



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Кириллов И.Е.², Кузнецов Н.М.¹, Лазарев Н.И.¹, Морозов И.Н.^{1,2}

¹Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

²ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», г. Мурманск, Россия
n.lazarev@ksc.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Арктическая зона становится объектом все более активного интереса в связи с изменением климата и растущей потребностью в устойчивом развитии. Внедрение возобновляемых источников энергии становится ключевым моментом для обеспечения устойчивости и безопасности региона. Исследование направлено на решение проблем развития Арктической зоны России с акцентом на преодолении транспортных и энергетических ограничений и внедрении возобновляемых источников энергии. ЦЕЛЬ. Исследование направлено на разработку и внедрение устойчивых и эффективных энергетических систем в Арктической зоне России с использованием возобновляемых источников энергии, с акцентом на солнечную энергию. Разработать имитационную модель солнечной батареи с системой позиционирования и продемонстрировать подход к повышению эффективности солнечных электростанций. МЕТОДЫ. Сбор и анализ данных измерений значений солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния в различных районах Мурманской области. Для оценки эффективности применения солнечных батарей разработана имитационная модель в программном комплексе Matlab приложении Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты исследования позволили выявить потенциал использования солнечной энергии в различных районах Мурманской области. Проведенные вычисления позволили определить оптимальную мощность солнечных батарей для горного массива Хибин. Представлена имитационная модель солнечной батареи с реализацией системы позиционирования батареи с целью повышения эффективности работы. Результаты моделирования наглядно демонстрируют повышение эффективности использования солнечных панелей с системой ориентирования. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Значительный потенциал использования солнечной энергии в Арктической зоне достигается с помощью системы позиционирования, что открывает перспективы повышения энергетической эффективности. Учет климатических факторов имеет критическое значение при проектировании и эксплуатации энергетических систем.

Ключевые слова: арктическая зона; солнечные электростанции; солнечная радиация; солнечная батарея; система регулирования.

Для цитирования: Кириллов И.Е., Кузнецов Н.М., Лазарев Н.И., Морозов И.Н. Солнечная энергетика для энергоснабжения удаленных потребителей в Арктической зоне // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 48-58. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.

SOLAR ENERGY FOR POWER SUPPLY OF REMOTE CONSUMERS IN THE ARCTIC ZONE

Kirillov I.E.², Kuznetsov N.M.¹, Lazarev N.I.¹, Morozov I.N.^{1,2}

¹Center of Physical and Technical Problems of Energy of the North KSC RAS, Apatity, Russia

²Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia
n.lazarev@ksc.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The Arctic zone is becoming a subject of increasing interest due to climate change and the growing need for sustainable development. The introduction of renewable energy sources is becoming key to the sustainability and security of the region. The research aimed at solving the problems of development of the Arctic zone of Russia with a focus on overcoming transportation and energy constraints and introducing renewable energy sources is highly relevant. *THE PURPOSE.* The study aims to develop and implement sustainable and efficient energy systems in the Arctic zone of Russia using renewable energy sources, with a focus on solar energy. To develop a simulation model of a solar array with a positioning system and demonstrate an approach to improve the efficiency of solar power plants, which is important for current technological research in renewable energy. *METHODS.* Collection and analysis of measured data of solar radiation values and sunshine duration in different areas of Murmansk region. To evaluate the efficiency of solar panels application, a simulation model was developed in the program complex Matlab application Simulink. *RESULTS.* The results of the study allowed to identify the potential of solar energy utilization in different areas of the Murmansk region. The performed calculations allowed to determine the optimal capacity of solar panels for the Khibiny mountain range, which contributes to the effective utilization of solar energy. A simulation model of a solar panel with the implementation of a battery positioning system to improve the efficiency of operation is presented. *CONCLUSION.* The significant potential of solar energy utilization in the Arctic zone is achieved with the help of a positioning system, which holds promise for sustainable development of the region and improved energy efficiency. Adaptation of solar power plants to specific climatic conditions optimizes their performance and ensures sustainability even in the harsh climate of northern regions.

Keywords: Arctic zone; solar power plants; solar radiation; solar panel; control system.

For citation: Kirillov I.E., Kuznetsov N.M., Lazarev N.I., Morozov I.N. Solar energy for power supply of remote consumers in the Arctic zone. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 48-58. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.

Введение (Introduction)

Энергетическая проблематика арктических регионов в соответствии с курсом на формирование зеленой экономики [1] и снижение потребления невозобновляемых ресурсов объемных показателей переключается на качественные и структурные показатели [2]. В регионах арктической зоны Российской Федерации эффективным направлением решения локальных энергетических проблем является внедрение распределенной генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3].

Цель исследования заключается в повышении энергетической самообеспеченности, устойчивости энергетических систем в Арктической зоне через интеграцию солнечных электростанций. Это поможет снизить зависимость от традиционных источников энергии, улучшить качество жизни жителей региона и содействовать устойчивому развитию Арктики. Важнейшими задачами современного развития Арктической зоны Российской Федерации являются преодоление транспортных и энергетических ограничений, препятствующих повышению темпов экономического развития Арктики, стимулирование приоритетной разработки и внедрения энергосберегающих и энергоэффективных технологий [4, 5]. Исследование возможностей использования возобновляемых источников энергии показало, что высокие показатели по наращиванию объемов генерируемой энергии из ВИЭ с одновременным снижением их себестоимости стали результатом привлечения значительных инвестиций [6].

