

## СИНХРОНИЗАЦИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Р.Ю. Зимин<sup>1</sup>, Ю.А. Сычев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: zimin\_ryu@pers.spmi.ru

**Аннотация:** В условиях освоения арктического шельфа ключевой проблемой является удаленность месторождений полезных ископаемых от существующих и действующих энергосистем. Это обуславливает потребность в полностью автономных энергетических системах с источниками электрической энергии, независимыми от регулярных и дорогостоящих поставок топлива. Для эффективной работы в суровых климатических условиях необходимо применение современных силовых электронных преобразователей. Высокоэффективные DC-DC преобразователи позволяют максимизировать получение электрической энергии с фотоэлектрических станций, а инверторы напряжения, основанные на DC-AC преобразователях, обеспечивают требуемые параметры выходного тока. Для создания систем электроснабжения и обеспечения бесперебойного электроснабжения необходима интеграция и параллельная работа нескольких источников питания, таких как дизель-генераторы и источники на основе возобновляемой энергии. Такие установки и работа требует обеспечение полной и мгновенной синхронизации по частоте, напряжению и фазе. В данном исследовании анализ работы фотоэлектрических станций базировался на статистических данных по генерации, а для моделирования и оптимизации схем подключения преобразователей применялись классические методы расчета электрических цепей: метод контурных токов и узловых потенциалов, что позволило проанализировать режимы работы преобразователей и повысить эффективность работы всей энергосистемы.

**Ключевые слова:** арктический шельф, возобновляемые источники энергии, DC-DC преобразователи, AC-DC преобразователи, моделирование схем, генератор управляющих импульсов, микроконтроллеры, синхронизация систем электроснабжения, моделирование, генерация электроэнергии.

**Для цитирования:** Зимин Р. Ю., Сычев Ю. А. Синхронизация автономных систем электроснабжения при добыче твердых полезных ископаемых Арктического шельфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 110–123. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_5\_0\_110.

### Synchronization of self-contained power supply systems in solid mineral mining in the Arctic Shelf

R.Y. Zimin<sup>1</sup>, Y.A. Sychev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II,  
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: zimin\_ryu@pers.spmi.ru

---

**Abstract:** In the conditions of the Arctic Shelf development, the key problem is the remoteness of mineral deposits from the existing and operating power supply systems. This dictates the use of the totally self-contained power supply systems with the energy sources independent of regular and expensive fuel supply. Effective operation under conditions of harsh climate necessitates employment of up-to-date power electronic converters. High-performance DC-to-DC converters allow maximum electric energy supply from photovoltaic power plants while DC-to-AC converter-based voltage inverters ensure the required parameters of output current. Creation of power supply systems and power supply without failures needs integration and parallel operation of a number of power sources such as diesel electric-power generators and renewable power plants. Such plants and their parallel operation require overall and instantaneous synchronization of frequency, voltage and phase. The present analysis of operation of photovoltaic power plants used statistical data on power generation, and modeling and optimization of connection diagrams of converters involved classical methods of network calculations: loop method and nodal method, which made it possible to anatomize operation of the converters and to enhance efficiency of the whole power network.

**Key words:** Arctic Shelf, renewable energy sources, DC-to-DC converters, AC-to-DC converters, modeling of diagrams, control timer, microcontrollers, synchronization of power supply systems, modeling, power generation.

**For citation:** Zimin R. Y., Sychev Y. A. Synchronization of self-contained power supply systems in solid mineral mining in the Arctic Shelf. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(5):110-123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_5\_0\_110.

---

## Введение

Среди арктических залежей твердых полезных ископаемых (ТПИ) имеют широкое распространение золото, фосфориты, серебро, кобальт, марганец. Однако помимо основных ТПИ существуют уникальные залежи кобальтомарганцевых корок (КМК), глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) и железомарганцевых конкреций (ЖМК). Каждая из них обладает уникальной структурой и геологическими характеристиками, а также минеральным составом, не имеющим аналогов на месторождениях суши. Причем месторождения ЖМК обладают запасом стратегических компонентов, таких как кобальт и никель, что делает их добычу первостепенной.

Железомарганцевые конкреции распространены вдоль всей шельфовой зоны, принадлежащей России Арктики.

Но наиболее привлекательны, с точки зрения экономической составляющей, районы западного арктического моря, а именно Карское, Баренцево и Белое моря. Глубина залегания составляет от 6 до 78 м, а общая сумма запасов шельфовых месторождений оценивают ориентировочно в 95 млн т. В свою очередь залежи ЖМК всего Арктического региона России составляют порядка 125 млн т [1].

