



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ТРИГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Шайтор Н.М.

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

*littie@mail.ru*

**Резюме:** В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты применения систем тригенерации, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии, предназначенных для энергоснабжения центров обработки данных и других вычислительных комплексов. Цель исследования - обоснование технической, энергетической и экономической целесообразности применения солнечных тригенерационных систем для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов. На примере автономного объекта в Крыму демонстрируется возможность одновременной генерации электроэнергии, тепла и холода с использованием солнечных фотоэлектрических панелей, вакуумных гелиоколлекторов и абсорбционной холодильной машины. Задачи исследования: разработка математической модели тригенерационной системы; оценка энергетического баланса с учётом сезонной изменчивости; определение оптимальной конфигурации оборудования; технико-экономический анализ. Методы исследования: моделирование фотоэлектрической подсистемы, вакуумных гелиоколлекторов, абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины на основе уравнений баланса энергетических потоков; расчёт срока окупаемости, внутренней нормы доходности, капитальных и эксплуатационных затрат. Статья обосновывает целесообразность внедрения подобных систем в южных регионах России и других территориях с высоким уровнем солнечной инсоляции. Ключевым преимуществом описанного подхода является синергетический эффект. Избыточная электроэнергия от фотоэлектрических панелей направляется на абсорбционную машину, производящую холод для кондиционирования серверных залов, что критически важно для их работы. Тепловая энергия от гелиоколлекторов используется для покрытия бытовых нужд и поддержания температурного режима в межсезонье. Интеллектуальная система управления обеспечивает приоритетное использование «зелёной» энергии, а резервирование за счёт традиционных сетей минимизировано. Это позволяет не только достичь высокой степени энергонезависимости, но и значительно снизить углеродный след объекта. Полученные результаты: интеграция солнечных установок с абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной позволила сократить потери тепловой энергии на 66,1%, вырабатывать 8,2 МВт·ч холода в год, повысить автономность объекта с 68% до 89%, достичь срока окупаемости 4,3 года и внутренней нормы доходности 18,5%. Таким образом, предлагаемое решение является технологически и экономически эффективным, способствуя устойчивому развитию энергоёмких цифровых инфраструктур.

**Ключевые слова:** тригенерация; энергоэффективность; центр обработки данных; солнечная энергия; фотоэлектрическая станция; вакуумный гелиоколлектор; абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина; автономное энергоснабжение.

**Для цитирования:** Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Шайтор Н.М. Использование систем тригенерации для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 151-163. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-151-163.

## USING TRIGENERATION SYSTEMS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY OF COMPUTING COMPLEXES

Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Shaitor N.M.

Sevastopol state university, Sevastopol, Russia  
littie@mail.ru

**Abstract:** *The article discusses the theoretical and practical aspects of the application of trigeneration systems integrated with renewable energy sources intended for the power supply of data centers and other computing complexes. The purpose of the study is to substantiate the technical, energy and economic feasibility of using solar trigeneration systems to increase energy efficiency and sustainability of computing complexes. Using the example of an autonomous facility in Crimea, the possibility of simultaneous generation of electricity, heat and cold using solar photovoltaic panels, vacuum solar collectors and an absorption refrigerating machine is demonstrated. Research objectives: development of a mathematical model of a trigeneration system; assessment of the energy balance taking into account seasonal variability; determination of the optimal configuration of equipment; technical and economic analysis. Research methods: modeling of a photovoltaic subsystem, vacuum solar collectors, absorption bromolithium refrigerating machine based on energy flow balance equations; calculation of payback period, internal rate of return, capital and operating costs. The article substantiates the expediency of introducing such systems in the southern regions of Russia and other territories with high levels of solar insolation. The key advantage of the described approach is the synergetic effect. The excess electricity from the photovoltaic panels is directed to an absorption machine that produces cold for air conditioning server rooms, which is critical for their operation. Thermal energy from solar collectors is used to cover household needs and maintain temperature conditions during the off-season. The intelligent control system ensures the priority use of "green" energy, and redundancy due to traditional networks is minimized. This allows not only to achieve a high degree of energy independence, but also to significantly reduce the carbon footprint of the facility. The results obtained: the integration of solar installations with an absorption lithium bromide refrigerating machine made it possible to reduce thermal energy losses by 66.1%, generate 8.2 MWh of cold per year, increase the autonomy of the facility from 68% to 89%, achieve a payback period of 4.3 years and an internal rate of return of 18.5%. Thus, the proposed solution is technologically and economically efficient, contributing to the sustainable development of energy-intensive digital infrastructures.*

**Keywords:** *trigeneration; energy efficiency; data processing center; solar energy; photovoltaic plant; vacuum solar collector; absorption bromolithium refrigerating machine; autonomous power supply.*

**For citation:** Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Shaitor N.M. Using trigeneration systems to increase energy efficiency and sustainability of computing complexes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 151-163. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-151-163.

### **Введение (Introduction)**

Введение. Современные вычислительные комплексы (ВК), в особенности центры обработки данных (ЦОД), представляют собой критически важные объекты с высокой и непрерывной нагрузкой на энергосистему. ВК являются критической инфраструктурой цифровой экономики, однако их развитие сдерживается растущими энергозатратами. На их долю уже сегодня приходится несколько процентов мирового потребления электроэнергии, при этом лишь 30-50% этой энергии расходуется непосредственно на вычисления, а остальное – на системы электропитания и охлаждения [1]. Энергопотребление таких комплексов складывается из двух основных компонентов: питания собственно вычислительного оборудования (IT-нагрузка) и обеспечения функционирования инженерных систем, среди которых системы охлаждения и кондиционирования воздуха, которое могут занимать до 40% и более от общего энергобаланса.

Традиционная схема энергоснабжения вычислительного комплекса подразумевает

закупку электроэнергии из централизованной сети с последующим преобразованием и распределением, а также производство холода с помощью парокомпрессионных чиллеров, потребляющих значительное количество электроэнергии. Это делает объект уязвимым с точки зрения надёжности электроснабжения и ведёт к увеличению эксплуатационных расходов [2].

