

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 631.371, 621.311

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-252-10-74-80

М.Ю. Карелина, Р.В. Ключев, Д.В. Сердечный

M.Yu. Karelina, R.V. Klyuev, D.V. Serdechniy

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ АПК НА ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

FEASIBILITY STUDY FOR A SOLAR POWER PLANT TO DELIVER POWER TO AUTONOMOUS AGRICULTURAL FACILITIES IN HARD-TO-REACH AREAS

Ключевые слова: энергоснабжение АПК, электротехнологии в сельском хозяйстве, электрооборудование в АПК, автономное энергоснабжение, интеллектуальные системы управления энергопотреблением, сетевой тариф, удалённые агропромышленные объекты, условия Арктической зоны, солнечные электроустановки, возобновляемые источники.

Освещена актуальная проблема энергообеспечения удалённых агропромышленных объектов, в том числе и на территориях Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны, с использованием возобновляемых источников энергии. Особую актуальность автономные системы энергоснабжения на основе ВИЭ приобретают для агропромышленного комплекса (АПК) удалённых регионов. Для таких объектов перебои в электроснабжении ведут к прямым экономическим потерям: срыв технологических

циклов, порча продукции, гибель поголовья. Внедрение солнечной генерации позволяет не только снизить затраты на энергоносители, но и обеспечить требуемую надёжность и качество электроэнергии для работы высокотехнологичного электрооборудования: частотных приводов насосов, автоматизированных доильных установок, систем климат-контроля. Цель работы – обоснование территориального размещения и комплектация специализированным оборудованием системы автономного энергоснабжения на основе фотоэлектрических модулей. В ходе исследования был выполнен расчет нагрузок потребителей объекта, определена общая расчетная мощность в 40 кВт и проведен подбор ключевого оборудования: солнечных модулей, гибридного инвертора, MPPT-контроллера и накопителя энергии. Особую актуальность приобретают исследования в контексте оценки продуктивности работы солнечных электроустановок в условиях арктической зоны. Ос-

новным результатом работы является комплексная оценка экономической эффективности проекта. Расчетный срок окупаемости проекта, определенный на основе замещения сетевого тарифа, составил 1,3 года. Полученные результаты свидетельствуют о высокой экономической целесообразности и практической реализации проекта, способного обеспечить объекту энергетическую автономию и снизить экологическую нагрузку при эксплуатации на труднодоступных территориях Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны.

Keywords: *energy supply for the agro-industrial complex, electrical technologies in agriculture, electrical equipment in the agro-industrial complex, autonomous energy supply, intelligent energy management systems, network tariff, remote agro-industrial facilities, Arctic zone conditions, solar electrical plants, renewable sources.*

An urgent problem of energy supply to remote agro-industrial facilities including those in the regions of Siberia, the Far East and the Arctic zone using renewable energy sources is discussed. Autonomous renewable energy supply systems acquire particular relevance for the agro-industrial complex of remote regions. For such

facilities, power outages lead to direct economic losses: disruption of technological cycles, spoilage of products, and death of livestock. The introduction of solar generation allows not only reducing energy costs, but also ensuring the required reliability and quality of electricity for the operation of high-tech electrical equipment: frequency drives of pumps, automated milking units, and climate control systems. The research goal is to substantiate the territorial location and equipment of an autonomous power supply system based on photovoltaic modules. In the course the study, the loads of the facility's consumers were calculated, the total estimated power of 40 kW was determined, and key equipment was selected: solar modules, a hybrid inverter, an MPPT controller, and an energy storage device. The research is particularly relevant in the context of evaluating the productive efficiency of solar electrical plants in the Arctic zone. The main result of the work is a comprehensive evaluation of the economic efficiency of the project. The estimated payback period of the project determined based on the replacement of the network tariff was 1.3 years. The results obtained indicate a high economic feasibility and practical implementation of the project which can provide the facility with energy autonomy and reduce the environmental burden during operation in remote areas of Siberia, the Far East and the Arctic zone.

Карелина Мария Юрьевна, д.т.н., д.п.н., профессор, проректор, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: myu_karelina@guu.ru.

Клюев Роман Владимирович, д.т.н., доцент, гл. науч. сотр., ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: rv_kluev@guu.ru.

Сердечный Денис Владимирович, к.т.н., доцент, ст. науч. сотр., нач. лаборатории, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dv_serdechnyj@guu.ru.