Технологий для разработки месторождений ЖМК существует много. В общем виде они представляют из себя технологическое судно, осуществляющее функцию диспетчерского пункта, снабжения; подъемное устройство, осуществляющее функцию подъема ТПИ с морского дна на поверхность; добычное устройство, осуществляющее функцию отделения полезного ископаемого от дна и передачу подъемному устройству; уст-

ройства сброса воды, осуществляющее функцию возврата поднимаемой морской воды обратно на глубину. Каждый элемент комплекса выполнен в виде отдельной машины или аппарата, однако все они потребляют электроэнергию. В этой связи возникает необходимость в обеспечении удаленных, территориально рассредоточенных и труднодоступных регионов постоянным источником бесперебойной энергии [2].

### Методы

Для обеспечения надежного функционирования территориально рассредоточенных потребителей Арктического региона применяют электрические станции на основе возобновляемых источников энергии (рис. 1).

На рисунке: САУ — система автоматического управления, СЭС — система электроснабжения, DC — постоянный ток, AC — переменный ток.

Данные электрические станции содержат силовые преобразователи мощности: DC-DC преобразователи, необходимые для осуществления процессов преобразования переменного выходного напряжения постоянного тока в требуемое напряжение заданного уровня, постоянного тока с целью обеспечения зарядки аккумуляторных батарей и его дальнейшего использования [3–5].

DC-DC преобразователи проектируются с учетом изменяемых и переключаемых режимов работы силового оборудования, а также необходимости регулирования напряжения постоянного тока в требуемое напряжение путем увеличения или уменьшения значения выходного напряжения, поэтому DC-DC преобразователь имеет в своей структуре устройство переключения мощности для подключения дополнительных источников питания в звене постоянного тока за счет аккумуляторных батарей, применяемых в автономных системах электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии [6, 7].

Выбор DC-DC преобразователей учитывает ряд различных критериев, таких как высокую надежность устройства и низкие потери на нагрев при переключении [8–10]. DC-DC преобразователь является одной из главных частей структур автономных источников электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии, чья генерация является непостоянной [11, 12].

Для поддержания требуемого постоянного напряжения из-за нестабильной генерации электроэнергии применяются DC-DC преобразователи. Низкое выходное напряжение постоянного тока, которое генерируется автономными источниками электроснабжения на основе

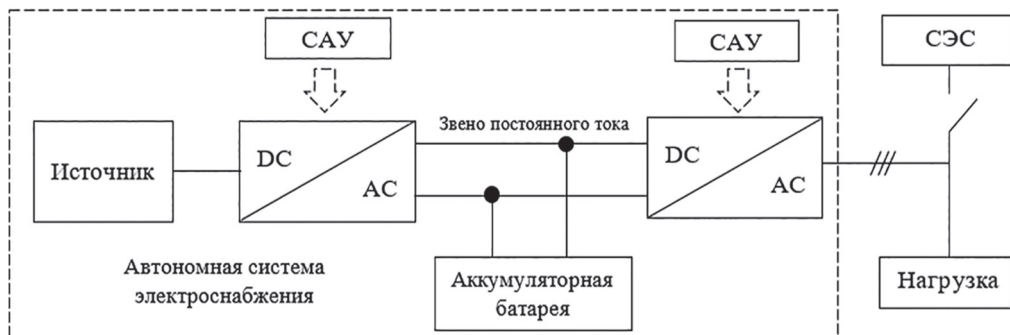


Рис. 1. Схема автономной системы электроснабжения

Fig. 1. Diagram of an autonomous power supply system

возобновляемых источников энергии, зависит от различных влияний: в солнечных электростанциях — это солнечная инсоляция, внезапные затенения, температура окружающей среды, степень чистоты поверхности фотоэлектрического модуля, в ветрогенераторах — это скорость ветра, осадки, температура окружающей среды и ряд других условий [13–15]. Данные погодные условия в значительной мере оказывают влияние на генерацию электрической энергии и непосредственно влияют на уровень выходного напряжения.