В контексте глобальных трендов на декарбонизацию, цифровизацию и повышение устойчивости инфраструктуры актуальной задачей становится поиск инновационных, ресурсоэффективных решений для энергоснабжения ЦОД. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение систем тригенерации, то есть комбинированного производства трёх видов энергии (электричество, тепло, холод) из единого первичного источника или группы согласованных источников. При интеграции с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), в частности с солнечной, такие системы позволяют не только повысить общий коэффициент полезного действия энергокомплекса до 80–90%, но и обеспечить высокую степень автономности, снизить затраты на энергоносители и минимизировать экологическое воздействие [3].

Целью данной статьи является комплексное обоснование технической, энергетической и экономической возможности применения солнечных тригенерационных систем для повышения энергоэффективности и устойчивости вычислительных комплексов. Исследование выполнено на примере модели автономного объекта, с частичным электроснабжением от сети, расположенного в регионе с высоким солнечным потенциалом – Крыму. В работе решаются задачи по разработке математической модели системы, определению оптимальной конфигурации оборудования, оценке энергетического баланса в условиях сезонной изменчивости и проведению детального технико-экономического анализа.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В публикациях [1-2] акцентируется внимание на растущем энергопотреблении дата-центров и связанных с этими вызовами для отрасли. Автор подчёркивает необходимость: внедрения энергоэффективных систем охлаждения; использования возобновляемых источников энергии; оптимизации топологии и нагрузки ЦОД; предлагаются конкретные решения по устойчивому охлаждению дата-центров, включая: применение жидкостного охлаждения; использование естественного холода (*free cooling*); интеграцию тепловых насосов для утилизации сбросного тепла.

В публикациях [3, 4, 15, 16, 18] тригенерация (совместная выработка электроэнергии, тепла и холода) рассматривается как перспективный метод повышения энергоэффективности. Авторы раскрывают принцип работы и условия применения тригенерационных установок, подчёркивая их эффективность в условиях переменной нагрузки; анализируют тригенерацию в бинарных комплексах, демонстрируя рост КПД за счёт утилизации вторичных энергоресурсов; доказывают экономическую целесообразность внедрения тригенерационных установок в энергосистемах; рассматривают тригенерацию как инструмент повышения энергетической эффективности на примере промышленных объектов; исследуют интеграцию тригенерации с ВИЭ в южных регионах России, предлагая модели оптимизации для климатических условий.

В публикациях [5, 6, 10] проведены исследования в области солнечной энергетики; проведен анализ характеристики фотоэлектрических панелей, включая зависимость КПД от температуры и освещённости; проведена оценка эффективности солнечных коллекторов для горячего водоснабжения; приведен практический кейс использования солнечной энергии в Казани, доказывая рентабельность в умеренном климате.

В работе [17] автор Волков Э. П. и Шишкин А. Н. обсуждают перспективы модернизации электроэнергетики России, выделяя роль распределённых генераций.

Представленный корпус источников охватывает ключевые направления современной энергетики: развитие дата-центров, тригенерацию, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), аккумулирование энергии и модернизацию энергосистем.

#### *Схемы интеграции с инфраструктурой вычислительного комплекса (Integration schemes with the computing complex infrastructure)*

Интеграция тригенерации может осуществляться по нескольким схемам [4]:

1. Базовая схема - тригенерационная установка покрывает базовую нагрузку по электроэнергии и охлаждению, пиковые нагрузки обеспечиваются сетью и традиционными чиллерами.

2. Схема с приоритетом по холоду - мощность первичного двигателя выбирается

исходя из потребности в тепле для выработки необходимого количества холода, что часто является оптимальным для ВК.

3. Гибридная схема - использование гибридной системы охлаждения, где абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина (АБХМ) работают в тандеме с электрическими чиллерами, оптимизируя работу в зависимости от температуры наружного воздуха и стоимости энергоносителей.

### Методология и модель тригенерационной системы

#### 1. Конфигурация и состав системы тригенерации

В основе исследования лежит гибридная энергосистема тригенерационного типа, содержащая солнечные установки и спроектированная для автономного энергоснабжения вычислительного комплекса с возможностью электроснабжения от сети. Система интегрирует в единый комплекс ключевые компоненты для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода.

На рисунке 1 показана тепловентиляционная схема ЦОД, содержащая солнечную тепловую подсистему, подсистему рекуперации и аккумуляции тепла, и холодильную подсистему.

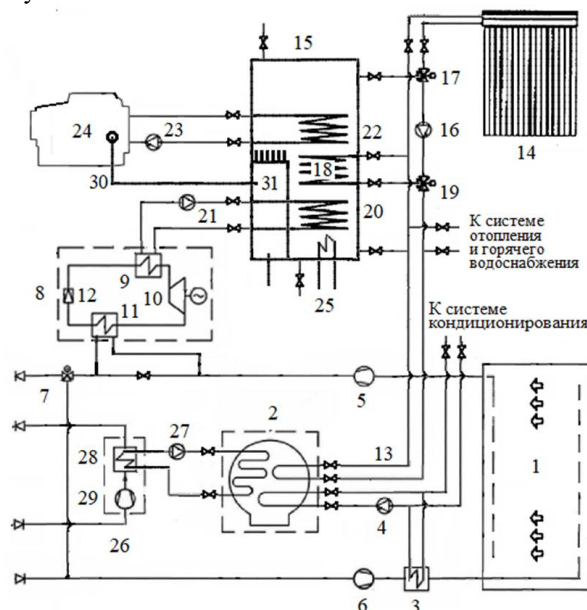


Рис. 1. Тепловентиляционная схема ЦОД: 1 - Центр обработки данных (ЦОД); 2 - Абсорбционная холодильная машина (АБХМ); 3, 28 - Теплообменник; 4, 16, 21, 23, 27 - Насос циркуляционный; 5 - Вытяжной вентилятор; 6 - Приточный вентилятор; 7 - Трехходовая вентиляционная заслонка; 8 - Тепловой насос воздух-вода (ТНВВ); 9 - Теплообменник-конденсатор; 10 - Фреоновый компрессор; 11 - Теплообменник-испаритель; 12 - Дросселирующее устройство; 13 - Рабочий контур АБХМ; 14 - Гелиоколлектор; 15 - Бак-аккумулятор; 17, 19 - Трёхходовой кран; 18, 20, 22 - Теплообменник бака-аккумулятора; 24 - Дизельгенераторная установка (ДГУ); 25 - Электрический нагревательный элемент; 26 - Градирня; 29 - Вентилятор; 30 - Выхлопная труба; 31 - Нагревательная камера