Karelina Mariya Yurevna, Dr. Tech. Sci., Dr. Pedagogic Sci., Prof., Vice Rector, State University of Management, Moscow, Russian Federation, e-mail: myu_karelina@guu.ru.

Klyuev Roman Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chief Researcher, State University of Management, Moscow, Russian Federation, e-mail: rv_kluev@guu.ru.

Serdechniy Denis Vladimirovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Senior Researcher, State University of Management, Moscow, Russian Federation, e-mail: dv_serdechnyj@guu.ru.

Введение

В контексте энергоснабжения автономных потребителей энергии на удаленных и труднодоступных территориях Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны внимание уделяется ВИЭ, в том числе и солнечной энергетике [1-3]. К безусловным преимуществам солнечной энергетики относятся её экологическая безопас-

ность, использование неисчерпаемого ресурса, а также отсутствие необходимости в капитальном ремонте фотоэлектрических модулей на протяжении как минимум трёх десятилетий эксплуатации [4-7]. В долгосрочной перспективе ожидается снижение себестоимости такой энергии по сравнению с традиционными способами генерации электричества. Особую актуальность

приобретают исследования в контексте оценки продуктивности работы солнечных электроустановок в условиях арктической зоны [8, 9]. Реализация проекта солнечной электростанции позволит сократить расходы потребителей на электроэнергию, минимизировать негативное воздействие на окружающую среду за счёт сокращения вредных выбросов, а также создать предпосылки для перевода всего АПК на удаленных и труднодоступных территориях на автономное энергоснабжение от возобновляемых источников.

Аналогичные преимущества демонстрируют и другие виды возобновляемой энергетики. Например, ветроэнергетические установки характеризуются низкой экологической нагрузкой, использованием неисчерпаемого ресурса ветра и длительным сроком службы [10-13]. В перспективе развитие технологий ветрогенерации также приведёт к снижению стоимости энергии. Особый интерес представляет изучение эффективности работы ветроэлектростанций в прибрежных районах, где присутствие морского бриза создаёт устойчивые воздушные потоки. Реализация таких проектов позволит снизить энергетические затраты местных потребителей, уменьшить антропогенное воздействие на уникальные экосистемы и создать основу для перевода всех рассматриваемых территорий на энергоснабжение от возобновляемых источников.

Цель исследования заключается в обосновании территориального размещения и комплектации специализированным оборудованием системы энергоснабжения потребителей с использованием генерации на солнечных панелях. Объектом исследования является молочная ферма, находящаяся в условиях Арктической зоны. Предмет исследования – система автономного электроснабжения на основе фотоэлектрической станции, предназначенная для энергообеспечения электропотребителей рассматриваемого объекта.

Объекты и методы

В рамках совершенствования методологической базы исследования в работе применялись фундаментальные теоретические методы. Решение сформулированных задач осуществлялось на основе общепризнанных теоретических принципов, расчётных параметров проектирования фотоэлектрических систем, статистического анализа, математического моделирования и энергоэкономической оценки. Аналогичным образом для расширения инструментария научного исследования были задействованы аналитические и теоретические подходы. Реализация исследовательских задач опиралась на устоявшиеся научные концепции, проектные показатели создания объектов солнечной энергетики, методы статистической обработки информации, компьютерного имитационного моделирования и комплексного анализа экономической эффективности энергетических решений.

Экспериментальная часть

Исследуемый объект дислоцируется в арктической зоне на отметке около 500 м над уровнем моря. В состав инфраструктуры входят: главный корпус на 2100 м²; две хозяйственных постройки на 150 м²; производственный цех на 4500 м². Нормирование энергопотребления выполнено на основе удельных показателей на одного условного потребителя: постройка 1 – 0,36 кВт/усл. ед.; постройка 1 – 0,7 кВт/усл. ед.; постройка 2 – 1,04 кВт/усл. ед.

Расчет нагрузок объекта приведен в таблице 1, которая представляет расчёт электрических нагрузок с разбивкой по потребителям. Для каждого объекта указаны количество мест, единичная и установленная мощность, коэффициент спроса и расчётная нагрузка. Общая потребляемая мощность комплекса составляет 40 кВт.

На следующем этапе осуществляется подбор наиболее экономически обоснованного комплекта оборудования на основе анализа совокупной

стоимости строительства солнечной электростанции. В качестве базового варианта выбран монокристаллический фотоэлектрический модуль ФСМ-270 мощностью 270 Вт. Температурный диапазон эксплуатации составляет от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Модуль изготовлен из высококачественных монокристаллических элементов категории Grade A с эффективностью преобразования: КПД модуля – 16%; КПД элемента – 18,3%.

