, плотность населения и предпочтителен для внедрения гибридных энергосистем с точки зрения высокой интенсивности солнечного излучения [17].

На рис. 1 представлена общая архитектура моделируемой гибридной системы электропитания БС [4].

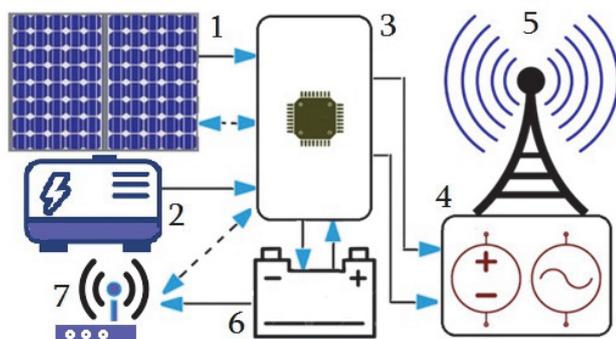


Рис. 1. Архитектура гибридной системы электропитания моделируемой БС

Выработанная с помощью ФС 1 и ДГ 2 электроэнергия подается на обратимый блок управления (БУ) 3, в котором интегрированы контроллер заряда, преобразователь токов, регулятор максимальной мощности и электронный узел блока удаленного мониторинга. Обратимость БУ обусловлена способностью направлять энергию в обоих направлениях. Сформированные напряжения подаются нагрузкам постоянного и переменного токов 4 БС мобильной связи 5. Избыток электроэнергии накапливается в свинцово-кислотных аккумуляторных батареях (АКБ) 6 и используется по мере необходимости. Контроль метеорологических показателей и электрических выходных параметров, а также исправности компонентов системы электропитания осуществляется блоком удаленного мониторинга 7.

На рис. 2 представлен реальный график изменения токовой нагрузки моделируемой БС в трехсуточный период при постоянном напряжении 48 В. На основе этих данных построен типичный суточный профиль потребляемой мощности БС (рис. 3). Для приближения моделирования к реальным условиям

эксплуатации в профиль нагрузки были внедрены случайные временные и суточные значения изменчивости нагрузки в пределах 2%. При максимальной нагрузке потребление мощности составляло 2,9 кВт, среднее значение мощности – 2,58 кВт, среднесуточная нагрузка – 61,98 кВт·ч/день.

