

Исследование энергосистемы «ГЭС – Алюминиевый завод»

И.П. Соболева^{1a}, С.И. Ножко^{2b}, Н.С. Давыдович^{2c}

¹ АО «Мосэнергосбыт», 117420 г. Москва, ул. Наметкина, д. 9 строение 2

² ПАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод», 665716 г. Братск Иркутской обл., Промплощадка БрАЗа

^a isoboleva2017@mail.ru, ^b semen.nozhko@rusal.com, ^c Nikita.Davydovich@rusal.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-9872-591X>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7437-5145>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7437-5145>

Статья поступила 23.12.2025, принята 27.01.2026

В статье изучена энергетическая система «ГЭС – Алюминиевый завод». Для исследования взаимосвязи между генератором электрической энергии в виде ГЭС и основным потребителем энергии – алюминиевым заводом, была проанализирована генерация и потребление электрической энергии в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод» за два календарных года. Показано, что в дневной период генерация электрической энергии на ГЭС существенно возрастает, при этом потребление электрической энергии на алюминиевом заводе остаётся практически неизменным. Описанные в рамках статьи исследования показали хорошую сходимость температуры окружающей среды и коэффициента преобразования переменного тока в постоянный: снижение температуры окружающей среды на 1 °C увеличивает коэффициент преобразования переменного тока в постоянный на 0,00004 ед., что сопоставимо со снижением потерь электроэнергии на 1776 кВт · ч в месяц. В рамках проведённых исследований также была определена хорошая сходимость температуры окружающей среды и падения напряжения в ошиновке электролизеров: снижение температуры окружающей среды на 1 °C снижает падение напряжения в ошиновке на 1,1 мВ, что сопоставимо со снижением потерь электроэнергии на 306 625 кВт · ч в месяц. Энергетический эффект от снижения температуры окружающей среды за счёт уменьшения сопротивления в токоведущей ошиновке электролизеров на два порядка больше, чем энергетический эффект от увеличения эффективности преобразования переменного тока в постоянный. Разработан опытный график внутрисуточной модуляции мощности, который позволяет снизить генерацию электрической энергии на гидроэлектростанции в часы максимума энергосистемы на 8 %, при этом максимум потребляемой алюминиевым заводом мощности перенесён на ночные часы.

Ключевые слова: энергосистемы; надёжность; гидроэлектростанция; потребление энергии; алюминиевый завод.

Study of the energy system "Hydroelectric Power Station – Aluminum Plant"

I.P. Soboleva^{1a}, S.I. Nozhko^{2b}, N.S. Davydovich^{2c}

¹ Mosenergosbyt, JSC; 9/2, Nametkin St., Moscow, Russia

² Bratsk Aluminum Plant; BrAZ Industrial site, Bratsk, Russia

^a isoboleva2017@mail.ru, ^b semen.nozhko@rusal.com, ^c Nikita.Davydovich@rusal.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-9872-591X>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7437-5145>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7437-5145>

Received 23.12.2025, accepted 27.01.2026

The article studies the energy system "Hydroelectric Power Station – Aluminum Plant". To study the relationship between the electrical energy generator in the form of a hydroelectric power station and the main energy consumer – an aluminum plant, the generation and consumption of electrical energy in the "Hydroelectric Power Station – Aluminum Plant" power system for two calendar years is analyzed. It is shown that during the daytime the generation of electrical energy at Hydroelectric Power Station increases significantly, while the consumption of electrical energy at Aluminum Plant remains practically unchanged. The studies described in the article show good agreement between the ambient temperature and the efficiency of converting alternating current into direct current: a decrease in ambient temperature by 1 °C increases the efficiency of the gearbox by 0,00004 units, which is comparable to a reduction in electricity losses by 1776 kWh per month. As part of the research, a good convergence of the ambient temperature and the voltage drop in the busbar of electrolyzers is also determined: a decrease in ambient temperature by 1 °C reduces the voltage drop in the busbar by 1,1 mV, which is comparable to a reduction in electricity losses by 306,625 kWh per month. The energy effect from reducing the ambient temperature by reducing the resistance in the current-carrying busbar of electrolyzers is two orders of magnitude greater than the energy effect from increasing the efficiency of converting alternating current into direct current. An experimental schedule for intra-daily power modulation has been developed, which makes it possible to reduce the generation of electrical energy at a hydroelectric power station during peak hours of the power system by 8 %, while the maximum power consumed by an aluminum plant is transferred to the night hours.

Keywords: power systems; reliability; hydroelectric power station; energy consumption; aluminum plant.

Введение. Для выравнивания генерации и потребления электроэнергии возможны различные технические варианты. Так, в работе [1] описано использование солнечной генерации для ликвидации пикового энергопотребления в Ставропольском крае в летний

период. Из текста работы следует вывод, что солнечная электростанция в период экстремально высоких температур, перегрузки линий электропередач 110 кВ, может быть целесообразно размещена рядом с потребителем электроэнергии, что подтверждается как моделируе-

мыми балансами генерации и потребления электрической энергии, так и на основе длительных метеонаблюдений.