В качестве преобразовательного устройства выбирается гибридный инвертор модели Прогресс-48-6000-HYBRID. Для управления процессом заряда аккумуляторных батарей от солнечных панелей используется контроллер заряда «Энергия» MPPT Pro. Данный контроллер особенно эффективен в гибридных энергосистемах, где необходимо координировать работу разнотипных источников энергии.

Таблица 1

Расчет нагрузок объекта АПК

Наименование потребителя	Кол-во мест	Единичная мощность, кВт	Установленная мощность, кВт	Коэффициент спроса, Кс	Расчетная нагрузка, кВт
Постройка 1	70,00	0,36	25,20	0,43	10,84
Постройка 2	10,00	0,70	7,00	0,60	4,20
Постройка	120,00	1,04	124,80	0,20	24,96
Итого					40,00

Результаты исследований и их обсуждение

Для расчета совокупных инвестиций в проект все единицы запланированного к приобретению оборудования были систематизированы в сводной таблице 2, согласно данным которой общий объем капитальных вложений (K) составляет 831768,00 руб.

Наибольшую долю в смете занимает стоимость основного оборудования – 693140 руб. Накопитель является самой дорогостоящей компонентой системы (327360 руб., или ~39% от общей суммы). Солнечные панели формируют вторую по величине статью расходов (291680 руб., или ~35%). Оставшиеся компоненты – гибридный инвертор (29800 руб.), MPPT-контроллер (40700 руб.) и комплектующие для коммутации (3600 руб.) – вместе составляют существенную, но меньшую часть затрат на оборудование. Затраты на монтаж и пусконаладку оценены в 138628 руб., что составляет ровно 20% от стоимости оборудования. Принимая во внимание, что расчетный период эксплуатации и окупаемости проекта соответствует экономическому сроку службы оборудования, который составляет 20 лет, значение норматив-

ного коэффициента рентабельности (P_n) определяется как величина, обратная этому сроку. Это означает, что проект должен обеспечивать минимальную годовую доходность на вложенный капитал в размере 5%. Основной статьей затрат в данном случае являются ежегодные отчисления на текущее техническое обслуживание и мелкий ремонт оборудования.

Принято считать, что данные расходы составляют примерно 1% от общей стоимости оборудования. Таким образом, ежегодные затраты (C) составят: $C = 6931,4$ руб/год.

Годовой объем электроэнергии, производимой солнечной электростанцией, рассчитывается исходя из ее среднесуточной выработки. Себестоимость одного киловатт-часа, произведенного станцией, составляет 3,32 руб/кВт·ч. Для расчета срока окупаемости проекта определяется совокупная условная «прибыль» (P) – сумма средств, которая была бы сэкономлена за счет замещения сетевой электроэнергии в течение всего срока службы станции (20 лет):

$$P = \text{Тариф} \cdot W \cdot T = 2,64 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \cdot 14600 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \cdot 20 \text{ лет} = 770880 \text{ руб.}$$

Экономические характеристики солнечной электростанции

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Цена за шт., руб.	Сумма, руб.
1	Солнечный модуль ФСМ; 270 Вт; моно	16	18 230	291680
2	Инвертор Прогресс-48-6000-HYBRID	1	29 800	29800
3	Солнечный контроллер «Энергия» MPPT Pro 200В 100А	1	40 700	40700
4	Аккумуляторная батарея DELTA DTM 12-200 (AGM)	12	27 280	327360
5	Разъём гнезда MC 4	8	160	1280
6	У коннекторы солнечных модулей MC 4	4	580	2320
Итого оборудование				693140
7	Строительно-монтажные работы (порядка 20% от стоимости оборудования)			138628
Итого				831768,00

Срок окупаемости ($T_{\text{окуп}}$) – это период, за который совокупные затраты на проект (капитальные и эксплуатационные) окупаются за счет полученной экономии:

$$T_{\text{окуп}} = (K + C \cdot T) / P,$$

где $C \cdot T$ – это совокупные эксплуатационные расходы за весь срок службы.

$$T_{\text{окуп}} = (831768 \text{ руб.} + 6931 \text{ руб./год} \cdot 20 \text{ лет}) / 770880 \text{ руб.} \approx 1,3 \text{ года.}$$

Рассчитанный срок окупаемости в размере 1,3 года свидетельствует о высокой экономической эффективности и целесообразности строительства данной солнечной электростанции для энергоснабжения предприятия АПК.