Для подбора оптимального состава оборудования комплексных энергосистем энергоснабжения автономных потребителей на базе ВИЭ [7] с учетом технических и экономических параметров и реальных природно-климатических условий используется современное программное обеспечение [8]. Создание распределенной системы отопления с использованием солнечной энергии и анализом динамических характеристик солнечных электростанций позволяет оптимизировать теплоснабжение потребителей [9, 10].

Система управления накопителями энергии с использованием нечеткой логики в гибридных генераторных системах электроснабжения отдаленных потребителей позволяет эффективно управлять изменением мощности нагрузки и колебаниями напряжения в электрической сети [11].

Для электроснабжения автономных потребителей, удаленных от энергосистемы, перспективным направлением является применение мобильных ветро-солнечных

электростанций. При этом необходимо учитывать факторы, влияющие на выбор возобновляемых источников электроэнергии и требования автономных потребителей к качеству электроэнергии [12].

Использование технологий, основанных на солнечной энергии, в последнее время вызывает повышенный интерес для удовлетворения различных энергетических потребностей: комбинированного производства тепла и электроэнергии, при использовании горячей воды на бытовые нужды, при кондиционировании в зданиях [13, 14].

Повышение точности расчетов выработки электроэнергии солнечными электростанциями на северных территориях для электроснабжения удаленных потребителей от энергетической системы определяется учетом климатических особенностей регионов [15].

В 2015 г. в поселке Батагай Республики САХА (Якутия) построена одна из крупнейших заполярных солнечных электростанций мощностью 1 МВт. Вырабатываемая электроэнергия позволяет ежегодно экономить до 300 тонн дизельного топлива. Внедряя солнечные электростанции в Верхоянском улусе, холдинг «РАО ЭС Востока» применил «кустовой метод» строительства. Закупка и доставка оборудования для поселков Бетенкес, Столбы и Юнкюр были объединены с реализацией проекта Батагайской солнечной станции, что позволило оптимизировать капитальные затраты [16].

Модернизация электроснабжения удаленных поселений Терского района Мурманской области в 2014-2016 гг. за счет применения ветро-солнечно-дизельных электрических станций позволила обеспечить потребителей круглосуточным электроснабжением. Сократить региональное бюджетное финансирование за счет снижения объемов завозимого топлива на 50 %, снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии и продлить срок эксплуатации дизельных генераторов на 25 % [17].

В 2021 году в поселке Тура Красноярского края введена в эксплуатацию солнечная электростанция мощностью 2,5 МВт с системой накопления энергии. Использование солнечной энергии позволит сократить потребление дизельного топлива до 644 тонн. Для целей проектирования и прогноза эффективности работы солнечных установок необходимы данные о солнечной радиации с максимальным охватом территории. В арктической зоне в летние дни регистрируются потоки солнечного излучения на площадку, ориентированную на солнце, на уровне 1,1-1,2 кВт/м², что близко к предельному заатмосферному значению около 1,4 кВт/м² [18].

Научная значимость исследования состоит в оценке эффективности применения солнечных батарей в Арктической зоне. На примере Мурманской области был проведен анализ данных о солнечной радиации в различных районах региона, что помогало разработать имитационную модель приближенную к реальным условиям. Разработанная модель является инструментом для оптимизации использования солнечной энергии в Арктической зоне, что позволяет повысить точность прогнозирования и разработать оптимальные решения для использования солнечной энергии. Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты, могут помочь оптимизировать мощность и расположение солнечных батарей в условиях Арктики, где солнечное сияние менее интенсивно и изменчиво.

Материалы и методы (Materials and methods)

На Кольском полуострове среднегодовое дневное поступление энергии составляет от 2,5 до 3,0 кВт·ч/(м²день). Суммарная (прямая и рассеянная) среднемесячная солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности [19] на станциях наблюдения в Мурманской области представлена на рисунке 1.

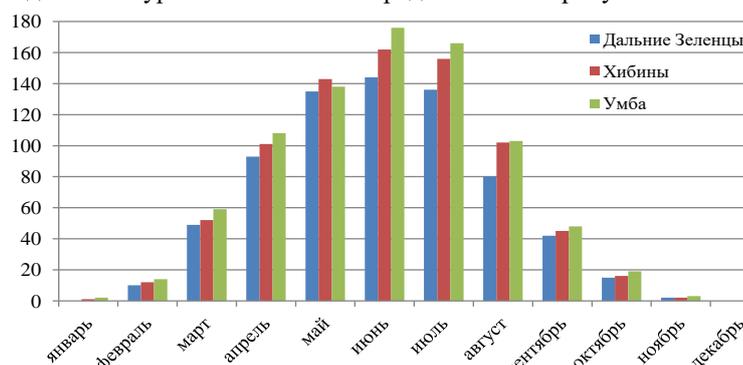


Рис. 1. Солнечная радиация на станциях наблюдения Мурманской области, кВт·ч/м² Fig. 1. Solar radiation at the observation stations of the Murmansk Oblast, kWh/m²

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Годовая солнечная радиация ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) и продолжительность солнечного сияния (час.) на территории Мурманской области представлена на рисунке 2. Годовая солнечная радиация является важным параметром при оценке потенциала использования солнечной энергии для энергоснабжения. Суммарная годовая солнечная радиация составляет: в районе станции наблюдения Дальних Зеленцов $700 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, в районе станции наблюдения Хибины – $800 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, в районе станции наблюдения Умбы – $840 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Эти данные предоставляют информацию о количестве солнечной энергии, которую можно получить и подчеркивают географическое разнообразие и потенциал для использования солнечных электростанций.