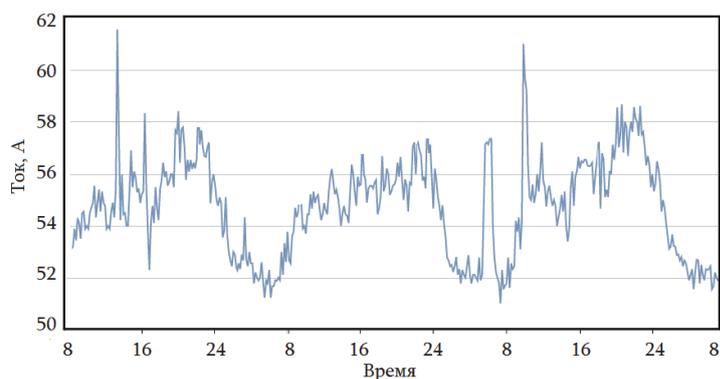


Рис. 2. График изменения токовой нагрузки БС в трехсуточный период

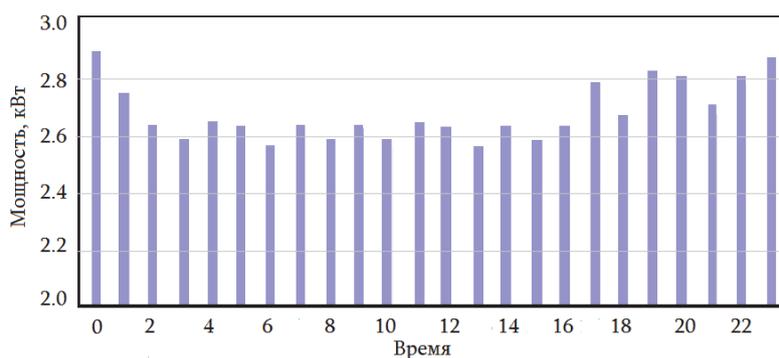


Рис. 3. Типичный суточный профиль потребляемой мощности БС

На первом этапе моделирования рассматривалась конфигурация гибридной системы электропитания с фиксированной мощностью ДГ в 3,0 кВт и общей емкостью АКБ в 100 А·ч, 12 В. Эти технические данные являются типичными для макро-БС. Угол наклона неподвижных солнечных панелей ФС принят равным 43°, что является оптимальным в рассматриваемом регионе за годовой период. На втором этапе моделирования проанализированы различные конфигурации гибридной системы электропитания без ограничения по финансовым составляющим, что позволяет использовать компоненты больших мощностей.

Входные климатологические данные взяты из базы данных NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) [18], которая является

информационной системой обращения HOMER. В этой базе в открытом доступе предоставляются суточные значения потоков солнечного излучения на верхней границе атмосферы и на уровне Земли, значения нисходящего потока длинноволнового излучения, температуры воздуха и земной поверхности, а также скорости ветра для каждого дня (суток) с 1 июля 1983 г. по настоящее время. Необходимые финансово-экономические данные (стоимость дизельного топлива и отдельных компонентов системы, капитальные вложения, затраты на техническое обслуживание и замену, эксплуатационные расходы, срок жизни проекта, ставка дисконтирования, уровень инфляции) были взяты из открытых источников по состоянию на 20.01.2023г. Для исходных технических характеристик компонентов гибридной системы использовались соответствующие технические спецификации.

**Результаты моделирования.** В ходе моделирования программа HOMER сгенерировала сотни конфигураций гибридных систем. По показателю NPC на первом этапе были выбраны и проанализированы наиболее приемлемые 5 вариантов конфигураций (В1...В5), а на втором этапе рассматривались различные конфигурации ДГ, ФС и АКБ (В6...В10). Отметим, что на первом этапе моделирования нагрузка АКБ не учитывалась, поскольку при общем ресурсе в  $1,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  и потребительской нагрузке от  $2,5 \text{ кВт}$  накопленная энергия не задействуется. Постоянная “подкачка” из батарей привела бы к увеличению количества циклов их заряда/разряда, что может значительно сократить срок службы АКБ, даже при использовании оптимального параметра глубины разряда на 60%.

Результаты двух этапов моделирования суммированы в табл. 1 и 2 соответственно. На рис. 4 и 5 представлена более подробная информация для вариантов конфигураций В1 и В5. На основе анализа представленных результатов можно отметить некоторые важные особенности и сформировать рекомендации для практического применения гибридных систем, а именно:

1. Включение ФС в состав гибридной системы обеспечивает значительное снижение моточасов работы ДГ, чем достигается сохранение их эксплуатационного ресурса и экономия дизельного топлива.

2. В гибридной системе вклад ФС в суммарной выработке электроэнергии можно значительно увеличить посредством расширения. Однако увеличение установочной мощности ФС ведет к возрастанию затрат на строительство и эксплуатацию системы. Тем самым увеличиваются NPC и стоимость электроэнергии.

3. Существует определенная точка в зависимости от установочной мощности ФС и стоимости электроэнергии, после чего дальнейшее расширение

ФС приводит к значительному увеличению стоимости электроэнергии. Это связано с ростом начальных капиталовложений, необходимых для масштабирования ФС. Кроме того, еще более существенным становится избыток электроэнергии.

4. Для обеспечения нагрузки в начале светового дня и по его завершении необходим дополнительный источник питания, способный дополнять низкую генерацию в периоды малой солнечной активности.

5. Несмотря на снижение общего времени моточасов ДГ, увеличение установочной мощности ФС без соответствующего изменения емкости АКБ не является эффективным решением повышения автономности гибридной системы.