Однако в работах [2–5] исследователи отмечали сложности, связанные со снижением пропускной способности ЛЭП в жаркий период. Снижение пропускной способности ЛЭП вследствие нагрева проводов существенно снижало возможность использования возобновляемых источников энергии (в том числе солнечных электростанций) для обеспечения увеличенной потребности в электроэнергии в летний период.

В работе [6] рассмотрен вариант использования ветровой генерации для снижения пиковой нагрузки. Авторами показано, что данной способ может быть использован в ограниченном режиме, потому как ветровая генерация не может являться самостоятельным независимым видом генерации. Ее использование возможно только лишь в совокупности с другими видами генерации.

В работе [7] рассмотрена возможность использования прогнозной аналитики для управления генерацией и потреблением электроэнергии и показана высокая эффективность использования данного метода для обеспечения надёжности работы энергосистемы.

Есть и другие работы, в которых описано использование искусственного интеллекта в целях обеспечения надёжности функционирования энергосистем. Так, в работе [8] предлагается децентрализованный метод противоаварийного управления режимом работы изолированных энергосистем. Используемый метод основан на мультиагентной структуре глубокого обучения с подкреплением. На основе численных экспериментов подтверждается возможность работы предложенного метода в режиме реального времени. Авторами исследования [9] были использованы глубокие искусственные нейронные сети для разработки метода противоаварийного управления с целью управления частотой переменного тока. Для противоаварийного управления режимами работы изолированных энергосистем широкое применение находит алгоритм обучения (Q-learning), который является одним из ответвлений алгоритмов глубокого машинного обучения. Исследование [10] направлено на управление частотой в изолированных энергосистемах. Предлагается подход, использующий алгоритм Q-обучения для определения необходимого объёма отключаемой нагрузки при значительном снижении частоты. Кроме того, представлен дополнительный алгоритм intentional voltage manipulation (IVM), который использует зависимость нагрузок от напряжения в качестве метода для содействия регулированию частоты. Проблемы динамической и статической устойчивости не рассматриваются. Гибридный адаптивный метод обучения представлен в исследовании [11]. Авторы предложили распределенный операционный метод, основанный на двойном глубоком Q-обучении для управления изолированной энергосистемой при наличии ESS.

В работе [12] представлен адаптивный метод управления режимами работы изолированной энергосистемы. Авторы предложили метод распараллеливания работы алгоритма Q-обучения (Qlearning). Авторами исследования [13] рассмотрена проблема противоаварийного управления за счёт изменения режимов работы автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов. В работе используется алгоритм эволюционного

глубокого машинного обучения с подкреплением, который направлен на поддержание требуемых уровней напряжений в послеаварийном режиме энергосистемы, проблемы обеспечения устойчивости не рассматриваются. Исследование [14] направлено на разработку метода управления частотой в изолированной энергосистеме на основе мультиагентного подхода и глубоких нейронных сетей.

Авторами работы [15] разработана адаптивная система противоаварийного управления режимом энергосистемы с целью обеспечения устойчивости по напряжению. Для разработки системы был использован алгоритм Proximal Policy Optimization в сочетании с глубокой нейронной сетью. В работах [16–19] предлагаются схожие алгоритмы противоаварийного управления режимом энергосистемы с целью обеспечения устойчивости по напряжению, отличающиеся различными подходами к построению и обработке обучающей выборки, а также условиями тестирования.

Прогнозная аналитика и другие методы искусственного интеллекта позволяют существенно улучшить скорость реагирования на изменение дисбаланса в генерации и потреблении, не допустить возникновения аварийной ситуации и безусловно имеют право на существование, однако в конечном счёте всё сводится к задействию существующих способов увеличения генерации для обеспечения пикового потребления.

В качестве альтернативы традиционным методам выравнивания генерации и потребления энергии также рассматривается применение системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Выделяется множество типов подсистем накопления СНЭЭ, однако для решения задачи улучшения условий динамической устойчивости наиболее актуальными являются электрохимические накопители энергии, в частности литий-ионные аккумуляторные батареи, накопители на базе суперконденсаторов, маховиковые накопители, а также сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии [20–21]. В работе основное внимание уделяется СНЭЭ с подсистемой накопления на базе литий-ионных аккумуляторов, как наиболее перспективного типа накопителя электрической энергии [21–22]. Они обладают широким диапазоном энергоёмкостей и мощностей, имеют возможность технической осуществимости в промышленных масштабах на современном этапе развития науки и техники, что подтверждено многочисленными исследованиями и практическим применением [22]. В условиях модернизации энергетической отрасли России, основанной на новых технологических решениях, разработка и применение систем накопления электрической энергии является актуальной [23–24]. Следует, однако, отметить, что системы накопления энергии отличаются относительно небольшой эффективной мощностью и достаточно высокой ценой.

В системах энергоснабжения городов для обеспечения надёжности работы энергосистем могут найти применение накопители с технологией явного аккумулирования тепловой энергии. К ним относят резервуары, ямы, скважины и водоносный горизонт.

Предпочтение следует отдавать резервуарам. Они компактны, безопасны и просты в эксплуатации, легко

интегрируются в существующую систему энергоснабжения, но главное, изготавливаются на отечественных заводах.