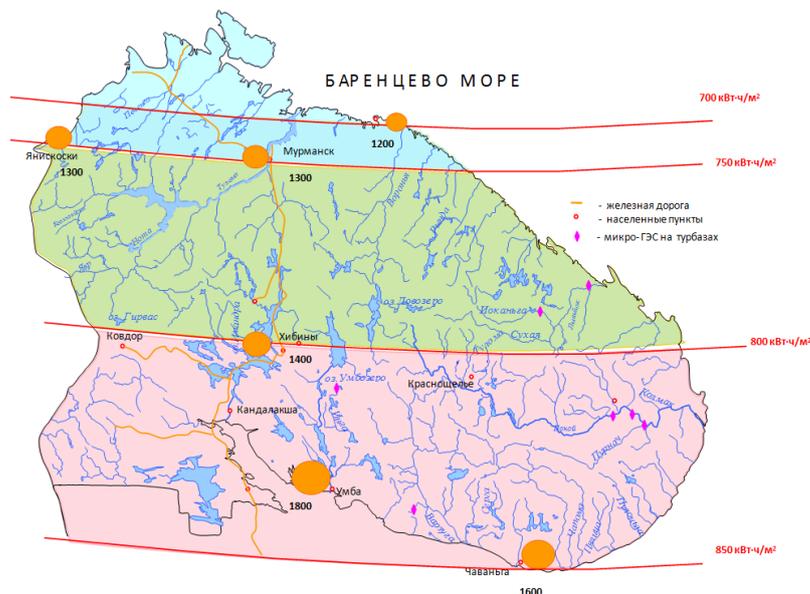


Рис. 2. Годовая солнечная радиация и продолжительность солнечного сияния на территории Мурманской области

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Суммарная среднемесячная продолжительность солнечного сияния (час.) на станциях наблюдения Мурманской области [20] представлена в таблице 1. Этот параметр показывает количество времени, в течение которого территория находится под воздействием солнечного излучения в среднем за год. Понимание продолжительности солнечного сияния является существенным при проектировании и оценке солнечных электростанций из-за прямого влияния на выработку солнечной энергии и эффективность солнечных систем.

Таблица 1
Table 1

Суммарная среднемесячная продолжительность солнечного сияния (час.) на станциях наблюдения Мурманской области

Total mean monthly duration of solar radiation (h) at the observation stations of the Murmansk Oblast

Станция наблюдения	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Чаваньга	10	42	136	200	221	290	302	196	96	63	17	2
Умба	15	70	175	225	255	308	281	225	150	67	24	1
Кандалакша	2	51	139	190	229	275	251	192	121	52	10	0
Краснощелье	4	50	139	170	196	230	247	156	100	46	10	0
Ковдор	2	41	122	175	231	231	266	166	101	48	8	0
Хибины	3	37	128	166	200	258	243	176	97	54	10	0
Мурманск	2	48	149	176	196	247	229	166	123	50	8	0
Янискоски	1	41	119	166	227	215	240	151	95	50	6	0
Дальние Зеленцы	1	37	114	176	177	225	204	141	84	48	6	0
Териберка	6	44	108	164	199	210	255	142	97	53	9	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Произведем расчет мощности солнечных батарей для района Хибины Мурманской области, для того чтобы определить оптимальные мощности солнечных батарей, которые необходимы для производства достаточного количества электроэнергии. Расчет производился по формуле:

$$W_{s,b} = W_m \cdot P_{s,b} \cdot \eta / P_{max}, \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{м}^2$$

где $W_{s,b}$ – выработка электроэнергии солнечной батареи за месяц, кВт·ч/м²; W_m – солнечная инсоляция в месяц, кВт·ч/м²; $P_{s,b}$ – номинальная мощность солнечной батареи, кВт; P_{max} – максимальная мощность инсоляции квадратного метра земной поверхности в районе измерения, (кВт/м²); η – коэффициент полезного действия.

Суммарная (прямая и рассеянная) среднемесячная солнечная радиация в районе станции наблюдения Хибины в июне составляет $W_m=162$ кВт·ч/м² (рис. 1), номинальная мощность солнечной батареи 1 кВт, к.п.д. солнечной батареи 15%. В таблице 2 приведены расчеты мощности солнечных батарей.