Fig. 1. Thermal ventilation scheme of the DPC: 1 - Data processing center (DPC); 2 - Absorption refrigerating machine (ABCM); 3, 28 - Heat exchanger; 4, 16, 21, 23, 27 - Circulation pump; 5 - Exhaust fan; 6 - Supply air fan; 7 - Three-way ventilation flap; 8 - Air-water heat pump (HVAC); 9 - Heat exchanger-condenser; 10 - Freon compressor; 11 - Heat exchanger-evaporator; 12 - Throttling device; 13 - ABHM working circuit; 14 - Solar collector; 15 - Battery tank; 17, 19 - Three-way valve; 18, 20, 22 - Heat exchanger of the accumulator tank; 24 - Diesel generator set (DGU); 25 - Electric heating element; 26 - Cooling Tower; 29 - The fan; 30 - Exhaust pipe; 31 - Heating chamber

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

Солнечная тепловая подсистема выполнена на основе вакуумных гелиоколлекторов (ВГК): модель «Дача Люкс» XFS-II) для генерации тепловой энергии. Это тепло может быть направлено на отопление объекта, горячее водоснабжение (ГВС) или использовано в качестве источника энергии для производства холода с помощью абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ), работающей на горячей воде.

Подсистема рекуперации и аккумуляции тепла содержит систему подготовки горячей воды, включающая: рекуперативный тепловой насос (ТН) «воздух-вода» (Hitachi RASM-2VRE), интегрированный в систему вытяжной вентиляции, который

утилизует низкопотенциальное тепло от IT-оборудования; бак-аккумулятор (стратификационного типа) объемом 600 л (Aqua Systems AQS-T1B-600), предназначенный для накопления тепла от ТН и ВСК, сглаживания суточной неравномерности солнечной генерации и обеспечения работы АБХМ в ночное время; электрический нагреватель (УМТ Сангай ТЭНБ-П-9, 9 кВт, с регулировкой), выполняющий роль резервного источника тепла для догрева теплоносителя до температуры, необходимой для запуска АБХМ (питание ТЭНа осуществляется в приоритетном порядке от избытков электроэнергии ФЭС).

Холодильная подсистема выполнена на основе АБХМ серии «Thermax», которая служит для преобразования избыточной низкопотенциальной тепловой энергии (65–95°C) от тепловой подсистемы в холод для систем кондиционирования серверных помещений.

На рисунке 2 показана функциональная схема электроснабжения нагрузки ЦОД. Фотоэлектрическая подсистема выполнена в виде фотоэлектрической станции (ФЭС), интегрированной в традиционную систему электроснабжения ЦОД от трансформаторной подстанции (ТП) и резервной дизельгенераторной установки (ДГУ). ДГУ используется при отсутствии электроснабжения от ТП, а также в качестве долговременного резерва для периодов экстремально низкой солнечной активности.

ФЭС содержит высокоэффективные монокристаллические кремниевые панели (модель DELTA NXT 500-66/2 M10 HC с КПД 21,3%). Данная подсистема предназначена для преобразования солнечной радиации в электрическую энергию, которая идёт на питание IT-оборудования, систем освещения, управления, инженерных и вспомогательных устройств.

Системы аккумулирования и резервирования электроэнергии содержат электрические аккумуляторные батареи (АБ) для сглаживания суточной неравномерности выработки и потребления электроэнергии. Гибридный инвертор (ГИ) предназначен для передачи электрической энергии из цепей постоянного в цепи переменного тока и обратно путём выполнения функций выпрямления и инвертирования тока, с возможностью отдачи излишков энергии в сеть.

Алгоритм мониторинга параметров и управления режимами электроснабжения ФЭС и сети показан на рисунке 3.

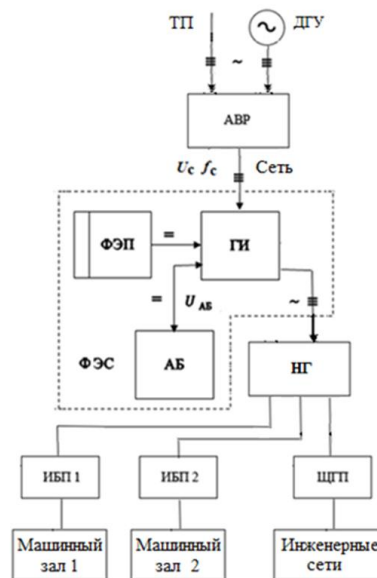


Рис. 2. Функциональная схема электроснабжения нагрузки ЦОД

ТП - Трансформаторная подстанция; ДГУ - Дизельгенераторная установка; АВР - Автоматическое включение резерва; ФЭС - Фотоэлектрическая станция; ФЭП - Фотоэлектрические панели; ГИ - Гибридный инвертор; АБ - Аккумуляторная батарея; НГ - Шины нагрузки; ИБП - Источник бесперебойного питания; ЩГП - Щит гарантированного питания

Fig. 2. Functional diagram of the power supply to the DPC

TP - Transformer substation; DGU - Diesel generator set; AVR - Automatic switching on of the reserve; FES - Photovoltaic station; FEP - Photovoltaic panels; GI - Hybrid inverter; AB - Rechargeable battery; NG - Load buses; UPS - Uninterruptible power supply; SHGP - Shield of guaranteed power supply

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

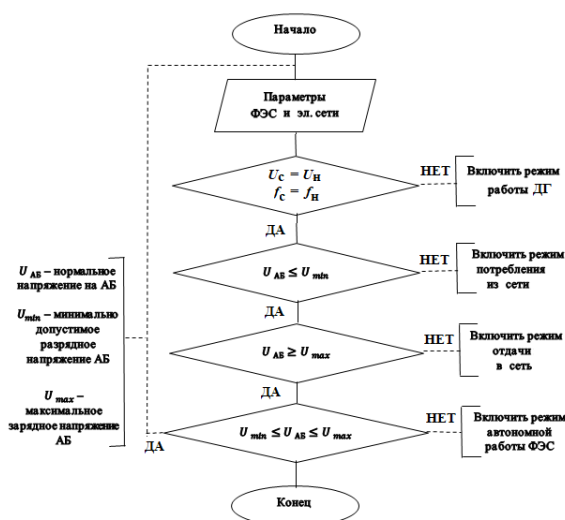


Рис. 3. Алгоритм мониторинга параметров и управления режимами электроснабжения  
 Fig. 3. An algorithm for monitoring parameters and controlling power supply modes