Повсеместно распространено использование резервуаров для резервирования, однако в отечественной практике отсутствуют типовые решения по применению систем накопления тепла для выполнения функции перераспределения энергии. При дополнении систем теплоснабжения резервуаром появляется возможность переноса тепловой энергии и выравнивания графика загрузки источника в течение суток-недели-месяца. За рубежом получило распространение применение резервуаров для повышения КИУМ теплового источника [25, 26]. Однако выбор конкретного резервуара производится по упрощенным правилам. Например, в Великобритании 1 кВт тепловой мощности соответствует 20–30 литрам объёма [25]. Многие авторы предлагают математические модели выбора теплового накопителя для конкретного объекта [25–28], однако их подход ориентирован на индивидуальное изготовление резервуаров и не предполагает масштабирования результатов для формирования типовых решений. Данные технические решения ограничено могут быть использованы в локальных энергетических сетях для повышения их надёжности.

Энергетические комплексы для производства электроэнергии из водорода на основе топливных элементов (ТЭ) представляют интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения, поскольку расширение их использования является одной из важных составляющих развития водородной энергетики [29]. Также имеется определённый оптимизм насчёт использования водородной энергетики в качестве одного из элементов обеспечения общей надёжности энергосистемы. Использование водородной энергетики в качестве технического решения, обеспечивающего надёжность энергетической системы, на данном этапе изучено поверхностно и на практике практически не применяется [30].

В Российской Федерации для выравнивания генерации и потребления электроэнергии традиционно широко используется гидроэнергетика [31–33], однако перспективным направлением выглядит участие крупных потребителей электроэнергии в управлении генерацией и потреблением энергии [34–36].

Изучение генерации и потребления электроэнергии в энергетической системе «ГЭС – Аллюминиевый завод». Для исследования взаимосвязи между генератором электрической энергии в виде ГЭС и основным потребителем энергии – аллюминиевым заводом, была проанализирована генерация и потребление электрической энергии в энергосистеме «ГЭС – Аллюминиевый завод» за два календарных года. Результат изучения приведён на рис. 1, 2.

Сопоставление генерации и потребления в энергосистеме «ГЭС – Аллюминиевый завод» показывает, что потребление электрической энергии аллюминиевым заводом достаточно равномерно в течение года, выработка энергии на ГЭС меняется в более широком диапазоне. Это связано как с проведением плановых ремонтных работ на ГЭС, так и изменением водостока в различное время года.

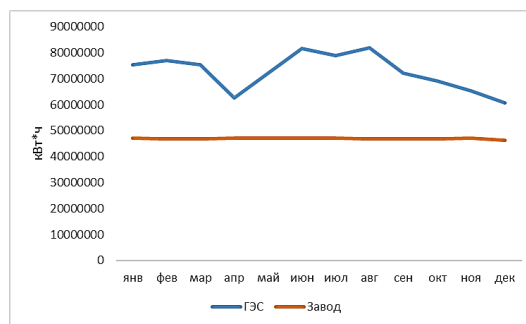


Рис. 1. Генерация и потребление энергии в системе «ГЭС – Аллюминиевый завод» в 2024 году

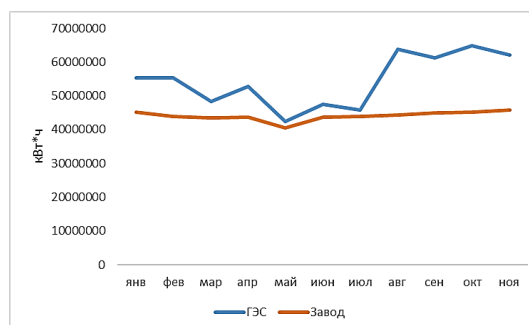


Рис. 2. Генерация и потребление энергии в системе «ГЭС – Аллюминиевый завод» в 2025 году

На рис. 3. приведена доля потребления электрической энергии Аллюминиевым заводом в полной генерации электрической энергии ГЭС за два календарных года. Анализ рис. 3 показывает, что доля потребления электрической энергии в генерации ГЭС изменяется в значительной степени от 57 до 96 %, при этом среднее значение за два года составило 73 %.

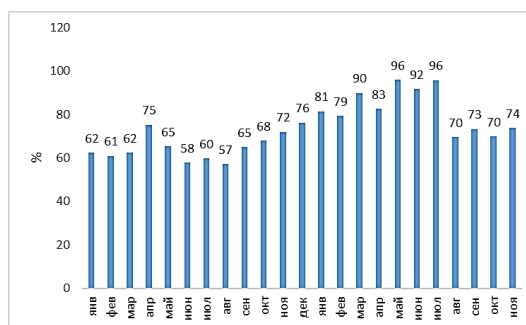


Рис. 3. Доля потребления электрической энергии Аллюминиевым заводом в полной генерации электрической энергии ГЭС

На рис. 4 представлена типичная внутрисуточная генерация и потребление электрической энергии в энергосистеме «ГЭС – Аллюминиевый завод». Ввиду того, что установленные мощности ГЭС используются в том числе для обеспечения общей надёжности энергосистемы и гашения пикового потребления, генерация энергии в течение суток сильно неравномерна. Отдельно следует отметить, что в ночные часы генерация снижается до сопоставимого с потреблением аллюминиевого завода значения. То есть энергосистема «ГЭС – Аллюминиевый завод» на 99 % становится замкнутой.

