

Научная статья / Research Article

УДК 621.311.6

ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ МИКРОГЕНЕРАЦИИ

Г.Р. Монгуш¹, А.А. Бавуу²¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО
РАН, Кызыл, Республика Тыва, Россия² Тувинский государственный университет, Кызыл, Республика Тыва, Рос-
сия¹ mongush983@mail. Ru² alash@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения надежного электроснабжения промышленных предприятий в условиях Республики Тыва, характеризующихся значительной удаленностью многих объектов от централизованных энергетических сетей. Проанализированы традиционные подходы к резервированию питания, такие как использование дизель-генераторных установок (ДГУ), и выявлены их недостатки, особенно проявляющиеся в суровых климатических условиях региона. В качестве перспективного решения предложена инновационная система резервного электроснабжения на основе гибридной солнечной электростанции (СЭС) с использованием гибридного инвертора и аккумуляторных батарей. Обоснована экономическая и техническая целесообразность применения солнечной энергии в Туве, обусловленная высоким уровнем солнечной инсоляции, достигающим $5,95 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/м}^2$ в наиболее благоприятные месяцы. Разработана концепция системы, позволяющей не только обеспечить аварийное питание ответственных потребителей, но и снизить затраты на электроэнергию за счет генерации излишков в сеть в рамках развития микрогенерации. Проведенный анализ показывает, что внедрение таких систем может существенно повысить энергетическую безопасность региона, где около 30 % территории находится в зоне децентрализованного электроснабжения.

Ключевые слова: резервное электроснабжение, солнечная энергетика, микрогенерация, гибридный инвертор, Республика Тыва, надежность, бесперебойное питание, энергодефицит

³ Монгуш Г.Р., Бавуу А.А., 2025Инженерные системы и энергетика. 2025. № 3. С. 19–27.
Engineering systems and energy. 2025;(3):19–27.

INNOVATIVE BACKUP POWER SUPPLY SYSTEM FOR ENTERPRISES BASED ON THE USE OF OWN MICROGENERATION

G.R. Mongush, A.A. Bavuu

¹Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Republic of Tyva, Russia

²Tuva State University, Kyzyl, Republic of Tyva, Russia

¹mongush983@mail. Ru

²alash@mail.ru

Abstract. The article discusses the urgent problem of ensuring reliable power supply for industrial enterprises in the conditions of the Republic of Tyva, characterized by the significant remoteness of many facilities from centralized power grids. Traditional approaches to backup power, such as the use of diesel generator sets (DGUs), are analyzed, and their disadvantages, which are particularly evident in the region's harsh climatic conditions, are identified. As a promising solution, an innovative backup power supply system based on a hybrid solar power plant (SPP) using a hybrid inverter and storage batteries is proposed. The economic and technical feasibility of using solar energy in Tyva is justified, due to the high level of solar insolation, reaching 5.95 (kW·h)/m² in the most favorable months. A system concept has been developed that not only provides emergency power for critical consumers but also reduces electricity costs by generating excess power into the grid within the framework of microgeneration development. The analysis shows that the implementation of such systems can significantly increase the energy security of the region, where about 30% of the territory is in a zone of decentralized power supply.

Keywords: backup power supply, solar energy, microgeneration, hybrid inverter, Republic of Tyva, reliability, uninterruptible power supply, energy deficit

Введение. Обеспечение необходимого уровня надежности систем электроснабжения остается одной из ключевых задач при проектировании и эксплуатации промышленных объектов. Особую актуальность эта проблема приобретает для предприятий, территориально удаленных от развитой инфраструктуры, каковыми являются многие объекты в Республике Тыва. Перерыв в электроснабжении таких предприятий, относящихся к 1-й и 2-й категориям надежности, может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования, браку продукции, простоям и созданию опасных ситуаций [1].

Энергосистема Республики Тыва входит в объединенную энергосистему Сибири, но характеризуется значительным дефицитом генерирующих мощностей. По состоянию на 2020 г. на территории Тывы эксплуатировалась 21 электростанция общей мощностью всего 24 МВт, из которых только Кызылская ТЭЦ мощностью 17 МВт работает в составе единой

энергосистемы [2]. Потребление электроэнергии в регионе значительно превышает собственное производство – в 2020 г. этот показатель составил 802,5 млн кВт. ч при максимальной нагрузке 154 МВт [2]. Дефицит покрывается за счет перетоков из соседних регионов, что создает дополнительные риски для надежности энергоснабжения.