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

## 2. Математическая модель и метод оценки эффективности

Для анализа и проектирования системы разработан комплекс взаимосвязанных математических моделей, описывающих каждый компонент:

- модель фотоэлектрических панелей основана на модифицированной модели Хоттеля-Вилльера, учитывающей зависимость выходной мощности от интенсивности солнечной радиации и температуры фотоэлементов [5]:

$$P_{pv(t)} = P_{stc} \times \left(\frac{G(t)}{G_{stc}}\right) \times [1 + \gamma \times (T_{cell(t)} - T_{stc})] \times k_{degr} \quad (1)$$

где:  $P_{pv(t)}$  - выходная мощность в момент времени t, Вт;

$P_{stc}$  - номинальная мощность при стандартных условиях, Вт;

$G(t)$  - интенсивность солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;

$G_{stc}$  - стандартная интенсивность радиации (1000 Вт/м<sup>2</sup>);

$\gamma$  - температурный коэффициент мощности, %/°C;

$T_{cell(t)}$  - температура фотоэлемента, °C;

$T_{stc}$  - стандартная температура (25°C);

- модель вакуумного гелиоколлектора использует уравнение эффективности коллектора, учитывающее оптический КПД и коэффициенты тепловых потерь [6, 7]:

$$Q_{th(t)} = A_c \times [\eta_0 \times G(t) - a_1 \times (T_{m(t)} - T_{amb(t)}) - a_2 \times (T_{m(t)} - T_{amb(t)})^2] \quad (2)$$

где:  $Q_{th(t)}$  - полезная тепловая мощность, Вт;

$A_c$  - апертурная площадь коллектора, м<sup>2</sup>;

$\eta_0$  - оптический КПД;

$a_1, a_2$  - коэффициенты тепловых потерь, Вт/(м<sup>2</sup>·°C) и Вт/(м<sup>2</sup>·°C<sup>2</sup>);

$T_{m(t)}$  - средняя температура теплоносителя, °C.

- модели накопителей энергии (электрических и тепловых) построены на уравнениях баланса энергии и учёта потерь.

Емкость аккумуляторной батареи описывается уравнением состояния заряда [7]:

$$SOC_{(t+1)} = SOC_{(t)} + [P_{ch(t)} \times \eta_{ch} - P_{dis(t)} / \eta_{dis}] \times \Delta t / C_{nom} \quad (3)$$

где:  $SOC_{(t)}$  - уровень заряда в момент t, кВт·ч;

$P_{ch(t)}, P_{dis(t)}$  - мощность заряда и разряда, кВт;

$\eta_{ch}, \eta_{dis}$  - КПД заряда и разряда (0,95);

$C_{nom}$  - номинальная емкость, кВт·ч

Тепловой аккумулятор моделируется уравнением [7]:

$$Q_{stor(t+1)} = Q_{stor(t)} + [Q_{in(t)} - Q_{out(t)} - Q_{loss(t)}] \times \Delta t \quad (4)$$

$$Q_{loss(t)} = U \times A \times (T_{stor(t)} - T_{amb(t)}) \quad (5)$$

- модель абсорбционной холодильной машины описывает холодопроизводительность как функцию подведённого тепла и коэффициента преобразования (COP), который зависит от температурных уровней [8]:

$$Q_{cool(t)} = Q_{heat(t)} \times COP_{ab} \quad (6)$$

$$COP_{ab} = 0,7 \times [1 - 0,005 \times (T_{heat(t)} - 85)] \times [1,015 \times (T_{cool(t)} - 7)]$$

где:  $Q_{cool(t)}$  - холодопроизводительность, кВт;

$Q_{heat(t)}$  - тепловая мощность на входе, кВт;

$COP_{ab}$  - коэффициент преобразования;

$T_{heat(t)}$  - температура теплоносителя на входе, °С;

$T_{cool(t)}$  - температура охлаждаемой среды, °С.

- модель рекуперативной установки на базе теплового насоса: Тепловой насос «воздух-вода», интегрированный в систему вентиляции, работает в непрерывном режиме, рекуперирова тепло вытяжного воздуха. Его полезная тепловая мощность на выходе (нагрев теплоносителя-воды) определяется по базовому уравнению [9]:

$$Q_{hp(t)} = Q_{vent(t)} + P_{el\ hp(t)} \quad (7)$$

где:  $Q_{hp(t)}$  - полезная тепловая мощность на выходе ТН (нагрев теплоносителя), кВт;

$Q_{vent(t)}$  - тепловая мощность, извлекаемая из вытяжного воздуха, кВт;

$P_{el\ hp(t)}$  - электрическая мощность, потребляемая компрессором ТН, кВт;

Электропитание компрессора ТН осуществляется от гибридного источника фотоэлектрической станции и системы аккумулирования электрической энергии (САЭЭ). Логика управления питанием описывается выражением [10]:

$$P_{el\ hp(t)} = \min(P_{hp\ nom}, P_{PV\ avail(t)} + P_{bat\ dis}^{hp}) \quad (8)$$

где:  $P_{hp\ nom}$  - номинальная электрическая мощность компрессора ТН, кВт;

$P_{PV\ avail(t)}$  - электрическая мощность, доступная от ФЭП для питания ТН в момент времени  $t$ , кВт;

$P_{bat\ dis}^{hp}$  - мощность разряда САЭЭ, выделенная для питания ТН, кВт.

- балансные уравнения системы связывают генерацию, потребление, аккумулирование и потери для электрического и теплового контуров.