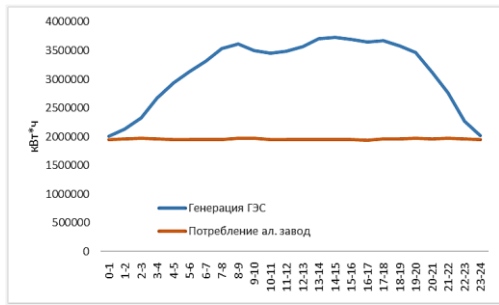


Рис. 4. Внутрисуточная генерация и потребление электроэнергии в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод»

На рис. 5 представлена почасовая доля генерации в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод». Сопоставление с рис. 4 рис. 5 показывает, что маневровые мощности генерации, задействованные на ликвидацию пиковых нагрузок, составляют по суткам до 38 % от всей генерации. При этом суточное потребление алюминиевого завода в почасовом измерении изменяется незначительно.

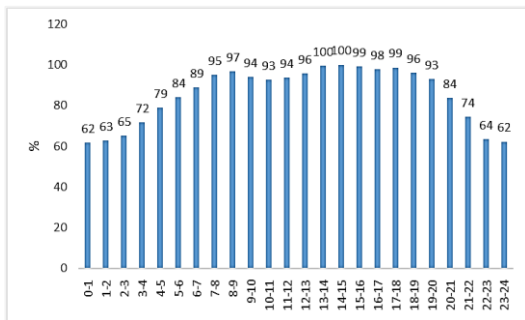


Рис. 5. Почасовая доля генерации в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод» от максимального суточного значения

Исследование энергетического режима работы алюминиевого завода. Исследуемая энергетическая система находится в регионе с резко-континентальным климатом; резко-континентальному климату свойственны большие по диапазону изменения температуры окружающей среды (рис. 6).

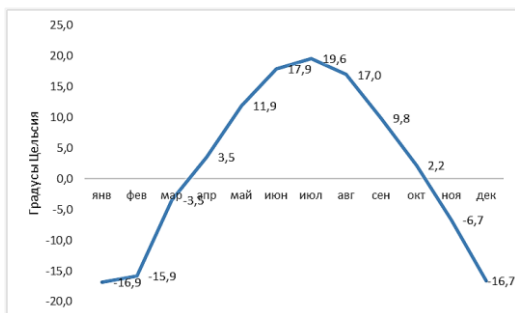


Рис. 6. Динамика температуры окружающей среды в районе расположения рассматриваемой энергосистемы «ГЭС – Алюминиевый завод»

Анализ рис. 6 показывает, что среднесуточные температуры окружающей среды в разрезе «зима – лето» изменяются существенно (более, чем на 35 °C). Таким образом, изменение температуры окружающей среды будет существенно влиять на энергопотребление алю-

миниевого завода за счёт изменения температуры проводников, а также изменения коэффициента полезного действия при преобразовании переменного тока в постоянный (КПД КПП).

На рис. 7 представлена взаимосвязь температуры окружающей среды и коэффициента полезного действия при преобразовании переменного тока в постоянный.

Анализ рис. 7 показывает хорошую сходимость температуры окружающей среды и КПД КПП (коэффициент корреляции $R = 0,647$): снижение температуры окружающей среды на 1 °C увеличивает КПД КПП на 0,00004 ед., что сопоставимо со снижением потерь электроэнергии на 1776 кВт · ч в месяц.

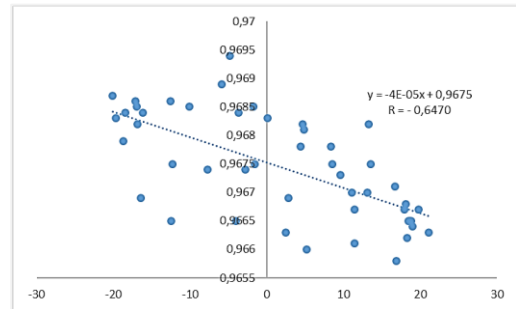


Рис. 7. Взаимосвязь КПД КПП и температуры окружающей среды

На рис. 8 представлена взаимосвязь падения напряжения в ошиновке электролизеров и температуры окружающей среды. Следует отметить хорошую сходимость температуры окружающей среды и падения напряжения в ошиновке электролизеров (коэффициент корреляции $R = 0,8027$): снижение температуры окружающей среды на 1 °C снижает падение напряжения в ошиновке на 1,1 мВ, что сопоставимо со снижением потерь электроэнергии на 306 625 кВт · ч в месяц.