### Синхронизация автономных систем электроснабжения

Одной из рассматриваемых задач является параллельная работа систем электроснабжения и способы синхронизации их между собой в условиях переменной нагрузки одной из автономных систем. Из-за условий подключения резкопеременной нагрузки (сварка),

пуска электродвигателей, что приводит к временному увеличению потребляемого тока, а также подключения дополнительной нагрузки, превышающей расчетную установленную мощность одной автономной системы электроснабжения, могут возникать просадки или провалы напряжения и изменяться частота [16, 17]. Для обеспечения требуемого качества электрической энергии и обеспечения функционирования оборудования необходимо предусматривать возможность параллельного подключения дополнительной автономной системы электроснабжения [18]. При проектировании автономных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников электрической энергии необходимо учитывать и разрабатывать такие системы управления (САУ), чтобы обеспечивать высокое быстродействие и надежность функционирования при параллельной работе двух независимых систем электроснабжения [19].

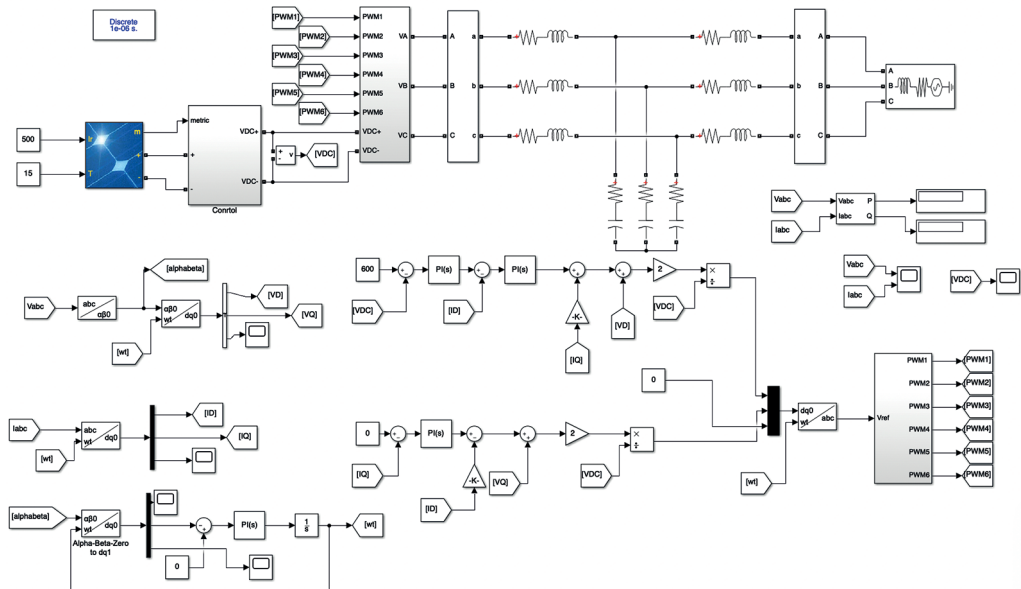


Рис. 2. Имитационная модель автономной системы электроснабжения на основе фотоэлектрической станции с параллельно работающей системой электроснабжения

Fig. 2. Simulation model of an autonomous power supply system based on a photovoltaic plant with a parallel-running power supply system

### Моделирование САУ и анализ результатов моделирования системы электроснабжения

Разработка САУ DC-DC преобразователя в проектируемой автономной системе электроснабжения основана на измерении генерируемого изменяющегося постоянного тока, вычислении параметров для переключения транзисторов с помощью генерации импульсов на основе ШИМ (PWM) (рис. 2) [20–22].

Для поддержания требуемого уровня постоянного напряжения при генерации электроэнергии в автономной системе электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии используют DC-DC преобразователь. Модель преобразователя с разработанной САУ представлена на рис. 3. Для обеспечения постоянного напряжения и устранения пульсаций выход преобразователя шунтируется конденсатором [23].

Результат имитационного моделирования показал, что разработанный алгоритм САУ обеспечивает стабильное постоянное напряжение на выходе DC-DC преобразователя при шунтирова-

нии конденсатором. График выходного напряжения в звене постоянного тока представлен на рис. 4.

Разработка САУ преобразователя DC-AC предполагает включение в нее четырех ПИ-регуляторов для обеспечения требуемого стабильного переменного напряжения на выходе преобразователя для обеспечения подключения нагрузки, а также при условии необходимости синхронизации автономной системы электроснабжения при параллельной работе с другой системой электроснабжения [24, 25].

Разработанная система управления представлена на рис 5.