Электрический баланс [11]:

$$\sum P_{pvi(t)} + P_{grid(t)} = P_{load(t)} + P_{ch(t)} + P_{aux(t)} \quad (9)$$

Тепловой баланс [12]:

$$\sum Q_{th\_j(t)} + Q_{aux(t)} = Q_{heat\_load(t)} + Q_{ab\_input(t)} + Q_{stor\_ch(t)} \quad (10)$$

Для интегральной оценки эффективности такой многопродуктовой системы предложен оригинальный Комплексный коэффициент эффективности тригенерационной системы (КЭТС). Его научная новизна заключается в способности количественно объединять в единый показатель разнородные составляющие:

$$КЭТС = \alpha \cdot \left( \frac{E_{собств}}{E_{потр}} \right) + \beta \cdot \left( \frac{Q_{полез}}{Q_{общ}} \right) + \gamma \cdot \left( \frac{C_{выраб}}{C_{потр}} \right) + \delta \cdot \left( 1 - \left| \frac{G_{изб}}{G_{общ}} \right| \right) \quad (11)$$

где:  $\frac{E_{собств}}{E_{потр}}$  - коэффициент автономности по электроэнергии;

$\frac{Q_{полез}}{Q_{общ}}$  - коэффициент полезного использования тепловой энергии;

$\frac{C_{выраб}}{C_{потр}}$  - коэффициент покрытия холодильной нагрузки;

$\frac{G_{изб}}{G_{общ}}$  - относительная величина избыточной генерации;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  - весовые коэффициенты, определяемые методом анализа иерархий.

### 3. Объект и условия моделирования

Моделирование выполнено для автономного объекта — сегмента центра обработки данных площадью 30 м<sup>2</sup>, расположенного в климатических условиях Крыма. Регион характеризуется высоким среднегодовым уровнем солнечной инсоляции (1400–1500 кВт·ч/м<sup>2</sup>) и выраженной сезонной динамикой температур [13]. Рассматривались два варианта объекта: базовый (без дополнительной термоизоляции и энергоэффективный (с применением современных теплоизоляционных материалов). Анализ проводился на основе почасовых и месячных данных о солнечной радиации, температуре воздуха и графиках энергопотребления объекта.

#### **Анализ эффективности и технико-экономическое обоснование**

##### 1. Анализ энергетического баланса и сезонного дисбаланса

Исследование раздельной работы компонентов (ФЭС и ВГК) выявило фундаментальную проблему, характерную для солнечной энергетики: сезонный дисбаланс между выработкой и потреблением [14].

Летний период (май–сентябрь): Выработка электроэнергии ФЭС и тепла ВГК максимальна. Однако потребность в тепле для отопления минимальна, что приводит к образованию значительного избытка тепловой энергии (до 35% от общей выработки), который в раздельной схеме без АБХМ теряется. При этом электрическая нагрузка из-за работы систем охлаждения остаётся высокой.

Зимний период (ноябрь–февраль): Потребность в тепле для отопления достигает пика (до 90% от общего энергопотребления), а выработка как электричества, так и тепла от ВИЭ минимальна из-за низкой инсоляции, что приводит к дефициту энергии.

## 2. Преимущества тригенерационной схемы

Внедрение контура АБХМ позволило преодолеть этот дисбаланс, трансформируя летний избыток тепла в полезный продукт — холод для кондиционирования [15]. Результаты моделирования показали качественный скачок в эффективности:

- утилизация тепла - полезное использование тепловой энергии увеличилось на 35,4%;

- сокращение потерь - потери тепловой энергии снизились на 66,1% (с 12,7 до 4,3 МВт·ч в год);

- генерация холода - обеспечена выработка 8,2 МВт·ч холода в год, что покрывает 85–90% летней нагрузки на кондиционирование и позволяет заместить энергоёмкие компрессионные чиллеры;

- рост использования ВИЭ - годовой коэффициент использования потенциала возобновляемых источников вырос с 58,3% до 78,9%;

- повышение автономности - энергетическая автономность объекта (доля потребности, покрываемая собственной генерацией) возросла с 68% до 89%. Количество полностью автономных суток в году увеличилось со 215 до 298.

## 3. Определение оптимальной конфигурации

Проведён сравнительный анализ семи вариантов компоновки системы при фиксированном общем количестве модулей (60 шт.) для сопоставимости капитальных затрат. Были рассмотрены автономные объекты как с термоизоляцией, так и без термоизоляций.

Наилучший годовой энергобаланс и максимальное значение КЭТС были достигнуты при конфигурации 40 фотоэлектрических панелей и 20 вакуумных гелиоколлекторов, дополненных одной АБХМ (см. рисунок 4, 5).

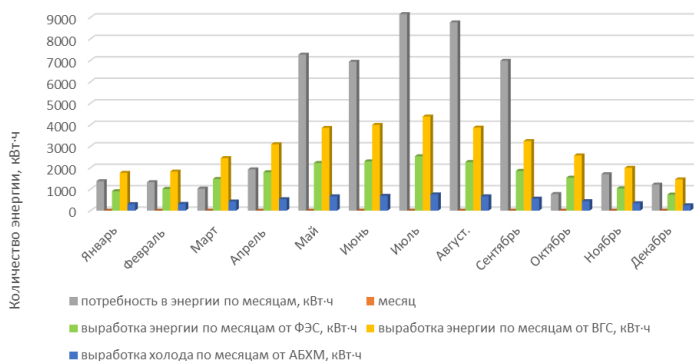


Рис. 4. График показателей электропотребления и выработки энергии от тригенерационного комплекса для объекта без термоизоляции

Fig. 4. Graph of indicators of electricity consumption and energy generation from a trigeneration complex for an object without thermal insulation

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

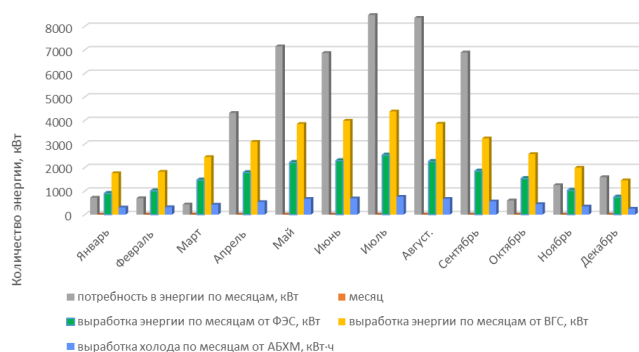


Рис. 5. График показателей электропотребления и выработки энергии от тригенерационного комплекса для объекта с термоизоляцией

Fig. 5. Graph of indicators of electricity consumption and energy generation from a trigeneration complex for an object with thermal insulation

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

Вариант с термоизоляцией автономного объекта обеспечивает:

- достаточную выработку электроэнергии для покрытия базовой и летней пиковой нагрузки;
- эффективное использование тепла зимой для отопления и ГВС, а летом — для привода АБХМ;
- сбалансированное использование солнечного ресурса в течение всего года.