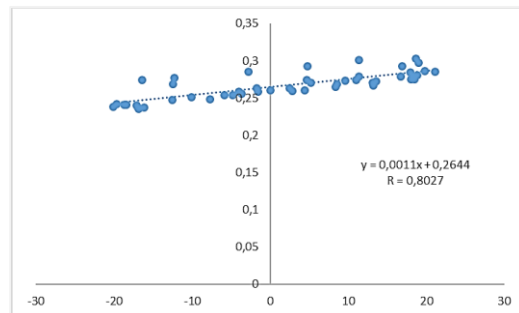


Рис. 8. Взаимосвязь падения напряжения в ошиновке электролизеров и температуры окружающей среды

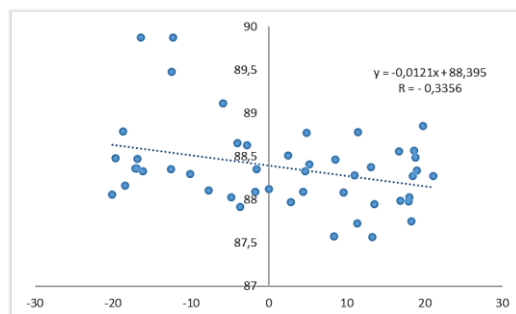


Рис. 9. Взаимосвязь выхода по току и температуры окружающей среды

Таким образом следует констатировать, что энергетический эффект от снижения температуры окружающей среды за счёт уменьшения сопротивления в токоведущей ошиновке электролизеров на два порядка больше, чем энергетический эффект от увеличения КПД КПП (эффективности преобразования переменного тока в постоянный)

В процессе исследования взаимосвязи между температурой окружающей среды и выходом по току на алюминиевых электролизерах – основной параметр, по которому оценивается эффективность работы электролизера – не было выявлено устойчивой корреляции между данными параметрами, что свидетельствует об отсутствии взаимосвязи между ними.

Опытный график модуляции мощности алюминиевым заводом. Проведённый анализ функционирования энергосистемы «ГЭС – Алюминиевый завод», а также определённые в данной работе резервы по модуляции потребляемой мощности алюминиевым заводом позволили разработать график внутрисуточной модуляции мощности, направленный на снижение пиковых нагрузок и перераспределения потребляемой мощности алюминиевым заводом на ночные часы (рис. 10).

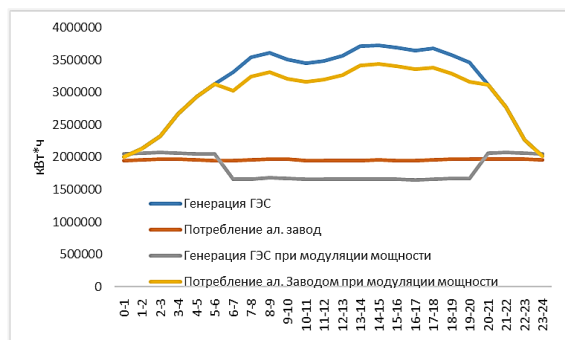


Рис. 10. Изменение генерации и потребления мощности в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод» при работе по графику модуляции мощности алюминиевым заводом

Представленный на рис. 10 график модуляции потребляемой алюминиевым заводом мощности позволяет снизить генерацию энергии на ГЭС на 8 % от пиковой мощности. Также положительным моментом следует признать перенос потребляемой мощности в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод» на ночные часы. В ночные часы внутрисуточная температура ниже, что в целом снижает потери электроэнергии при передаче мощности в энергосистеме «ГЭС – Алюминиевый завод».

Литература

1. Красько М.Д., Пейзель В.М., Жоржеско С.А. Анализ электроэнергетических режимов энергорайона при технологическом приобщении солнечной электростанции // Электроэнергетика глазами молодежи : мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф., 1–4 октября 2024, Ставрополь. В 2 т. Т. 1. – Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет. С. 57–60.
2. Robu V., Früh W.G., Andoni M. Strategic decision-making on lowcarbon technology and network capacity investments using game theory.2020. URL: <http://hdl.handle.net/10399/4382>
3. Sedzro K.S., Horowitz K., Jain A.K., Ding, F., Palmintier B., Mather B. (2021). Evaluating the Curtailment Risk of Non-Firm Utility-Scale Solar Photovoltaic Plants under a Novel

Следует отметить, что в стандартных условиях (без модуляции мощности) энергосистема «ГЭС – Алюминиевый завод» становилась условно замкнутой 3 часа в сутки (когда генерация на ГЭС практически равнялась потреблению алюминиевого завода), то в условиях модуляции потребляемой мощности алюминиевым заводом таких часов внутри суток (когда энергосистема «ГЭС – Алюминиевый завод» становится замкнутой) стало 5.

Заключение. Исследована энергетическая система «ГЭС – Алюминиевый завод», в рамках исследования было выявлено, что в ночной период времени генерация энергии ГЭС и потребление энергии алюминиевым заводом (при отсутствии других значимых потребителей электрической энергии) практически совпадают. При этом алюминиевый завод потребляет примерно 73 % производимой ГЭС электрической энергии.

В дневной период генерация электрической энергии на ГЭС существенно возрастает, при этом потребление электрической энергии на алюминиевом заводе остаётся практически неизменным. Таким образом, изменение (уменьшение) потребляемой энергии алюминиевым заводом в дневное время существенно повысит общую надёжность энергосистемы.