Особую проблему представляет электроснабжение удаленных районов республики. Более 30 % территории Тувы находится в зоне децентрализованного электроснабжения, где электроэнергия вырабатывается дизель-генераторами [3]. В регионе функционируют 13 дизельных электростанций общей мощностью около 7 МВт, расположенных в труднодоступных населенных пунктах [3]. Такая система энергоснабжения имеет высокую стоимость и низкую надежность, особенно в зимний период.

Традиционным решением для удаленных объектов является установка дизель-генераторных установок (ДГУ). Однако в условиях Тувы этот подход имеет существенные недостатки: сложность эксплуатации и низкая вероятность запуска при экстремально низких температурах зимой, высокие затраты на доставку и хранение топлива, а также негативное воздействие на экологию. Прокладка же дополнительных резервных линий электропередачи зачастую экономически нецелесообразна из-за сложного горного рельефа и значительной удаленности объектов.

В настоящее время мировой тренд смещается в сторону использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Для Республики Тыва, обладающей значительным солнечным потенциалом (количество солнечных дней в году превышает 250, а уровень инсоляции является одним из самых высоких в Сибири [4]), наиболее перспективным направлением является применение солнечной энергетики.

Цель исследования – является разработка системы резервного электроснабжения предприятия на основе собственной микрогенерации с использованием солнечных панелей, адаптированной к специфическим условиям региона.

В ходе исследования был проведен анализ энергетической ситуации и солнечного потенциала Тувы, разработана концепция гибридной системы и ее технико-экономическое обоснование для различных типов предприятий.

Анализ энергетической ситуации и потенциала солнечной энергетики в Республике Тыва показал, что энергетический сектор экономики составляет основу функционирования отраслей экономики и социальной сферы Тувы. Исторически развитие энергетики в регионе началось с 1925 г., когда в Кызыле появилась первая электростанция мощностью 40 кВт [2]. К 2020 г. энергосистема республики насчитывала 15 электростанций, но их совокупная мощность недостаточна для покрытия потребностей региона. В таблице 1 представлены *показатели энергосистемы РТ*.

Таблица 1

**Основные показатели энергосистемы Республики Тыва
(по состоянию на 2020 г.)**

Показатель	Значение
Количество электростанций	15
Установленная мощность, МВт	24 МВт
Мощность Кызыльской ТЭЦ, МВт	17 МВт
Производство электроэнергии, млн кВт·ч	37 млн кВт · ч
Потребление электроэнергии, млн кВт·ч	802,5 млн кВт · ч
Максимум нагрузки, МВт	154 МВт
Потери в сетях, %	31 %

Источник: составлено по данным [2, 5].

Структура энергопотребления в республике имеет свои особенности: население составляет 21 %, промышленность – 23 %, а потери в сетях достигают 31 % [2]. Высокие потери объясняются как техническими факторами (изношенность сетевого оборудования, значительная протяженность линий электропередачи), так и географическими особенностями региона. Энергосистема Тывы связана с энергосистемами Красноярского края по одной ВЛ 220 кВ и Хакасии по одной ВЛ 220 кВ. Общая протяженность линий электропередачи напряжением 0,4–220 кВ составляет 10 196,3 км. Магистральные линии электропередачи напряжением 220 кВ эксплуатируются филиалом ПАО «ФСК ЕЭС» – «Хакаское ПМЭС», а распределительные сети напряжением 110 кВ и ниже – АО «Тываэнерго» [2].

Потенциал солнечной энергетики в Республике Тыва. Для обоснования выбора солнечной энергии в качестве основы резервной системы для предприятий Тувы был проведен анализ солнечного потенциала региона. Республика Тыва обладает уникальными природно-климатическими условиями, благоприятными для развития солнечной энергетики. Согласно исследованиям, среднегодовая инсоляция в Кызыле составляет 4,35 (кВт·ч)/м², а продолжительность солнечного сияния превышает 2000 ч в год [4]. Высокогорные котловины (до 1700 м) работают как естественные гелиостаты, удлиняя полезную инсоляцию на 2,5 ч в день [6].