#### 4. Техничко-экономическое обоснование аванпроекта тригенерации

На основе оптимальной конфигурации выполнен расчёт ключевых технико-экономических показателей [16]:

- прямые капитальные вложения

$$K_{\text{прямые}} = K_{\text{оборуд}} + K_{\text{монтаж}} + K_{\text{пусконал}} \quad (10)$$

- косвенные капитальные затраты

$$K_{\text{косвен}} = K_{\text{проект}} + K_{\text{обуч}} + K_{\text{резерв}} \quad (11)$$

- общие капитальные вложения

$$K_{\text{общ}} = K_{\text{прямые}} + K_{\text{косвен}} \quad (12)$$

- годовые эксплуатационные затраты:

$$C_{\text{экспл}} = C_{\text{амортиз}} + C_{\text{обслужив}} + C_{\text{ремонт}} + C_{\text{проч}} \quad (13)$$

- срок окупаемости:

$$PP = K_{\text{общ}} / (\Delta_{\text{год}} + A) \quad (14)$$

Результаты расчётов сведены в таблицу.

Таблица  
Table

Ключевые технико-экономические показатели тригенерационной системы энергоснабжения ЦОД

*Key technical and economic indicators of the trigeneration power supply system of the DPC*

Показатель	Значения, (руб.)
Прямые капитальные вложения	2 771 080
Косвенные капитальные затраты	450 000
Общие капитальные вложения	3 221 080
Годовые эксплуатационные затраты	198 441
Годовая экономия на энергоносителях:	
- электроэнергия	337 288
- тепловая энергия	259 392
- холод	21 864
Срок окупаемости	4,27 года

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

- Капитальные затраты (CAPEX) составили 3,22 млн руб., включая стоимость оборудования, монтаж, пусконаладку, проектирование и резервный фонд.

- Эксплуатационные расходы (OPEX) оцениваются в ~198 тыс. руб. в год (обслуживание, ремонт, амортизация).

- Годовой экономический эффект сформирован за счёт замещения покупки электроэнергии, выработка тепла и холода и составляет ~618,5 тыс. руб. в год.

- Показатели эффективности: срок окупаемости (PP) - 4,27 года; внутренняя норма доходности (IRR) ~18,5%, что существенно превышает средневзвешенную стоимость капитала и свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности; стоимость комплексной энергии: ~5,2 руб./кВт·ч, что на 15–25% ниже действующих сетевых тарифов для автономных потребителей в регионе.

Анализ чувствительности инвестиционного проекта показал, что проект наиболее уязвим к снижению тарифов на энергоносители и росту первоначальных капитальных затрат. Однако даже при негативных сценариях (например, снижение тарифов на 10%) проект сохраняет положительную чистую приведённую стоимость (NPV>0). Государственные меры поддержки (субсидии, льготные кредиты, «зелёные» тарифы) способны сократить срок окупаемости на 15–20% и значительно повысить экономическую привлекательность.

Внедрение тригенерации даёт комплекс преимуществ:

- повышение общей энергоэффективности;

- снижение эксплуатационных затрат (замена дорогой сетевой электроэнергией на более дешёвую);
- повышение надёжности и автономности (обеспечение независимого источника электроэнергии и холода, что критически важно для ВК);
- снижение нагрузки на электрические сети (разгрузка распределительных сетей, особенно в условиях высокой концентрации ВК);

Экологические преимущества (снижение выбросов CO<sub>2</sub> за счёт высокой эффективности и возможности использования возобновляемого топлива (биогаз)) [17].

Несмотря на преимущества, существуют барьеры для внедрения [18]:

- высокие капитальные затраты (стоимость тригенерационной установки значительно выше, чем традиционных систем);
- зависимость от экономики (рентабельность сильно зависит от соотношения цен на природный газ и электроэнергию);
- требования к тепловой нагрузке (эффективность системы требует постоянной и достаточно высокой тепловой нагрузки для работы АБХМ, что оптимально для крупных и средних ВК);
- сложность управления (необходимость внедрения систем автоматизированного управления для оптимизации режимов работы в условиях меняющейся нагрузки).

#### *Заключение (Conclusions)*

Концепция развития электроэнергетики России, рассмотренная через призму теории энергетических укладов, демонстрирует, что отечественный топливно-энергетический комплекс находится в состоянии сложного межукладного перехода. С одной стороны, сохраняется доминирование устоявшегося углеводородного уклада, основанного на централизованной генерации на ископаемом топливе и масштабных сетевых инфраструктурах. С другой стороны, формируются контуры нового экологического уклада, характеризующегося декарбонизацией, цифровизацией, распределённой генерацией, активной ролью потребителя и интеграцией новых видов нагрузки [19]. Системы тригенерации представляют собой технологически зрелое и экономически обоснованное решение для повышения энергоэффективности и устойчивости современных вычислительных комплексов. Ключевым фактором успеха является тщательное предпроектное моделирование нагрузок и разработка оптимальной схемы интеграции с учётом климатических условий и локальных цен на энергоносители [20, 21].

Проведённое исследование показывает, что применение солнечных тригенерационных систем энергоснабжения для автономных объектов, таких как вычислительные комплексы является технически осуществимым, энергетически эффективным и экономически целесообразным решением, особенно для регионов с высоким уровнем солнечной инсоляции, таких как Крым, Краснодарский край и другие южные территории России.