Проведённые исследования показали хорошую сходимость температуры окружающей среды и КПД КПП (коэффициент корреляции $R = 0,647$): снижение температуры окружающей среды на 1°C увеличивает КПД КПП на $0,00004$ ед., что сопоставимо со снижением потерь электроэнергии на 1776 кВт · ч в месяц.

В рамках проведённых исследований была определена хорошая сходимость температуры окружающей среды и падения напряжения в ошиновке электролизеров (коэффициент корреляции $R = 0,8027$): снижение температуры окружающей среды на 1°C снижает падение напряжения в ошиновке на $1,1$ мВ, что сопоставимо со снижением потерь электроэнергии на $306\ 625$ кВт · ч в месяц.

Энергетический эффект от снижения температуры окружающей среды за счёт уменьшения сопротивления в токоведущей ошиновке электролизеров на два порядка больше, чем энергетический эффект от увеличения КПД КПП (эффективности преобразования переменного тока в постоянный).

Разработан опытный график внутрисуточной модуляции мощности, который позволяет снизить генерацию электрической энергии на ГЭС в часы максимума энергосистемы на 8 %, при этом максимум потребляемой алюминиевым заводом мощности перенесён на ночные часы.

- Last-In First-Out Principle of Access Interconnection Agreement. *Energies*. 14. 1463.
4. Bird L., Cochran, J., Wang, X. Wind and solar energy curtailment: experience and practices in the United States. 2014. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60983.pdf>
5. S. Alyami, C. Wang. «Renewable Curtailment Fairness in Distribution Networks: Application of Division Rules» 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Denver, CO, USA, 2022, pp. 1–5.
6. Цыденов Е.А., Прохоров А.В., Автоматическое управление выработкой активной мощности ветроэлектростанций в условиях ограничений пропускной способности сети // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – № 4. – С. 28–36.

7. Сайтов С.Р., Арасланова О.Ш. Применение машинного обучения при прогнозировании энергопотребления региональной энергосистемы // Электроэнергетика глазами молодежи : мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф. 1–4 октября 2024, Ставрополь. В 2 т. Т 1. – Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, с. 93–96.
8. Li T. et al. Decision tree-based real-time emergency control strategy for power system // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). – IEEE, 2018. – С. 1832–1838.
9. Zhang Y. et al. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. Т. 136. С. 107744.
10. Horri R., Mahdinia Roudsari H. Reinforcement-learning-based load shedding and intentional voltage manipulation approach in a microgrid considering load dynamics // IET Generation, Transmission & Distribution. 2022. Т. 16. № 17. С. 3384–3401.
11. Zhang Q. et al. A learning-based power management method for networked microgrids under incomplete information // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Т. 11. № 2. С. 1193–1204.
12. Chen C. et al. Model-free emergency frequency control based on reinforcement learning // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Т. 17. № 4. С. 2336–2346.
13. Si R. et al. Evolutionary Deep Reinforcement Learning for Volt-VAR Control in Distribution Network // 2022 IEEE 2nd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). IEEE, 2022. С. 1–6.
14. Zhou T. et al. Applications of Reinforcement Learning in Frequency Regulation Control of New Power Systems // 2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI). IEEE, 2022. С. 501–506.
15. Jiang C. X. et al. Power system emergency control to improve short-term voltage stability using deep reinforcement learning algorithm // 2019 IEEE 3rd international electrical and energy conference (CIEEC). IEEE, 2019. С. 1872–1877.
16. Huang Q. et al. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Т. 11. № 2. С. 1171–1182.
17. Zhang J. et al. Load shedding scheme with deep reinforcement learning to improve short-term voltage stability // 2018 IEEE innovative smart grid technologies-Asia (ISGT Asia). IEEE, 2018. С. 13–18.
18. Dasgupta S. et al. Entropy-based metric for characterization of delayed voltage recovery // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Т. 30. № 5. С. 2460–2468.
19. Lammert G. et al. Control of photovoltaic systems for enhanced short-term voltage stability and recovery // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2018. Т. 34. № 1. С. 243–254.
20. Глушкин И.З., Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю. Применение накопителей в энергосистеме для целей противоаварийной автоматики // Евразийский научный журнал. 2015. №11. С. 80–86.
21. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт – Энергетическая политика (energypolicy.ru). 2020. № 6. С. 76–86.
22. Илюшин П.В., Шавловский С.В. Механизмы окупаемости инвестиций в системы накопления электрической энергии при их использовании для снижения пиковых нагрузок и затрат на мощность // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 1. С. 12–20.
23. Булатов Р.В. Методика выбора параметров аккумуляторных систем накопления электрической энергии для эффективной интеграции электростанций на базе возобновляемых источников энергии в энергосистемы // Булатов Р.В., Насыров Р.Р., Бурмейстер М.В. // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 5 (80). С. 44–52.
24. Булатов Р.В., Петракова Т.В. Применение аккумуляторных систем накопления электроэнергии для улучшения условий динамической устойчивости электроэнергетической системы // Электроэнергетика глазами молодежи : мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф., 1–4 октября 2024, Ставрополь. В 2 т. Т. 2. Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет. С. 105–108.
25. Labidi M. et al. Sequential management of optimally-designed thermal storage tanks for multi-energy district boilers // Applied thermal engineering. 2014. Т. 73. № 1. С. 253–266.
26. Pinnau S., Breikopf C. Determination of Thermal Energy Storage (TES) characteristics by Fourier analysis of heat load profiles // Energy conversion and management. 2015. Т. 101. С. 343–351.
27. Labidi M. et al. A new strategy based on power demand forecasting to the management of multi-energy district boilers equipped with hot water tanks // Applied Thermal Engineering. 2017. Т. 113. С. 1366–138.
28. Иванова Е.М. Роль тепловых накопителей в повышении эффективности систем энергоснабжения // Электроэнергетика глазами молодежи : мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф., 1–4 октября 2024, Ставрополь. В 2 т. Т. 2. Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет. С. 75–78.
29. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р).
30. Шалухо А.В., Липужин И.А., Шувалова Ю.Н. Исследование и разработка алгоритмов управления энергетическими комплексами на основе водородных элементов // Электроэнергетика глазами молодежи : мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф., 1–4 октября 2024, Ставрополь. В 2 т. Т. 2. Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, с. 147–150.
31. Зенкин Е.Ю., Ножко С.И., Соболева И.П., Дацюра С.В. Экологические перспективы ценозависимого потребления электроэнергии // Энергетическая политика. 2022. № 2 (168). С. 18–25.
32. Дацюра С.В., Ножко С.И., Соболева И.П. Перспективы ценозависимого энергопотребления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 46–52.
33. Соболева И.П., Дацюра С.В. Перспективы ценозависимого энергопотребления // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов : мат-лы XII Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием (г. Иркутск, 20–21 апреля 2022 г.) : сб. мат-лов. Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2022. с. 63–65.
34. Ножко С.И., Сухов О.Ю. Практика увеличения токовой нагрузки на алюминиевых электролизерах второго поколения // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2 (10). С. 116–120.
35. Терентьев А.А., Ножко С.И. О качестве алюминия-сырца для производства алюминиевой катанки // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1 (37). С. 136–141.
36. Nozhko S.I., Timofeev S.M., Sukhov O.Yu., Vibe R.S., Ovchinnikov A.E., Zimarev S.A. Increase in Productivity of Electrolyzers by Amperage Increasing // Systems. Methods. Technologies. 2017. № 2 (34). С. 54–58.