Таблица 2

Table 2

Расчет выработки солнечных батарей для района Хибины Мурманской области
Calculation of solar panel generation for the Khibiny region of Murmansk Oblast

Номинальная мощность, Вт	Месяцы						
	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
400	3,5	6,7	9,5	10,8	10,4	6,8	3
500	4,3	8,4	11,9	13,5	13	8,5	3,8
600	5,2	10,1	14,3	16,2	15,6	10,2	4,5
800	6,9	13,5	19,1	21,6	20,8	13,6	6
1000	8,7	16,8	23,8	27	26	17	7,5
1200	10,4	20,2	28,6	32,4	31,2	20,4	9
1400	12,1	23,6	33,4	37,8	36,4	23,8	10,5
1600	13,9	26,9	38,1	43,2	41,6	27,2	12
1800	15,6	30,3	42,9	48,6	46,8	30,6	13,5
2000	17,3	33,7	47,7	54	52	34	15
2500	21,7	42,1	59,6	67,5	65	42,5	18,8
3200	27,7	53,9	76,3	86,4	83,2	54,4	24

 умеренный режим 10-30 кВт·ч/месяц	 базовый режим 30- 50 кВт·ч/месяц	 комфортный режим 50-70 кВт·ч/месяц
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для поддержания базового и комфортного уровня электропотребления (30-70 кВт·ч/мес) с апреля по август необходимы мощности солнечных батарей 1,8 кВт и более. Учет климатических факторов имеет критическое значение при проектировании и эксплуатации энергетических систем. Адаптация солнечных электростанций к конкретным климатическим условиям оптимизирует их производительность и обеспечивает устойчивость даже в условиях сурового климата северных регионов. Для выбора правильного оборудования также необходимо учитывать максимальное значение солнечной радиации в течении дня в течение каждого месяца.

Данные о максимальной солнечной радиации в период с 12 до 15 часов по месяцам (Вт·ч/м²) представлены на рисунке 3. Эти данные помогают понять динамику солнечной активности в разные месяцы при рассмотрении вопросов проектирования и оптимизации солнечных энергетических систем.

Для оценки эффективности применения солнечных батарей разработана имитационная модель в программном комплексе Matlab приложении Simulink. Благодаря наличию библиотек компонентов для электротехнического моделирования и возможности использования их совместно с различными блоками, реализующими математические операции в данном приложении удобно реализовывать модели разнородных технических систем совместно с вычислительными блоками, имитирующими изменяющиеся возмущающие воздействия внешней среды.

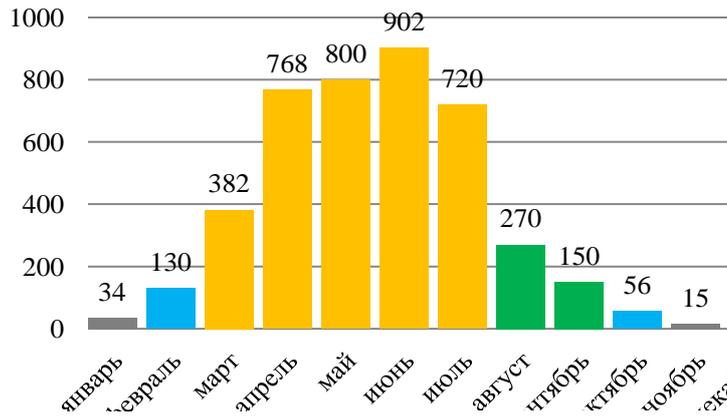


Рис. 3. Максимальная солнечная радиация в период с 12 до 15 часов по месяцам (Вт·ч/м²) Fig. 3. Maximum solar radiation in the period from 12 to 15 hours by month (Wh/m²)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Имитационная модель воссоздает работу солнечных батарей близких к реальным условиям, позволяя проанализировать результаты и оптимизировать работу солнечных батарей. На рисунке 4 изображена модель солнечной батареи, реализованная аналогично модели представленной в [21]. Отличительной особенностью представленной модели является возможность моделирования переменной солнечной активности (блок Signal Builder3), а так же моделирование изменения выходного значения мгновенной мощности батареи в зависимости от её позиционирования (вход in1 и блок SignalBuilder2). Для моделирования переменной солнечной активности взяты суточные данные солнечной радиации за июнь месяц для района Хибины Мурманской области. Номинальная мощность солнечной батареи в имитационной модели 1 кВт.

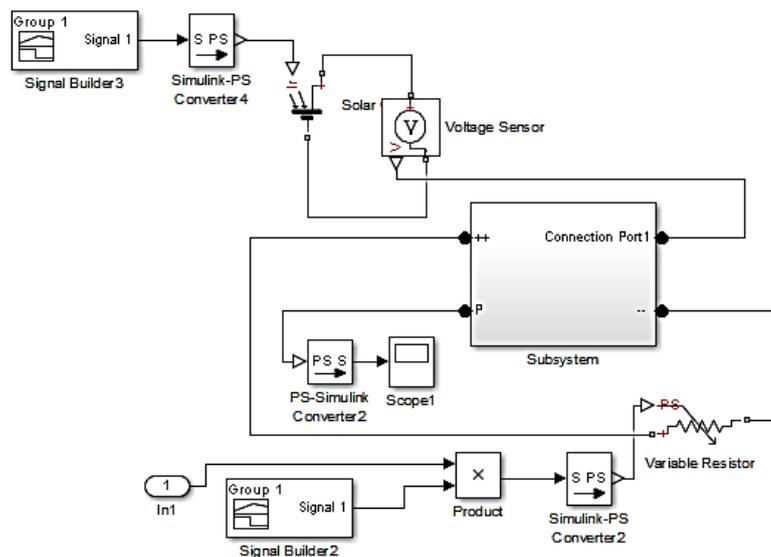


Рис. 4. Модель солнечной батареи

Fig. 4. Model of a solar cell

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для оценки возможности повышения эффективности солнечной батареи к модели добавлена система управления поворотом солнечной панели, учитывающая изменение светового потока и перемещение солнца в течение дня. Схема ориентирует солнечную батарею в одной плоскости в соответствии перемещения солнца в течение суток. Регулирование угла наклона по двум осям также позволит увеличить объем вырабатываемой энергии солнечными электростанциями [22]. Данная система управления реализована в виде схемы гелиостата, представленной на рисунке 5.