Интеграция ФЭП, ВГК и АБХМ в единую систему управления позволяет преодолеть ключевой недостаток солнечной энергетики — сезонный дисбаланс — и достичь высокой степени энергетической автономности объекта. Тригенерационная схема обеспечивает рост общего КПД использования солнечного ресурса за счёт утилизации избыточного тепла для производства холода [22], сокращая потери на 66,1%. При сроке окупаемости около 4,3 года и внутренней норме доходности (IRR) ~18,5% аванпроект демонстрирует высокую инвестиционную привлекательность.

Разработанная методика, включающая авторскую комплексную модель тригенерации и Комплексный коэффициент эффективности тригенерационной системы, позволяет проводить оценку целесообразности внедрения подобных систем в других климатических зонах, обосновывая дифференцированный подход в зависимости от местного солнечного потенциала и тарифной политики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием интеллектуальных систем управления на основе искусственного интеллекта для прогнозирования нагрузок и оптимизации режимов в реальном времени, интеграцией дополнительных ВИЭ в тригенерационные схемы, а также углублённым анализом жизненного цикла системы и экологического эффекта от её массового внедрения.

Применение подобных автономных и гибридных тригенерационных систем способствует повышению надёжности и устойчивости критически важной ИТ-инфраструктуры, снижению нагрузки на региональные энергосети и выполнению стратегических задач по переходу к низкоуглеродной и ресурсоэффективной энергетике.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку

интеллектуальных систем управления гибридными энергокомплексами, включающими тригенерацию, возобновляемые источники и системы аккумулирования энергии, для создания полностью автономных «зеленых» дата-центров.

### Литература

1. Тыбинь А. Будущее дата-центров: рост энергопотребления и вызовы для отрасли // Коммерсантъ: электрон. газ. — 2024. — 15 июля.
2. Smith J. R. Sustainable Cooling Solutions for Data Centres / J. R. Smith, L. M. Brown // Energy Efficiency Journal. — 2021. — Vol. 14, No. 5. — P. 412–425.
3. Какушина Е. Г. Комплексный анализ региональных энергосистем с применением систем тригенерации и возобновляемых источников энергии / Е. Г. Какушина, Н. М. Шайтор, Б. А. Якимович // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. — Нижний Новгород, 2025. — С. 271–282.
4. Литовка М. А. Тригенерация. Принцип работы и условия применения / М. А. Литовка // Технические и математические науки. Студенческий научный форум: сборник статей по материалам XLVI студенческой международной научно-практической конференции. — Москва, 2022. — С. 30–32.
5. Ильичев В.Ю., Кусачева С.А., Лыков И.Н. Исследование характеристик фотоэлектрических солнечных панелей // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 34–39. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-34-39.
6. Бекиров Э. А., Велияев С. М. Определение эффективности работы солнечного коллектора // Агротехника и энергообеспечение. — 2021. — № 4 (33). — С. 8–15.
7. Галузин Т. А., Джамалов Н. К. Обзор методов определения ёмкости и уровня заряда аккумуляторов // Проблемы науки. — 2020. — № 4 (52). — С. 21–24.
8. Кадочникова А. С., Чигирев А. В. Расчёт абсорбционной холодильной машины // XIV Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных «Россия молодая». Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва, 2022. С. 021208.1–021208.3
9. Мереуца Е. В., Сухих А. А. Анализ энергетической эффективности включения теплонасосной установки и солнечных коллекторов в состав абсорбционных холодильных машин в системах централизованного кондиционирования // Вестник Международной академии холода. — 2017. — №2. — С. 43–49.
10. Вишневский Е. П. Рекуперация тепловой энергии в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // С. О. К. — 2004. — №11. — С. 90–101.
11. Соснина Е. Н., Шалухо А. В., Липужин И. А., Кечкин А. Ю., Ворошилов А. А. Повышение эффективности децентрализованных систем электроснабжения // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2018. №3 (122). С. 81–91.
12. Юсупов Р.Д., Зиганшин Ш.Г., Политова Т.О., Базукова Э.Р. «Применение солнечной энергии для нужд горячего водоснабжения в городе Казань» // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2 (54). С. 48–58.
13. Якимович Б. А. Перспективы развития распределённой энергетики в условиях полуострова Крым / Б. А. Якимович, Е. Г. Малюк, Е. Г. Какушина // Энергетические установки и технологии. — 2023. — Т. 9, № 1. — С. 91–98.
14. Какушина Е. Г. Системы тригенерации юных регионов России с использованием возобновляемых источников энергии / Е. Г. Какушина, Б. А. Якимович, Н. М. Шайтор // Электроника, фотоника и киберфизические системы. — 2025. — Т. 5, № S3. — С. 66–82.
15. Какушина Е. Г. Инновационные методы генерирования и преобразования энергии / Е. Г. Какушина // Энергетические установки и технологии. — 2023. — Т. 9, № 3. — С. 54–57.
16. Нуралиев С. У., Маилян Д. А. Экономика и финансы энергетики: учебник для вузов / С. У. Нуралиев, Д. А. Маилян. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 424 с.
17. Ефремова С. А. Внедрение тригенерационных установок как способ повышения эффективности энергосистем / С. А. Ефремова, А. Н. Зацепина // Молодой учёный. — 2021. — № 20 (362). — С. 80–83.
18. Маларев В. И. Система тригенерации как средство повышения эффективности бинарных комплексов для производства электрической и тепловой энергии / В. И. Маларев, И. А. Богданов, А. В. Турышева // Промышленная энергетика. — 2020. — № 3. — С. 21–27.

19. Волков Э. П. Перспективы развития и модернизация электроэнергетики России / Э. П. Волков, А. Н. Шишкин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 4. – С. 3–17
20. Панцырная Т. В., Парабин В. А., Дьяков А. В. «Тригенерация как способ повышения энергетической эффективности» // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2013. №6. С. 82–87.
21. Томаров Г. В. Использование критериально-параметрического подхода при выборе оборудования когенерационных установок в инвестиционных энергетических проектах / Г. В. Томаров, А. А. Шипков, В. А. Буданов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 2 (58). – С. 13–16.
22. Пехова Е. А. Концепция развития электроэнергетики России на основе теории энергетических укладов / Е. А. Пехова, Е. В. Сухарева // Вопросы экономики и права. – 2024. – № 3 (189). – С. 72–76.

#### Авторы публикации

**Какушина Елена Геннадьевна** – старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-9243-6490>. *Email*: [litte@mail.ru](mailto:litte@mail.ru).