References

1. Kras'ko M.D., Peyzel' V.M., Zhorzhesko S.A. Analysis of the electrical power regimes of the energy district during the technological connection of a solar power plant // Electric power industry through the eyes of youth: materials of the XIV International Scientific and Practical Conference, October 1–4, 2024, Stavropol. In 2 volumes. Volume 1 – Stavropol, North Caucasus Federal University, p. 57–60.
2. Robu V., Früh W.G., Andoni M. Strategic decision-making on lowcarbon technology and network capacity investments using game theory. 2020. URL: <http://hdl.handle.net/10399/4382>
3. Sedzro K.S., Horowitz, K., Jain, A. K., Ding, F., Palmintier, B., Mather, B. (2021). Evaluating the Curtailment Risk of Non-Firm Utility-Scale Solar Photovoltaic Plants under a Novel Last-In First-Out Principle of Access Interconnection Agreement. *Energies*. 14. 1463.

4. Bird L., Cochran, J., Wang, X. Wind and solar energy curtailment: experience and practices in the United States. 2014. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60983.pdf>
5. S. Alyami, C. Wang, «Renewable Curtailment Fairness in Distribution Networks: Application of Division Rules» 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Denver, CO, USA, 2022, pp. 1–5.
6. Tsydenov E.A., Prokhorov A.V., Automatic control of active power generation of wind power plants under conditions of network capacity limitations // *Electricity. Transmission and distribution*. 2022. No. 4. P. 28–36.
7. Saitov S.R., Araslanova O.Sh. Application of machine learning in forecasting energy consumption of a regional energy system // *Electric power industry through the eyes of youth: materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*, October 1–4, 2024, Stavropol. In 2 volumes. Volume 1. Stavropol, North Caucasus Federal University, p. 93–96.
8. Б Li T. et al. Decision tree-based real-time emergency control strategy for power system // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). IEEE, 2018. C. 1832–1838.
9. Zhang Y. et al. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. T. 136. C. 107744.
10. Horri R., Mahdinia Roudsari H. Reinforcement-learning-based load shedding and intentional voltage manipulation approach in a microgrid considering load dynamics // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022. T. 16. № 17. C. 3384–3401.
11. Zhang Q. et al. A learning-based power management method for networked microgrids under incomplete information // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. T. 11. № 2. C. 1193–1204.
12. Chen C. et al. Model-free emergency frequency control based on reinforcement learning // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. T. 17. № 4. C. 2336–2346.
13. Si R. et al. Evolutionary Deep Reinforcement Learning for Volt-VAR Control in Distribution Network // 2022 IEEE 2nd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). IEEE, 2022. C. 1–6.
14. Zhou T. et al. Applications of Reinforcement Learning in Frequency Regulation Control of New Power Systems // 2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI). IEEE, 2022. C. 501–506.
15. Jiang C. X. et al. Power system emergency control to improve short-term voltage stability using deep reinforcement learning algorithm // 2019 IEEE 3rd international electrical and energy conference (CIEEC). IEEE, 2019. C. 1872–1877.
16. Huang Q. et al. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. T. 11. № 2. C. 1171–1182.
17. Zhang J. et al. Load shedding scheme with deep reinforcement learning to improve short-term voltage stability // 2018 IEEE innovative smart grid technologies-Asia (ISGT Asia). IEEE, 2018. C. 13–18.
18. Dasgupta S. et al. Entropy-based metric for characterization of delayed voltage recovery // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. T. 30. № 5. C. 2460–2468.
19. Lammert G. et al. Control of photovoltaic systems for enhanced short-term voltage stability and recovery // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. T. 34. № 1. C. 243–254.