6. Разница между суммарной генерируемой избыточной энергией и установочной мощностью ФС связана со значительными просадками в генерации энергии в осенне-зимний период и избытком генерации в летние месяцы. С ростом установочной мощности ФС избыточная энергия увеличивается, что вызвано ограниченной емкостью АКБ.

Таблица 1

Результаты моделирования гибридных систем на первом этапе

N	ФС, кВт	БК, кВт	NPC, \$	Доля ФС, %	Расход топлива, л/год	Стоимость энергии, \$/кВт·ч	Избыток энергии, %
B1	4.5	4.0	94796	14.7	6187	0.321	14.2
B2	5.5	6.0	94683	15.4	6139	0.322	19.1
B3	7.5	7.5	95700	16.5	6064	0.325	24.3
B4	10.0	11.0	96789	17.5	6006	0.328	32.1
B5	15.0	14.0	98496	19.9	5835	0.334	43.7

Таблица 2

Результаты моделирования гибридных систем на втором этапе

N	ФС, кВт	ДГ, кВт	АКБ, кВт·ч	БУ, кВт	NPC, \$	Доля ФС, %	Расход топлива л/год	Стоимость энергии, \$/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	-	30.0	134590	69.5	5639	0.362	59.9
B10	53.1	3.0	150.0	53.5	112796	97.1	212	0.382	67.4