**Якимович Борис Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-7363-1071>. *Email*: [bayakimovich@sevsu.ru](mailto:bayakimovich@sevsu.ru).

**Шайтор Николай Михайлович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия. *ORCID\**: <http://orcid.org/0009-0004-1968-7807>. *Email*: [n.m.shaitor@sevsu.ru](mailto:n.m.shaitor@sevsu.ru).

#### References

1. Tybin A. The future of data centers: growth of energy consumption and challenges for the industry // Kommersant: electron. gaz. — 2024. — July 15th.
2. Smith J.R. Sustainable Cooling Solutions for Data Centres / J.R. Smith, L. M. Brown // Energy Efficiency Journal. — 2021. — Vol. 14, No. 5. — P. 412-425.
3. Kakushina E. G. Comprehensive analysis of regional energy systems using trigeneration systems and renewable energy sources / E. G. Kakushina, N. M. Shaitor, B. A. Yakimovich // Actual problems of the electric power industry: a collection of scientific and technical articles. Nizhny Novgorod, 2025. pp. 271-282.
4. Litovka M. A. Trigeneration. The principle of operation and conditions of use / M. A. Litovka // Technical and mathematical sciences. Student Scientific Forum: a collection of articles based on the materials of the XLVI Student International Scientific and practical conference. — Moscow, 2022. pp. 30-32.
5. Ilyichev V.Yu., Kusacheva S.A., Lykov I.N. Investigation of the characteristics of photovoltaic solar panels // Ecology of urbanized territories. 2022. No. 2. pp. 34-39. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-34-39.
6. Bekirov E. A., Velilyaev S. M. Determination of the efficiency of a solar collector // Agrotechnics and energy supply. — 2021. — No. 4 (33). — pp. 8-15.
7. Galuzin T. A., Jamalov N. K. Overview of methods for determining battery capacity and charge level // Problems of science. — 2020. — No. 4 (52). pp. 21-24.
8. Kadochnikova A. S., Chigirev A.V. Calculation of an absorption refrigerating machine // XIV All-Russian Scientific and practical Conference of young scientists "Young Russia". Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, 2022. pp. 021208.1–021208.3
9. Mereutsa E. V., Sukhov A. A. Analysis of the energy efficiency of including a heat pump unit and solar collectors in absorption refrigerating machines in centralized air conditioning systems // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. - 2017. — No. 2. — pp. 43-49.
10. Vishnevsky E. P. Heat energy recovery in ventilation and air conditioning systems // S. O. K. — 2004. — No. 11. — pp. 90-101.
11. Sosnina E. N., Shalukho A.V., Lipuzhin I. A., Kechkin A. Yu., Voroshilov A. A. Improving the efficiency of decentralized power supply systems // Proceedings of the NSTU named after R. E. Alekseev. 2018. No. 3 (122). pp. 81-91.

12. Yusupov R.D., Ziganshin Sh.G., Politova T.O., Bazukova E.R. "Application of solar energy for the needs of hot water supply in the city of Kazan" // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2022. Vol. 14. No. 2 (54). pp. 48-58.

13. Yakimovich B. A. Prospects for the development of distributed energy in the conditions of the Crimean Peninsula / B. A. Yakimovich, E. G. Malyuk, E. G. Kakushina // Energy installations and technologies. — 2023. — Vol. 9, No. 1. — pp. 91-98.

14. Kakushina E. G. Trigeneration systems of young regions of Russia using renewable energy sources / E. G. Kakushina, B. A. Yakimovich, N. M. Shaitor // Electronics, photonics, and cyberphysical systems. — 2025. — Vol. 5, No. S3. — pp. 66-82.

15. Kakushina E. G. Innovative methods of energy generation and conversion / E. G. Kakushina // Energy installations and technologies. — 2023. — Vol. 9, No. 3. — pp. 54-57.

16. Nuraliev S. U., Mailyan D. A. Economics and Finance of energy: a textbook for universities / S. U. Nuraliev, D. A. Mailyan. Moscow: MEI Publishing House, 2015. 424 p.

17. Efremova S. A. Introduction of trigeneration plants as a way to increase the efficiency of power systems / S. A. Efremova, A. N. Zatsepina // Young Scientist. — 2021. — № 20 (362). — Pp. 80-83.

18. Malarev V. I. Trigeneration system as a means of increasing the efficiency of binary complexes for the production of electric and thermal energy / V. I. Malarev, I. A. Bogdanov, A.V. Turysheva // Industrial Power engineering. 2020. No. 3. pp. 21-27.

19. Volkov E. P. Prospects for the development and modernization of the Russian electric power industry / E. P. Volkov, A. N. Shishkin // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. - 2012. - No. 4. - pp. 3-17

20. Pantsyrnaya T. V., Parabin V. A., Dyakov A.V. "Trigeneration as a way to increase energy efficiency" // Strategic decisions and risk management. 2013. No. 6. pp. 82-87.

21. Tomarov G. V. The use of a criterion-parametric approach when choosing equipment for cogeneration plants in investment energy projects / G. V. Tomarov, A. A. Shipkov, V. A. Budanov // Energy saving and water treatment. – 2009. – № 2 (58). – Pp. 13-16.

22. Pekhova E. A. Concept of development of the Russian electric power industry based on the theory of energy patterns / E. A. Pekhova, E. V. Sukhareva // Issues of economics and law. – 2024. – № 3 (189). – Pp. 72-76.

#### **Authors of the publication**

**Elena G. Kakushina** - Sevastopol state university, Sevastopol, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-9243-6490>. *Email*: [litte@mail.ru](mailto:litte@mail.ru).

**Boris A. Yakimovich** - Sevastopol state university, Sevastopol, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-7363-1071>. *Email*: [bayakimovich@sevsu.ru](mailto:bayakimovich@sevsu.ru).

**Nikolay M. Shaito** - Sevastopol state university, Sevastopol, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0009-0004-1968-7807>. *Email*: [n.m.shaitor@sevsu.ru](mailto:n.m.shaitor@sevsu.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **29.01.2026 г.**

**Отредактировано** **14.04.2026 г.**

**Принято** **26.05.2026 г.**