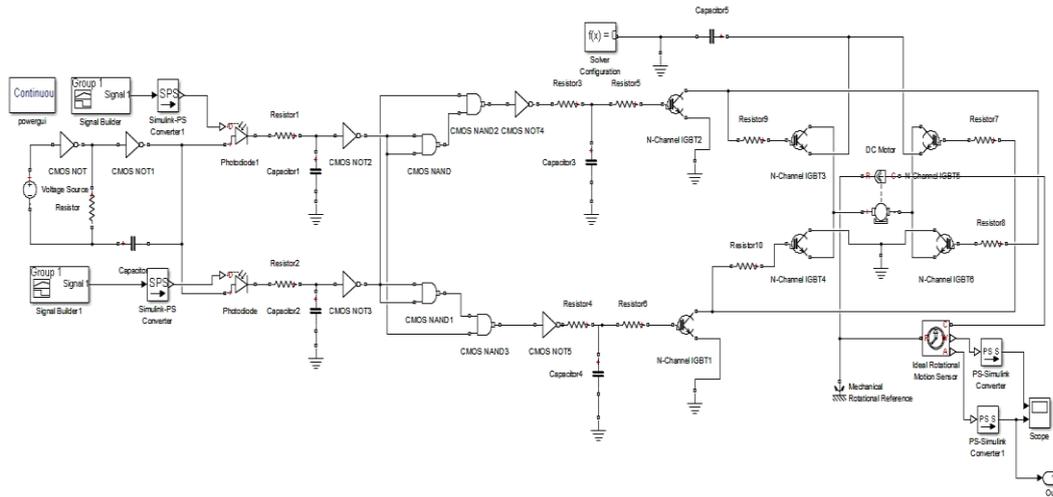


Рис. 5. Схема регулирования угла наклона солнечной панели *Fig. 5. Scheme of solar panel tilt angle regulation*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В данной модели в качестве датчиков, значения сигналов которых помогают в позиционировании батареи, выступают два фотодиода (Photodiode1 и Photodiode2) пропускная способность которых зависит от интенсивности попадания на них солнечного света. При перемещении солнца в течение дня, или в случае изменения интенсивности освещения датчиков в зависимости от облачности на каждый из датчиков приходится различное количество излучения. Токи, пропускаемые датчиками, являются управляющими сигналами для мостовой схемы, реализованной на IGBT транзисторах. Данные транзисторы открываются или закрываются по диагонали, в зависимости от того, с какого датчика поступает управляющий сигнал. Открытие определенной пары ключей моста приводит к срабатыванию блока DC Motor, реализующего электропривод позиционирования солнечной батареи, благодаря наличию двух датчиков движение привода может осуществляться реверсивно и сама батарея будет ориентирована в сторону соответствующую максимальному уровню освещения.

Для демонстрации эффекта от внедрения системы позиционирования солнечной батареи на рисунке 6 приведены сравнительные результаты моделирования работы солнечных батарей. В модели были реализованы два варианта системы управления поворотом солнечной батареи:

1. система регулирования поворота в одной плоскости, она позволяет направлять солнечную батарею в направление наибольшего солнечного излучения в горизонтальной плоскости.

2. система регулирования поворота по двум осям, она позволяет направлять солнечную батарею в направление наибольшего солнечного излучения в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной).

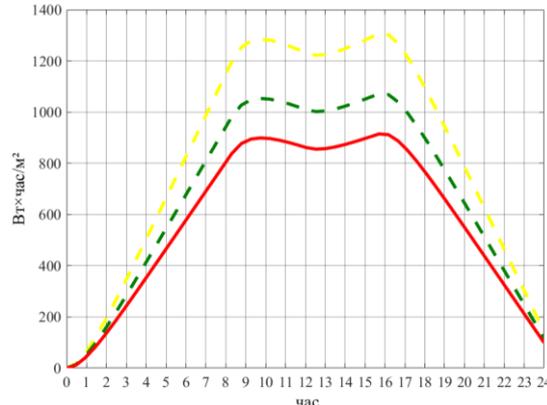


Рис. 6. Сравнительные результаты моделирования *Fig. 6. Comparative results of modeling*
 - - - - - с системой регулирования в двух плоскостях, - - - - - с системой регулирования в одной плоскости, — — — — — без системы регулирования поворота

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

График, выполненный сплошной линией, представляет результат работы батареи без системы регулирования поворота. В дневные часы наиболее активного солнечного излучения эффективность от применения системой регулирования поворота в одной плоскости составляет около 12-15%, с системой регулирования по двум осям эффективность использования солнечной батареи возрастает до 30-35%. В утренние и вечерние часы эффект от применения системы управления поворотом солнечной панели менее значительный.