Заключение

Научная и методологическая составляющая работы заключается в разработке и апробации методического подхода к проектированию автономных энергосистем для специфических условий. Этот подход, включающий расчет нагрузок, подбор адаптированного оборудования и комплексную экономическую оценку, представляет собой универсальный инструмент для обеспе-

чения энергетической устойчивости удаленных территорий.

Практическая значимость исследования демонстрирует применение интеллектуальных технологий на примере выбора ключевых компонентов СЭС: гибридного инвертора с алгоритмами интеллектуального управления энергопотоками и MPPT-контроллера, обеспечивающего максимальную эффективность генерации. Использование такого оборудования является практической реализацией принципов «умной» энергетики, направленной на оптимизацию, надежность и автономность.

Выводы

1. Проведенный анализ подтвердил техническую возможность и практическую целесообразность строительства автономной солнечной электростанции для энергоснабжения автономных объектов АПК на удаленных и труднодоступных территориях Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны.

2. Экономический расчет показал высокую эффективность проекта: при капитальных за-

тратах в 831768 руб. расчетный срок окупаемости составляет 1,3 года.

3. Проекты автономных СЭС в удаленных регионах с высоким тарифным потенциалом являются экономически обоснованными и способны обеспечить полную энергетическую независимость объекта.

4. Работа вносит вклад в достижение цели государственного задания, предлагая конкретное практическое решение для перевода труднодоступного региона на автономное энергоснабжение, что является ключевым элементом его устойчивого развития, снижения экологической нагрузки и повышения качества жизни. Полученные результаты и разработанная методика могут быть тиражированы для других удаленных территорий Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны.

Библиографический список

1. Змиева, К. А. Проблемы энергоснабжения Арктических регионов / К. А. Змиева. – DOI 10.2441/2658-4255-2020-10086. – Текст: непосредственный // Российская Арктика. – 2020. – № 8. – С. 5-14.
2. Новиков, А. В. Экономика прибрежных территорий Арктики: анализ состояния и тенденции развития / А. В. Новиков. – DOI 10.25283/2223-4594-2022-2-200-210. – Текст: непосредственный // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 200-210.
3. Башмаков, И. А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России / И. А. Башмаков. – Текст: непосредственный // Энергосбережение. – 2017. – № 3. – С. 58-72.
4. Солнечная энергетика для энергоснабжения удаленных потребителей в Арктической зоне / И. Е. Кириллов, Н. М. Кузнецов, Н. И. Лазарев, И. Н. Морозов. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 48-58.
5. Дегтярёв, К. С. Перспективы энергоснабжения инфраструктурных объектов на основе возобновляемых источников энергии в российской Арктике / К. С. Дегтярёв, В. А. Панченко, С. В. Майоров. – Текст: непосредственный // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. – 2018. – № 14. – С. 79-91.
6. Митько, А. В. Перспективы ВИЭ в Арктике / А. В. Митько, В. К. Сидоров. – Текст: непосредственный // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 8 (104). – С. 65-67.
7. Грицан, Е. Д. Развитие ВИЭ в Арктике: перспективы и ограничивающие факторы / Е. Д. Грицан. – Текст: непосредственный // Мировые цивилизации. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 26-30.
8. Сологубова, Г. С. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в РФ / Г. С. Сологубова. – Текст: непосредственный // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2020. – № 2 (52). – С. 55-63.
9. Использование возобновляемых источников энергии в Арктике: роль государственно-частного партнерства / И. М. Потравный, Н. Н. Яшалова, Д. С. Бороухин, М. П. Толстоухова. – DOI 10.15838/esc.2020.1.67.8. – Текст: непосредственный // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 144-159.
10. Бежан, А. В. Ветроэнергетика Мурманской области / А. В. Бежан. – Текст: непосредственный // Электрические станции. – 2017. – № 7 (1032). – С. 51-55.
11. Белей, В. Ф. Ветроэнергетика России: анализ научно-технических и правовых проблем / В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин. – Текст: непосредственный // Электричество. – 2011. – № 7. – С. 7-14.
12. Akperov, M., Eliseev, A., Mokhov, I., et al. (2022). Wind Energy Potential in the Arctic and Subarctic Regions and its Projected Change in the 21st Century Based on Regional Climate Model Simulations. *Russian Meteorology and Hydrology*. 47. 428-436. DOI 10.3103/S1068373922060024.