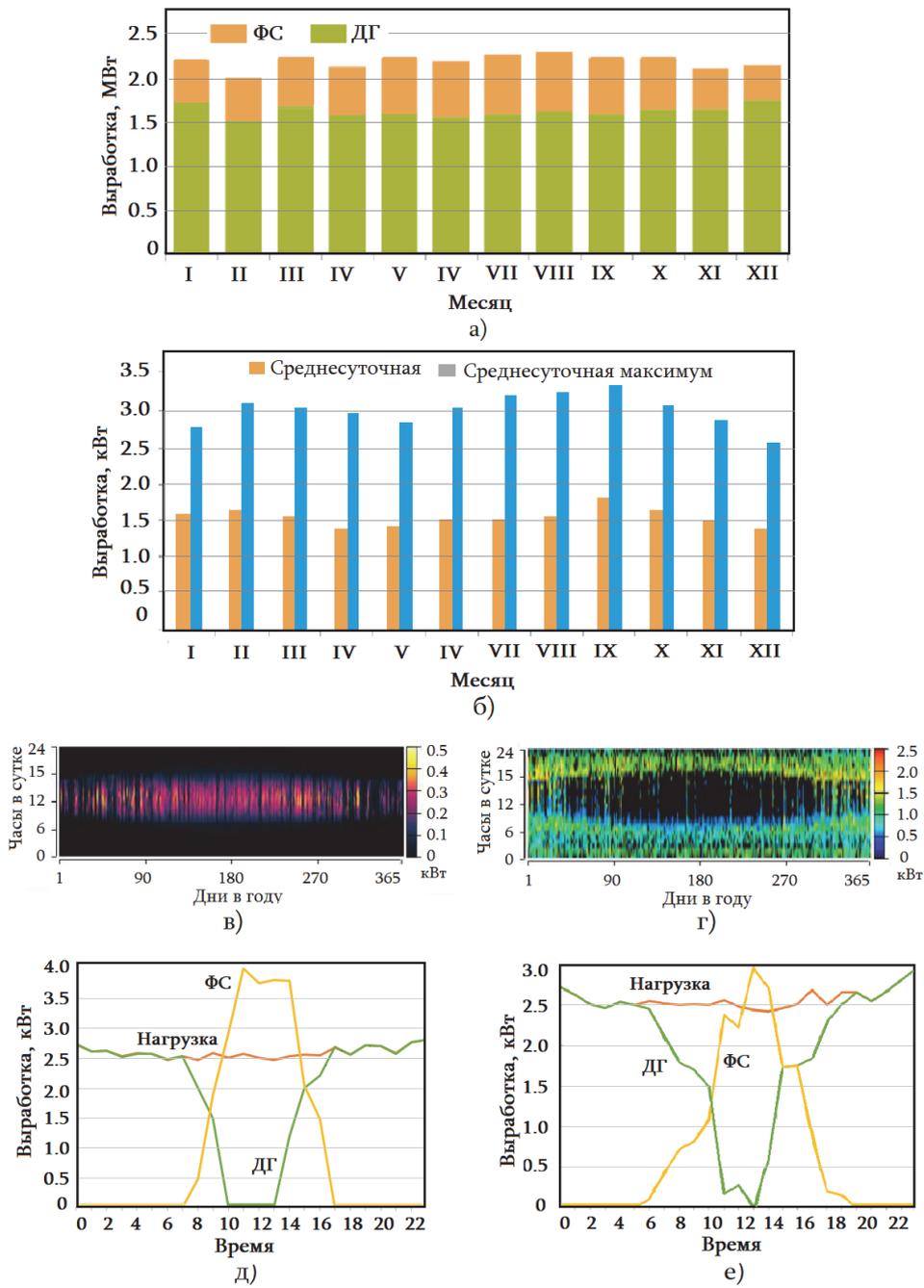


Рис. 4. Выработка электроэнергии для конфигурации В1: месячная (а); среднесуточная ФС по месяцам (б); суточная 2D картина в году для ФС (в) и ДГ (г); суточная в условиях 16 декабря (д) и 16 июля (е)

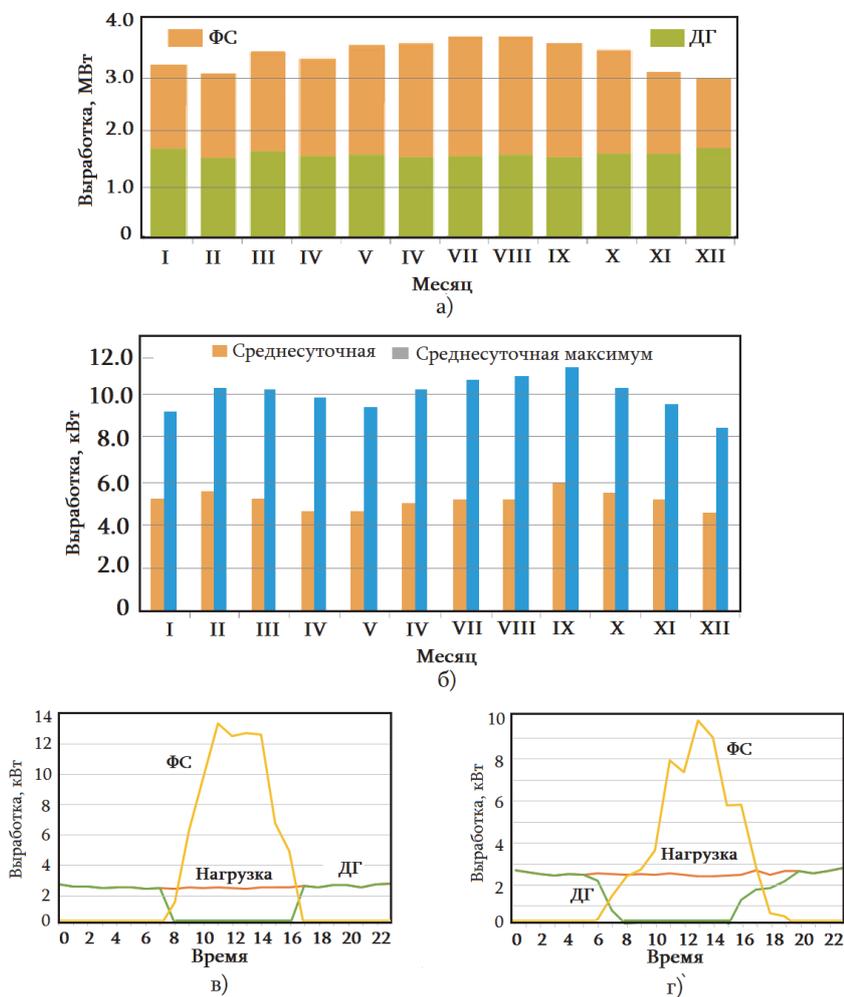


Рис. 5. Выработка электроэнергии для конфигурации B5: месячная (а); среднесуточная ФС по месяцам (б); суточная в условиях 16 декабря (в) и 16 июля (г)

7. Пиковые значения генерации энергии с помощью ФС наблюдаются в зимний период (по крайней мере, для вариантов конфигурации B1 и B5). Однако в летний период продолжительность функционирования ФС намного дольше, в результате чего возрастает суммарная выработка электроэнергии.