Заключение (Conclusions)

Интеграция солнечных электростанций представляет собой эффективное решение для обеспечения энергетической самодостаточности в северных регионах. Этот подход позволяет более надежно удовлетворять потребности удаленных потребителей, где традиционные источники энергии ограничены.

Годовая солнечная радиация и продолжительность солнечного сияния являются ключевыми параметрами, которые прямо влияют на производство и эффективность солнечных электростанций. Сравнив данные по солнечной радиации для разных районов области, можно отметить значительное географическое разнообразие и потенциал для использования солнечных электростанций.

Расчет мощности солнечных батарей подчеркивает важность учета климатических факторов при проектировании солнечных энергетических систем и необходимость адаптации к конкретным условиям для оптимизации производительности. Таким образом, солнечная радиация и климатические особенности региона является основой для эффективного проектирования и эксплуатации солнечных энергетических систем.

Создание экономичных в эксплуатации двухкоординатных систем управления солнечными панелями является ключевым фактором в обеспечении эффективности и позволяет снизить операционные издержки и повысить общую экономическую эффективность. Дальнейшие исследования в этой области могут включать в себя более детальное изучение климатических условий других регионов Арктической зоны, разработку новых методов управления мощностью солнечных батарей и оценку их экономической эффективности.

Литература

1. Пакина, А. А. Перспективы зелёной экономики как новой парадигмы развития / А. А. Пакина, В. А. Горбанев // Вестник МГИМО Университета. – 2019. – Т. 12, № 5. – С. 134-155. – DOI [10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155](https://doi.org/10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155). – EDN [TFIKCT](https://www.edn.ru/TFIKCT).
2. Лаженцев, В. Н. Арктика и Север в контексте пространственного развития России / В. Н. Лаженцев // Экономика региона. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 737-754. – DOI [10.17059/ekon.reg.2021-3-2](https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-3-2). – EDN [PWHOPP](https://www.edn.ru/PWHOPP).
3. Кузнецов, Н. М. Развитие распределенной энергетики в Мурманской области / Н. М. Кузнецов, О. Е. Коновалова // Фундаментальные исследования. – 2021. – № 5. – С. 122-127. – DOI [10.17513/fr.43049](https://doi.org/10.17513/fr.43049). – EDN [YCTFPG](https://www.edn.ru/YCTFPG).
4. E Nalivaychenko et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 918 012238. DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012238>.
5. Gorodnov A.G. Construction of energy-efficient electrical complexes with an autonomous power supply system // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2020. Vol. 22. No. 4. pp. 64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.
6. Тишков С.В., Наливайченко Е.В., Волков А.Д., Щербак А.П., Каргинова-Губинова В.В., Пахомова А.А. Повышение энергоэффективности экономики Арктической зоны Российской Федерации: проблемы, перспективы, методы оценки. М.:Первое экономическое издательство, 2021. – 130 с. – ISBN 978-5-91292-358-6. – DOI [10.18334/9785912923586](https://doi.org/10.18334/9785912923586). - EDN [IKKNOR](https://www.edn.ru/IKKNOR).
7. M. Arun Noyal Doss, R. Naveenkumar, R. Ravichandran, J. Rengaraj, M. Manikandane. PV Fed Asymmetrical Switched Diode Multi Level Inverter With Minimum Number of Power Electronic Components. Energy Procedia, 2017, vol. 117, pp592-599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.155>.
8. Денисов, К. С. Решение задачи комплексного энергоснабжения автономного потребителя с целью уменьшения экономических затрат / К. С. Денисов, В. И. Велькин, А. Н. Тырсин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 84-92. DOI [10.14529/power190309](https://doi.org/10.14529/power190309). – EDN [EKYWXK](https://www.edn.ru/EKYWXK).
9. Y. Liu, J. Liu, Y. Chen, D. Wang, Y. Li, Z. Liu, H. Tang, C. Song. Study of the thermal performance of a distributed solar heating system for residential buildings using a heat-user node model. Energy and Buildings, 2022, Vol. 254, p. 111569. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111569>.