Таблица 2

Месячные значения солнечной инсоляции в г. Кызыл

Месяц	Солнечная инсоляция, (кВт·ч)/м ²	Оптимальный угол наклона, град.
Январь	2,49	68
Февраль	3,77	61
Март	5,00	48
Апрель	5,60	33
Май	5,95	17
Июнь	5,94	12
Июль	5,49	14
Август	5,13	26
Сентябрь	4,44	42
Октябрь	3,69	56
Ноябрь	2,58	66
Декабрь	2,02	71
Среднее за год	4,35	42,7

Источник: составлено по данным [4].

Как видно из данных таблицы 2, в период с марта по сентябрь инсоляция превышает (4 кВт·ч)/м², достигая максимума в мае-июне (5,95 и 5,94(кВт·ч)/м² соответственно). Даже в зимние месяцы показатель инсоляции остается на уровне, достаточном для генерации электроэнергии, хотя и с меньшей эффективностью.

Проведенный сравнительный анализ с альтернативными вариантами, в частности с ветрогенерацией, позволяет выделить следующие преимущества солнечной энергетики для условий Тувы:

- **Высокий уровень солнечной инсоляции.** По данным метеонаблюдений, среднегодовая суммарная солнечная радиация на территории Тувы составляет 1200–1400 (кВт·ч)/м², что сопоставимо с южными регионами России [6]. Это обеспечивает высокую суточную выработку энергии солнечными модулями большую часть года.

- **Простота и низкая стоимость монтажа.** В отличие от ветрогенераторов, требующих установки высоких мачт (более 25 м) из-за влияния рельефа и застройки на скорость ветра у земли, солнечные панели могут быть смонтированы на крышах или стенах зданий с помощью стандартных креплений, что значительно дешевле и проще.

- **Минимальные требования к техническому обслуживанию.** Солнечные батареи практически не требуют обслуживания, что критически важно в условиях удаленности многих тувинских предприятий. Ветрогенераторы же нуждаются в регулярном и дорогостоящем обслуживании, особенно в зимний период, когда существует риск замерзания смазки.

- **Экологичность и безопасность.** Работа солнечных панелей бесшумна и не производит вредных выбросов или инфразвука, в отличие от ДГУ и ветрогенераторов, что позволяет размещать их в непосредственной близости от производственных и жилых помещений.

- **Устойчивость к климатическим условиям.** Современные солнечные панели демонстрируют высокую надежность работы в широком диапазоне температур, что особенно важно для условий Тувы с ее континентальным климатом.

Таким образом, для небольших и средних предприятий Тувы с нагрузкой 10–300 кВт использование солнечной энергии для организации резервного питания является наиболее эффективным и экономически обоснованным решением.

Концепция инновационной системы резервного электроснабжения. Предлагаемая система построена на основе гибридной архитектуры, объединяющей возможности автономного и сетевого питания. Такой подход позволяет максимально эффективно использовать преимущества солнечной генерации в условиях переменной нагрузки и изменчивых погодных условий.

Ключевыми компонентами системы являются:

Солнечные панели – основной источник генерации. Для условий Тувы рекомендуется использование монокристаллических панелей с КПД не менее 20 %, обладающих повышенной устойчивостью к температурным колебаниям.

Гибридный инвертор – выполняет функции преобразования постоянного тока в переменный, управления зарядом/разрядом аккумуляторных батарей, обеспечения бесперебойного питания и возможности передачи избыточной электроэнергии в сеть.

Аккумуляторные батареи (АКБ) – накопитель энергии для работы системы в темное время суток и аварийных режимах. Рекомендуется использование литий-ионных АКБ с повышенным циклическим ресурсом.

Контроллер заряда (встроенный в инвертор) – для оптимизации работы солнечных панелей по технологии MPPT (отслеживание точки максимальной мощности).

Система мониторинга и управления – позволяет отслеживать параметры работы системы и оптимизировать режимы работы.