20. Gluskin I.Z., Efremov D.G., Efremova I.Yu. Application of storage devices in the power system for the purposes of emergency automation // *Eurasian Scientific Journal*. 2015. No. 11. P. 80–86.
21. Zyryanov V.M., Kiryanova N.G., Korotkov I.Yu., Nesterenko G.B., Prankevich G.A. Energy storage systems: Russian and foreign experience *Energy Policy (energypolicy.ru)*. 2020. No. 6. P. 76–86.
22. Ilyushin P.V., Shavlovsky S.V. Mechanisms for return on investment in electrical energy storage systems when used to reduce peak loads and power costs // *Relay protection and automation*. 2021. No. 1. P. 12–20.
23. Bulatov R.V. Methodology for selecting the parameters of battery systems for storing electrical energy for the effective integration of power plants based on renewable energy sources into power systems / Bulatov R.V., Nasyrov R.R., Burmeister M.V. // *Electricity. Transmission and distribution*. 2023. No. 5 (80). P. 44–52.
24. Bulatov R.V., Petrakova T.V. Application of battery electric energy storage systems to improve the conditions for the dynamic stability of the electric power system // *Electric power industry through the eyes of youth: materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*, October 1–4, 2024, Stavropol. In 2 volumes. Volume 2. Stavropol, North Caucasus Federal University, p. 105–108.
25. Labidi M. et al. Sequential management of optimally-designed thermal storage tanks for multi-energy district boilers // *Applied thermal engineering*. 2014. T. 73. № 1. C. 253–266.
26. Pinnau S., Breitkopf C. Determination of Thermal Energy Storage (TES) characteristics by Fourier analysis of heat load profiles // *Energy conversion and management*. 2015. T. 101. C. 343–351.
27. Labidi M. et al. A new strategy based on power demand forecasting to the management of multi-energy district boilers equipped with hot water tanks // *Applied Thermal Engineering*. 2017. T. 113. C. 1366–138.
28. Ivanova E.M. The role of thermal storage devices in increasing the efficiency of energy supply systems // *Electric power industry through the eyes of youth: materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*, October 1–4, 2024, Stavropol. In 2 volumes. Volume 2. Stavropol, North Caucasus Federal University, p. 75–78.
29. Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035 (approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020 No. 1523-r).
30. Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Shuvalova Yu.N. Research and development of control algorithms for energy complexes based on hydrogen elements // *Electric power industry through the eyes of youth: materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*, October 1–4, 2024, Stavropol. In 2 volumes. Volume 2 – Stavropol, North Caucasus Federal University, p. 147–150.
31. Zenkin E.Yu., Nozhko S.I., Soboleva I.P., Datsyura S.V. Environmental prospects for price-dependent electricity consumption // *Energy Policy*. 2022. No. 2 (168). pp. 18–25.
32. Datsyura S.V., Nozhko S.I., Soboleva I.P. Prospects for price-dependent energy consumption // *Systems. Methods. Technologies*. 2022. No. 4 (56). pp. 46–52.
33. Soboleva I.P., Datsyura S.V. Prospects for price-dependent energy consumption // *Prospects for the development of technology for processing hydrocarbon and mineral resources. Materials of the XII All-Russian scientific and practical conference with international participation (Irkutsk, April 20-21, 2022): collection. materials. Irkutsk : IRNITU Publishing House, 2022. p. 63–65.*
34. Nozhko S.I., Sukhov O.Yu. Practice of increasing the current load on second-generation aluminum electrolyzers // *Systems. Methods. Technologies*. 2011. No. 2 (10). pp. 116–120.
35. Terentyev A.A., Nozhko S.I. On the quality of raw aluminum for the production of aluminum rod // *Systems. Methods. Technologies*. 2018. No. 1 (37). pp. 136–141.
36. Nozhko S.I., Timofeev S.M., Sukhov O.Yu., Vibe R.S., Ovchinnikov A.E., Zimarev S.A. Increase in Productivity of Electrolyzers by Amperage Increasing // *Systems. Methods. Technologies*. 2017. № 2 (34). C. 54–5