10. Москаленко Н.И. Численное моделирование воздействий метеосостояния атмосферы на эффективность функционирования солнечных тепловых и электрических станций / Ахметшин А.Р., Сафуллина Я.С., Додов И.Р., Хамидулина М.С. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 86-99. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-86-99
11. Said S.M., Salama H.S., Hartmann B., Vokony I.A robust SMES controller strategy for mitigating power and voltage fluctuations of grid connected hybrid PV–wind generation systems. Electrical Engineering. 2019. Vol. 101. Iss. 3. P. 1019–1032. DOI <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00848-z>.
12. Мобильные ветро-солнечные электростанции: состояние, перспективы и особенности проектирования / О.В. Григораш, Е.А. Денисенко, Д.Н. Грищенко, П.М. Барышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 48–55. – DOI [10.14529/power230105](https://doi.org/10.14529/power230105). – EDN: [CRODXG](https://www.edn.net/CRODXG).
13. Modi A., Bühler F., Andreasen J. G., Haglind F. A review of solar energy based heat and power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. P. 1041-1064. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.075>
14. F. Reda, M. Viot, K. Sipila, M. Helm. Energy assessment of solar cooling thermally driven system configurations for an office building in a Nordic country, Appl. Energy. 166 (2016) 27-43. – DOI [10.1016/j.apenergy.2015.12.119](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.119).
15. Оценка функционирования солнечных электростанций в климатических условиях Севера / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, Н. С. Бурянина [и др.] // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Т. 7, № 2(28). С. 101-110. – DOI [10.25744/genb.2022.37.74.011](https://doi.org/10.25744/genb.2022.37.74.011). – EDN: [OUPLYM](https://www.edn.net/OUPLYM).
16. Кузнецов, Н.М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации: монография / Н. М. Кузнецов // Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН. – 2020. – 92 с.: ил. ISBN 9785911374341. – DOI [10.37614/978.5.91137.434.1](https://doi.org/10.37614/978.5.91137.434.1). EDN [GVUSWV](https://www.edn.net/GVUSWV).
17. Коновалова, О. Е. Возобновляемые источники энергии в Мурманской области / О. Е. Коновалова, Н. М. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 2018. – № 9. – С. 51-56. – EDN [YOGUDJ](https://www.edn.net/YOGUDJ).
18. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации / О. С. Попель, С. В. Киселева, М. О. Моргунова [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 1(17). – С. 64-69. – EDN [TUUTMJ](https://www.edn.net/TUUTMJ).
19. Минин, В. А. Перспективы использования солнечной энергии в Мурманской области / В. А. Минин, Т. И. Якунина, И. Л. Коробко // Проблемы энергообеспечения Мурманской области. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. – С. 73-81.
20. Апасова, Е. Г. Описание массива данных суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621446 / Е. Г. Апасова, Л. К. Клещенко [Электронный ресурс] <http://meteo.ru/data/160-sunshine-duration#описание-массива-данных> (дата обращения 30.01.2024)
21. Колосов, Р. В. Моделирование солнечных батарей / Р. В. Колосов // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 2. С. 85-93. – DOI [10.46960/2658-6754_2019_2_85](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2019_2_85). – EDN [JVVVED](https://www.edn.net/JVVVED).
22. Митрофанов С.В. Выбор оптимального угла наклона солнечных панелей для размещения их в произвольном регионе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 5–11. – DOI [10.14529/power230101](https://doi.org/10.14529/power230101). – EDN [ZDAYFE](https://www.edn.net/ZDAYFE).

Авторы публикации

Кириллов Иван Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры физики, биологии и инженерных технологий Мурманского арктического университета (МАУ), г. Мурманск, Россия. kirillovi@rambler.ru

Кузнецов Николай Матвеевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия. n.kuznetsov@ksc.ru

Лазарев Никита Игоревич – инженер центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия. n.lazarev@ksc.ru

Морозов Иван Николаевич – канд. техн. наук, заведующий кафедрой физики, биологии и инженерных технологий Мурманского арктического университета (МАУ), г. Мурманск, Россия. moroz.84@mail.ru