13. Новиков, А. В. Экономика прибрежных территорий Арктики: анализ состояния и тенденции развития / А. В. Новиков. – DOI 10.25283/2223-4594-2022-2-200-210. – Текст: непосредственный // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 200-210.

References

1. Zmиеva, K. A. Problemy energosnabzheniia Arkticheskikh regionov / K. A. Zmиеva // Rossiiskaia Arktika. – 2020. – No. 8. – S. 5-14. – DOI 10.2441/2658-4255-2020-10086.

2. Novikov, A. V. Ekonomika pribrezhnykh territorii Arktiki: analiz sostoiianiia i tendentsii razvitiia / A. V. Novikov // Arktika: ekologiia i ekonomika. – 2022. – Т. 12, No. 2 (46). – S. 200-210. – DOI 10.25283/2223-4594-2022-2-200-210.

3. Bashmakov, I. A. Povyslenie effektivnosti energosnabzheniia v severnykh regionakh Rossii / I. A. Bashmakov // Energoberezhenie. – 2017. – No. 3. – S. 58-72.

4. Kirillov I.E., Kuznetsov N.M., Lazarev N.I., Morozov I.N. Solnechnaia energetika dlia energosnabzheniia udalennykh potrebitel'ei v Arkticheskoi zone // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2025. T. 27. No. 1. С. 48-58. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.

5. Degtiarev, K. S. Perspektivy energosnabzheniia infrastrukturykh ob'ektov na osnove vozobnovliaemykh istochnikov energii v rossiiskoi Arktike / K. S. Degtiarev, V. A. Panchenko, S. V. Maierov // Sovremennye problemy sovershenstvovaniia raboty zheleznodorozhnogo transporta. – 2018. – No. 14. – S. 79-91.

6. Mitko, A. V. Perspektivy VIE v Arktike / A. V. Mitko, V. K. Sidorov // Delovoi zhurnal Neftegaz.RU. – 2020. – No. 8 (104). – S. 65-67.

7. Gritsan, E. D. Razvitie VIE v Arktike: perspektivy i ogranichivaiushchie faktory / E. D. Gritsan // Mirovye tsivilizatsii. – 2021. – Т. 6, – No. 1. – S. 26-30.

8. Sologubova, G. S. Perspektivy razvitiia vozobnovliaemykh istochnikov energii v RF / G. S. Sologubova // Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa. – 2020. – No. 2 (52). – S. 55-63.

9. Ispolzovanie vozobnovliaemykh istochnikov energii v Arktike: rol gosudarstvenno-chastnogo partnerstva / I. M. Potravnyi, N. N. Iashalova, D. S. Boroukhin, M. P. Tolstoukhova // Ekonomicheskie i sotsialnye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz. – 2020. – Т. 13. – No. 1. – S. 144-159. – DOI 10.15838/esc.2020.1.67.8.

10. Bezhan, A. V. Vetroenergetika Murmanskoi oblasti / A. V. Bezhan // Elektricheskie stantsii. – 2017. – No. 7 (1032). – S. 51-55.

11. Belei, V. F. Vetroenergetika Rossii: analiz nauchno tekhnicheskikh i pravovykh problem / V. F. Belei, A. Iu. Nikishin // Elektrichestvo. – 2011. – No. 7. – S. 7-14.

12. Akperov, M., Eliseev, A., Mokhov, I., et al. (2022). Wind Energy Potential in the Arctic and Subarctic Regions and its Projected Change in the 21st Century Based on Regional Climate Model Simulations. *Russian Meteorology and Hydrology*. 47. 428-436. DOI 10.3103/S1068373922060024.

13. Novikov, A. V. Ekonomika pribrezhnykh territorii Arktiki: analiz sostoiianiia i tendentsii razvitiia / A. V. Novikov // Arktika: ekologiia i ekonomika. – 2022. – Т. 12, No. 2 (46). – S. 200-210. – DOI 10.25283/2223-4594-2022-2-200-210.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию «Научные, методологические и практические основы разработки и применения цифровых и интеллектуальных технологий в целях обеспечения устойчивого развития регионов Российской Федерации, включая удаленные и труднодоступные территории Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны»; код научной темы, присвоенной учредителем, – FZNW-2025-0021.