Принцип работы системы основан на интеллектуальном управлении энергопотоками:

- В нормальном режиме нагрузка питается от центральной сети. Солнечные панели генерируют электроэнергию для покрытия собственных нужд предприятия. Излишки энергии используются для зарядки АКБ, а при их полном заряде – могут выдаваться в сеть.

- При пропадании напряжения в центральной сети гибридный инвертор мгновенно (за 2–20 мс) переключает питание нагрузки на энергию от солнечных панелей и аккумуляторов.

- После восстановления сетевого напряжения система автоматически возвращается в нормальный режим работы.

Научная новизна предлагаемого решения для условий Тувы заключается в следующем:

- Адаптация принципов микрогенерации и использования гибридных инверторов для специфических климатических и инфраструктурных условий Республики Тыва.

- Комплексный подход, при котором система резервного питания не только обеспечивает аварийную защиту, но и становится активным элементом энергосистемы предприятия, снижая затраты на электроэнергию.

- Использование аккумуляторов в качестве буферных накопителей в контуре гибридной системы, что повышает ее эффективность.

- Разработка алгоритма интеллектуального управления зарядом/разрядом АКБ, учитывающего прогноз погоды и график нагрузки предприятия.

Результаты исследований и их обсуждение. Для оценки эффективности предлагаемого решения рассмотрим три типовых сценария применения системы на предприятиях Республики Тыва:

- **Сценарий 1. Небольшое предприятие с нагрузкой 10–20 кВт.** Система включает солнечные панели мощностью 15–30 кВт, АКБ емкостью 30–50 кВт·ч и инвертор мощностью 15–20 кВт. Ориентировочная стоимость системы составляет 1,5–2,5 млн руб., срок окупаемости – 5–7 лет.

- **Сценарий 2. Среднее предприятие с нагрузкой 50–100 кВт.** Система включает солнечные панели мощностью 100–150 кВт, АКБ емкостью 100–200 кВт·ч и инверторы общей мощностью 50–100 кВт. Ориентировочная стоимость – 7–12 млн руб., срок окупаемости – 4–6 лет.

- **Сценарий 3. Крупное предприятие с нагрузкой 200–300 кВт.** Система включает солнечные панели мощностью 300–500 кВт, АКБ емкостью 400–600 кВт·ч и инверторы общей мощностью 200–300 кВт. Ориентировочная стоимость – 25–40 млн руб., срок окупаемости – 6–8 лет.

Внедрение системы сопряжено с рисками, которые необходимо учитывать:

- **Климатические риски:** продолжительные периоды облачности. Для минимизации предлагается увеличение емкости АКБ и интеграция с резервным ДГУ.

- **Технические риски:** выход из строя компонентов. Рекомендуется использование оборудования с гарантией не менее 10 лет.

- **Экономические риски:** изменения в законодательстве и тарифах. Система имеет модульную архитектуру, позволяющую наращивать мощность.

Результаты исследования имеют высокое прикладное значение для промышленных предприятий Республики Тыва. Внедрение разработанной системы позволит:

- существенно повысить надежность электроснабжения ответственных потребителей;
- снизить эксплуатационные расходы на электроэнергию за счет генерации излишков в сеть;
- повысить энергетическую независимость региона;
- сократить экологический след деятельности предприятий.

Ожидаемый экономический эффект для среднего предприятия составляет от 500 тыс. до 1,5 млн руб. в год за счет экономии на топливе для ДГУ и снижения платежей за электроэнергию.

Заключение Таким образом, проведенный анализ подтвердил остроту проблемы надежного электроснабжения удаленных предприятий Республики Тыва и недостаточную эффективность традиционных решений на основе ДГУ.

В ходе проведенных исследований обоснована высокая целесообразность использования солнечной энергии для условий Тувы, где уровень инсоляции является одним из самых высоких в Сибири (до 5,95 (кВт·ч)/м²). Разработана концепция инновационной гибридной системы резервного электроснабжения, сочетающей функции бесперебойного питания и микрогенерации, адаптированная к климатическим и инфраструктурным особенностям региона. Выполнено технико-экономическое обоснование внедрения системы для предприятий различной мощности, показавшее срок окупаемости проектов от 4 до 8 лет.