References

1. Pakina, A. A. Prospects of green economy as a new paradigm of development / A. A. Pakina, V. A. Gorbanev // Bulletin of MGIMO University. - 2019. - T. 12, № 5. - C. 134-155. - DOI [10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155](https://doi.org/10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155). – EDN [TFIKCT](https://www.edn.net/TFIKCT).
2. Lazhentsev, V. N. Arctic and the North in the context of Russia's spatial development / V. N. Lazhentsev // Regional Economics. - 2021. - T. 17, № 3. - C. 737-754. – DOI [10.17059/ekon.reg.2021-3-2](https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-3-2). – EDN [PWHOPP](https://www.edn.net/PWHOPP).
3. Kuznetsov, N. M. Development of distributed energy in the Murmansk region / N. M. Kuznetsov, O. E. Konovalova // Fundamental Research. - 2021. - № 5. - C. 122-127. – DOI [10.17513/fr.43049](https://doi.org/10.17513/fr.43049). – EDN [YCTFPG](https://www.edn.net/YCTFPG).
4. E Nalivaychenko et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 918 012238. DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012238>.
5. Gorodnov A.G. Construction of energy-efficient electrical complexes with an autonomous power supply system // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2020. Vol. 22. No. 4. pp. 64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.
6. Tishkov S.V., Nalivaichenko E.V., Volkov A.D., Scherbak A.P., Karginova-Gubinova V.V., Pakhomova A.A. Increasing energy efficiency of the economy of the Arctic zone of the Russian Federation: problems, prospects, methods of assessment. Moscow: First Economic Publishing House, 2021. - 130 c. - ISBN 978-5-91292-358-6. – DOI [10.18334/9785912923586](https://doi.org/10.18334/9785912923586). - EDN [IKKNOR](https://www.edn.net/IKKNOR).
7. M. Arun Noyal Doss, R. Naveenkumarb, R. Ravichandran, J. Rengarajd, M. Manikandane. PV Fed Asymmetrical Switched Diode Multi Level Inverter With Minimum Number of Power Electronic Components. Energy Procedia, 2017, vol. 117, pp592-599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.155>.
8. Denisov, K. S. Solution of the problem of complex power supply of an autonomous consumer in order to reduce economic costs / K. S. Denisov, V. I. Velkin, A. N. Tyrsin // Bulletin of SUSU. Series "Energetics". - 2019. - T. 19, № 3. - C. 84-92. DOI [10.14529/power190309](https://doi.org/10.14529/power190309). – EDN [EKYWXK](https://www.edn.net/EKYWXK).
9. Y. Liu, J. Liu, Y. Chen, D. Wang, Y. Li, Z. Liu, H. Tang, C. Song. Study of the thermal performance of a distributed solar heating system for residential buildings using a heat-user node model. Energy and Buildings, 2022, Vol. 254, p. 111569. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111569>.
10. Moskalenko N.I. Numerical modeling of the effects of atmospheric meteorological conditions on the efficiency of operation of solar thermal and electric power plants / Akhmetshin A.R., Safiullina Ya.S., Dodov I.R., Khamidullina M.S. // Izvestia of Higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2021. Vol. 23. No. 5. PP. 86-99. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-86-99
11. Said S.M., Salama H.S., Hartmann B., Vokony I.A robust SMES controller strategy for mitigating power and voltage fluctuations of grid connected hybrid PV-wind generation systems. Electrical Engineering. 2019. Vol. 101. Iss. 3. P. 1019-1032. DOI <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00848-z>.
12. Mobile wind-solar power plants: state, prospects and design features / O.V. Grigorash, E.A. Denisenko, D.N. Grishchenko, P.M. Baryshev // Bulletin of SUSU. Series "Energetics". 2023. T. 23, № 1. C. 48-55. – DOI [10.14529/power230105](https://doi.org/10.14529/power230105). – EDN: [CRODXG](https://www.edn.net/CRODXG).
13. Modi A., Bühler F., Andreasen J. G., Haglind F. A review of solar energy based heat and power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. P. 1041-1064. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.075>.
14. F. Reda, M. Viot, K. Sipila, M. Helm. Energy assessment of solar cooling thermally driven system configurations for an office building in a Nordic country, Appl. Energy. 166 (2016) 27-43. – DOI [10.1016/j.apenergy.2015.12.119](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.119).
15. Assessment of solar power plants functioning in the climatic conditions of the North / N. P. Mestnikov, P. F. Vasiliev, N. S. Buryanina [et al.] // Grozny Natural Science Bulletin. 2022. T. 7, № 2(28). C. 101-110. – DOI [10.25744/genb.2022.37.74.011](https://doi.org/10.25744/genb.2022.37.74.011). – EDN: [OUPGYM](https://www.edn.net/OUPGYM).
16. Kuznetsov, N.M. Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation: a monograph / N.M. Kuznetsov // Apatity: Publishing house of FIC KSC RAS. - 2020. - 92 p.: ill. ISBN 9785911374341. – DOI [10.37614/978.5.91137.434.1](https://doi.org/10.37614/978.5.91137.434.1). EDN [GVUSWV](https://www.edn.net/GVUSWV).
17. Konovalova, O. E. Renewable energy sources in the Murmansk region / O. E. Konovalova, N. M. Kuznetsov // Industrial Energy. - 2018. - № 9. - C. 51-56. – EDN [YOGUDJ](https://www.edn.net/YOGUDJ).
18. Use of renewable energy sources for power supply to consumers in the Arctic zone of the Russian Federation / O. S. Popel, S. V. Kiseleva, M. O. Morgunova [et al.] // Arctic: ecology and economy. - 2015. - № 1(17). - C. 64-69. – EDN [TUUTMJ](https://www.edn.net/TUUTMJ).
19. Minin, V. A. Prospects for the use of solar energy in the Murmansk region / V. A. Minin, T. I. Yakunina, I. L. Korobko // Problems of energy supply of the Murmansk region. - Apatity: Kola Scientific Center of RAS, 1992. - C. 73-81.
20. Apasova, E. G. Description of the data array of the total monthly duration of solar shining at the stations of Russia. Certificate of state registration of the database No. 2015621446 / E. G. Apasova, L. K.

Kleshchenko [Electronic resource] <http://meteo.ru/data/160-sunshine-duration#описание-массива-данных> (accessed on 30.01.2024).

21. Kolosov, R. V. Modeling of solar batteries / R. V. Kolosov // Intellectual Electrical Engineering. 2019. № 2. С. 85-93. – DOI [10.46960/2658-6754_2019_2_85](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2019_2_85). – EDN [JVVVED](https://www.edn.net/JVVVED).

22. Mitrofanov S.V. Selection of the optimal angle of inclination of solar panels for their placement in an arbitrary region // Bulletin of SUSU. Series "Energy". 2023. Т. 23, № 1. С. 5-11. – DOI [10.14529/power230101](https://doi.org/10.14529/power230101). – EDN [ZDAYFE](https://www.edn.net/ZDAYFE).

Authors of the publication

Ivan E. Kirillov – Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia. kirillovi@rambler.ru

Nikolay M. Kuznetsov – Center of Physical and Technical Problems of Energy of the North KSC RAS, Apatity, Russia. n.kuznetsov@ksc.ru

Nikita I. Lazarev – Center of Physical and Technical Problems of Energy of the North KSC RAS, Apatity, Russia. n.lazarev@ksc.ru

Ivan N. Morozov – Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia. moroz.84@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **09.10.2024 г.**

Отредактировано **23.10.2024 г.**

Принято **28.10.2024 г.**