8. Для вариантов B1 и B5 программа предлагает использовать БУ с более низкой мощностью, чем мощности ФС. Это обстоятельство связано с тем, что за годовой период эксплуатации пиковые мощности ФС более чем на 1 кВт ниже установочных.

9. Наиболее оптимальными по низкому значению NPC являются варианты конфигурации B1 и B2. Это естественно, так как применяются относи-

тельно маломощные ФС и БК, удельные стоимости которых (соответственно 250 и 300 \$/кВт) выше, чем удельная стоимость ДГ (200 \$/кВт). С точки зрения низкого избытка энергии, предпочтительным является вариант В1. Однако в этом случае доля выработки электроэнергии ФС немного ниже, чем при варианте конфигурации В2.

**Заключение.** Таким образом, сочетание ДГ с ФС повышает качество энергоснабжения, сокращает потребление дизельного топлива, решает экологические проблемы. Представлены рекомендации по практической реализации гибридной солнечной-дизельной системы для автономной генерации электроэнергии. Для рассматриваемой БС сотовой связи выбрана оптимальная конфигурация гибридной системы электропитания.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке КН МОНКС РА в рамках научных проектов 10-4/22АА-2В001 и 21Т-2Н107.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Айвазян А.Г., Худавердян С.Х.** Анализ энергоэффективности базовых станций сотовой связи // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника.- 2021.- N1.- С. 94-103.
2. **Alsharif M.H., Kim J., Jin Hong Kim.** Green and Sustainable Cellular Base Stations: An Overview and Future Research Directions // Energies.- 2017.- N 10.- P. 587-604.
3. **Premalatha J., Nisha S.A.** Energy Competence of Base Station in Cellular Network // Int. J. of Recent Techn. and Eng.- 2019.- V.8 (2). – P. 2020-2023.
4. **Айвазян А.Г., Агабекян Д.В., Варданян А.А.** Солнечное электропитание базовых станций сотовой связи // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника.- 2020.- N2.- С. 107-113.
5. **Chamola A., Sikdar B.** Solar Powered Cellular Base Stations: Current Scenario Issues and Proposed Solutions // IEEE Commun. Mag.- 2016.- V. 54, N 5.- P. 108-114.
6. **Issaadi W., Khireddine A., Issaadi S.** Management of a Base Station of a Mobile Network using a Photovoltaic System // Renewable and Sustainable Energy Reviews.- 2016.- V. 59.- P. 1570-1590.
7. **Gbadamosia S., Nwulu N.** Reliability Assessment of Composite Generation and Transmission Expansion Planning Incorporating Renewable Energy Sources // J. of Renewable and Sustainable Energy.- 2020.- V. 12.- P. 026301.
8. **Iqbal A., Saad Bin Arif M., Khursheed Siddiqui.** Analysis of a Solar PV/battery/DG Set-based Hybrid System for a Typical Telecom Load: A Case Study // Int. J. of Sustainable Energy. -2017.- V. 36.- P. 259-264.
9. **Chia Y.-K., Sun S., Zhang R.** Energy Cooperation in Cellular Networks with Renewable Powered Base Stations // IEEE Trans. Wirel. Commun.- 2014.- V.13.- P. 6996-7010.
10. **Ayvazyan A.G.** Optimal Design and Performance of PV Powered Cellular Base Stations // Proc. of 14th Int. Conf. on Advanced Computational Engineering and Experimenting. – 2021.- P. 18-19.