Установлено, что широкое внедрение подобных систем будет способствовать повышению энергетической безопасности и социально-экономическому развитию Республики Тыва.

Список источников

1. Анализ потерь электроэнергии и пути их снижения в электрических сетях Республики Тыва / Ч.П. Монгуш [и др.]// Омский научный вестник. 2017. № 6. С. 91–96.
2. Кысыыдак А.С., Ондар Ю.Ч., Сендажи Ч.В. Развитие энергетики Тувы: История и современность// Вестник Тувинского государственного университета. Выпуск 3. Технические и физико-математические науки. 2020. № 4 (70). С. 21–32.
3. Куликова М.П., Балакина Г.Ф. Возможности и проблемы энергогенерации в Республике Тыва //Горная Промышленность. 2024. № 3. С. 131–134.
4. Значение солнечной инсоляции в г. Кызыл (Республика Тыва) // Betaenergy. URL: <https://www.betaenergy.ru/insolation/kyzyl/> (дата обращения: 12.12.2024).
5. Тыва внедряет альтернативные источники энергии! // INECA. URL: <https://ineca.ru/?dr=library&library=bulletin/2009/0136/010> (дата обращения: 12.12.2024).
6. Солнечный код России: в каких регионах светило становится союзником здоровья // iXBT.

URL: <https://www.ixbt.com/live/science/solnechnyy-kod-rossii-v-kakih-regionah-svetilo-stanovitsya-soyuznikom-zdorovya.html> (дата обращения: 12.12.2024).

7. International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA Publications; 2023.
8. Energy Storage Integration in Solar Photovoltaic Systems: Technical and Economic Analysis // Renewable Energy Journal. 2023. V. 45(2). P. 112–125.
9. Hybrid renewable energy systems for remote industrial facilities: A review // Energy Reports. 2024. № 10. С. 2150–2165.
10. Инсоляция в Кызыле // Nova-sun. URL: <https://nova-sun.ru/insolyatsiya-v-rossii/kyzyl> (дата обращения: 12.12.2024).

References

1. Analiz poter' ehlektroehnergii i puti ikh snizheniya v ehlektricheskikh setyakh Respubliki Tyva / CH.P. Mongush [i dr.]// Omskii nauchnyi vestnik. 2017. № 6. S. 91–96.
2. Kysyydak A.S., Ondar YU.CH., Sendazhi CH.V. Razvitie ehnergetiki Tuvy: Istoriya i sovremennost'// Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 3. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki. 2020. № 4 (70). S. 21–32.
3. Kulikova M.P., Balakina G.F. Vozmozhnosti i problemy ehnergogene-ratsii v Respublike Tyva //Gornaya Promyshlennost'. 2024. № 3. S. 131–134.
4. Znachenie solnechnoi insolyatsii v g. Kyzyl (Respublika Tyva) // Betaenergy. URL: <https://www.betaenergy.ru/insolation/kyzyl/> (data obrashcheniya: 12.12.2024).
5. Tyva vnedryaet al'ternativnye istochniki ehnergii! // INECA. URL: <https://ineca.ru/?dr=library&library=bulletin/2009/0136/010> (data obrashcheniya: 12.12.2024).
6. Solnechnyi kod Rossii: v kakikh regionakh svetilo stanovitsya soyuz-nikom zdorov'ya // iXBT. URL: <https://www.ixbt.com/live/science/solnechnyy-kod-rossii-v-kakih-regionah-svetilo-stanovitsya-soyuznikom-zdorovya.html> (data obrashche-niya: 12.12.2024).
7. International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA Publications; 2023.
8. Energy Storage Integration in Solar Photovoltaic Systems: Technical and Economic Analysis // Renewable Energy Journal. 2023. V. 45(2). P. 112–125.
9. Hybrid renewable energy systems for remote industrial facilities: A review // Energy Reports. 2024. № 10. S. 2150–2165.
10. Insolyatsiya v Kyzyle // Nova-sun. URL: <https://nova-sun.ru/insolyatsiya-v-rossii/kyzyl> (data obrashcheniya: 12.12.2024).

Сведения об авторах

Григорий Романович Монгуш, старший научный сотрудник
Бавуу Алаш Анатольевич, магистрант