11. **Маркаров А.А., Давтян В.С.** Развитие возобновляемой энергетики в Армении: вызовы диверсификации // Геоэкономика энергетики.- 2021.- Т. 15 (3).- С. 116-129.
12. Optimal Design of a Hybrid Solar PV/BG-Powered Heterogeneous Network / **M.S. Hossain, K.Z. Islam, A.G. Alharbi**, et al // Sustainability.- 2022.- V. 14.- P. 2201-2209.
13. **Jahid A., Hossain M.S., Hossain M.F.** Techno-Economic and Energy Efficiency Analysis of Optimal Power Supply Solutions for Green Cellular Base Stations // IEEE Access.- 2020.- V.8.- P. 43776–43795.
14. Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy / **A.S. Aziz, M.F. Tajjuddin, M.R. Adzman**, et al // Sustainability.- 2019.- V. 11.- P. 683-692.
15. Анализ применимости коммерческих программ в задачах технико-экономического моделирования солнечных энергоустановок / **А.В. Бобыль, В.Г. Малышкин, А.Б. Тарасенко** и др. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.- 2019.- № 2 (99). - С. 32-50.
16. HOMER Pro 3.11. Optimize the Value of your Hybrid Power System - from Utility-scale and Distributed Generation to Standalone Microgrids. Доступен: <https://homerenergy.com> [20.01.2023].
17. Solar Resource Maps of RA. Доступен: <https://r2e2.am/en/2017/06/26/solar-maps> [20.01.2023].
18. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource. POWER Project Data Sets Available at: <https://power.larc.nasa.gov> [20.01.2023].

Национальный политехнический университет Армении, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет. Материал поступил в редакцию 13.02.2023.

**Ա.Գ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Ն.Ռ. ԿՈՍՏԻԿ, Ս.Ա. ՏԱՐԱՍՈՎ, Ս.Խ. ԽՈՒՂԱՎԵՐՅԱՆ**

**ԲԶՋԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԲԱԶՄՅԻՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՍՆՈՒՑՄԱՆ ՀԻՔԻՒՂԱՅԻՆ ԱՐԵՎԱՅԻՆ-ՂԻԶԵԼԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ**

HOMER համակարգչային ծրագրի միջոցով ուսումնասիրվել են բջջային ցանցի բազային կայանների հիբրիդային արևային-ղիզելային համակարգով էլեկտրասնուցման տնտեսական և տեխնիկական առանձնահատկությունները: Հիմնական պահանջն էր բացառել «բեռնվածքի հավանական անջատման» հնարավորությունը տարեկան շահագործման ժամանակահատվածում: Որոշվել են ֆոտովոլտային (արևային) կայանների, ղիզելային գեներատորների և օժանդակ սարքերի (փոխարկիչ, պահուստային մարտկոց և այլն) օպտիմալ բնութագրերը: Ներկայացվել են էլեկտրաէներգիայի ինքնավար գեներացման համար հիբրիդային համակարգի գործնական ներդրման վերաբերյալ առաջարկություններ:

**Առանցքային բառեր.** բազային կայան, ղիզելային գեներատոր, ֆոտովոլտային (արևային) կայան, մոդելավորում:

**A.G. AYVAZYAN, N.R. KOSTIK, S.A. TARASOV, S.K. KHUDAVERDYAN**

**MODELING A HYBRID SOLAR-DIESEL POWER SUPPLY SYSTEM FOR  
CELLULAR MOBILE BASE STATIONS**

Using the HOMER computer program, the economic and technical features of power supply of cellular mobile base stations based on a hybrid solar-diesel system are studied. The main requirement set to that system is to eliminate the possibility of a “loss of load probability” over a one-year operational period. The optimal characteristics of photovoltaic (solar) stations, diesel generators, and balance-of-system (converter, storage battery, etc.) are determined. Recommendations for the practical implementation of a hybrid solar-diesel system for autonomous power generation are presented.

**Keywords:** base station, diesel generator, photovoltaic (solar) station, modeling.