При разработке системы регулирования в качестве показателя оптимальности принимался минимум интеграла от квадрата ошибки системы при действии на объект наиболее тяжелого ступенчатого возмущения по регулирующему каналу для обеспечения синхронизации с параллельно работающей системой электроснабжения с учетом добавочного ограничения на запас устойчивости системы, т.е. [26]:

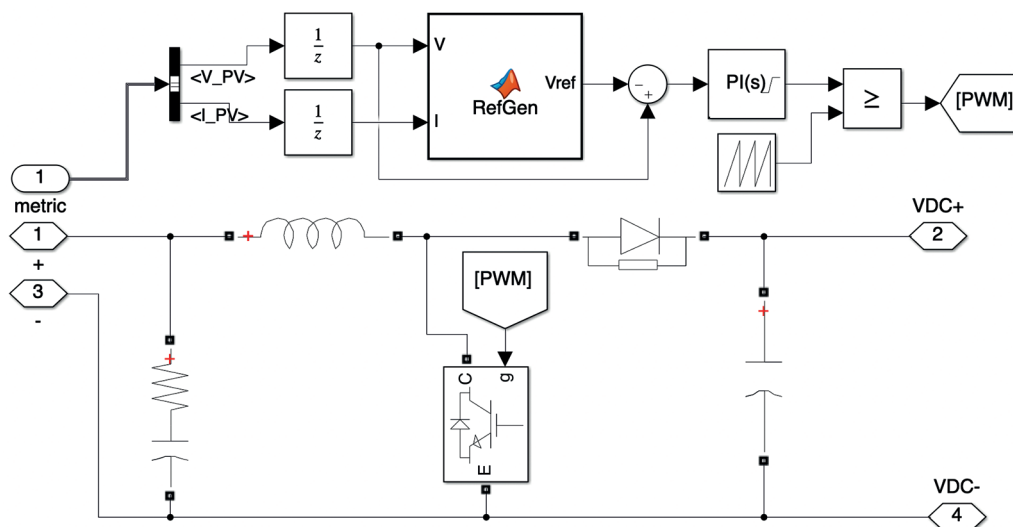


Рис. 3. Подсистема модели DC-DC преобразователя в программе Matlab среды Simulink  
Fig. 3. Subsystem of the DC-DC converter model in the Matlab program of the Simulink environment

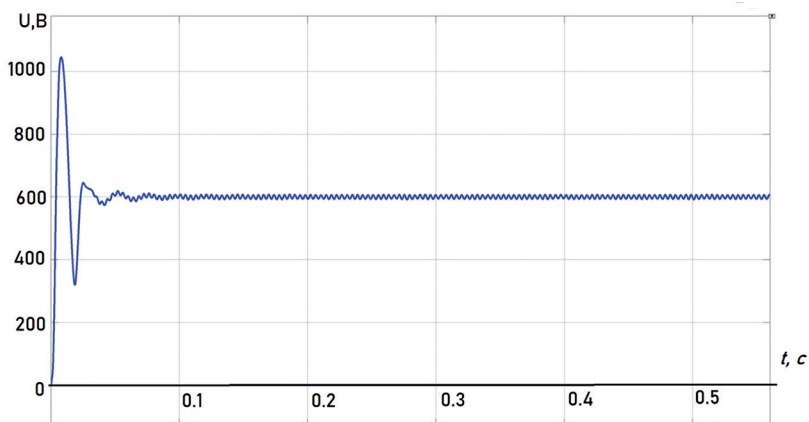


Рис. 4. Напряжение на выходе DC-DC преобразователя

Fig. 4. Output voltage of the DC-DC converter

$$I = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \rightarrow \min. \quad (1)$$

При расчете параметров ПИ-регулятора амплитудно-фазовые характеристики имеют следующий вид (см. рис. 6 и 7).

Для первого канала управления:

$$W_{11}(p) = \frac{k_0 5^{-p\tau_a}}{(1 + pT_{a1})(1 + pT_{a2})} = \frac{0,541 \cdot e^{-2,144p}}{(1,235p + 1)(0,32p + 1)}$$

$$W_p(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right)$$

Используя результат, получим передаточную характеристику первого ПИ-регулятора:

$$W_{p1}(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right) = 0,951 \left( 1 + \frac{1}{1,478p} \right)$$

Для второго канала управления:

$$W_{22}(p) = \frac{k_0 5^{-p\tau_a}}{(1 + pT_{a1})(1 + pT_{a2})} = \frac{0,32 \cdot e^{-4,1885p}}{(2,35p + 1)(0,423p + 1)}$$

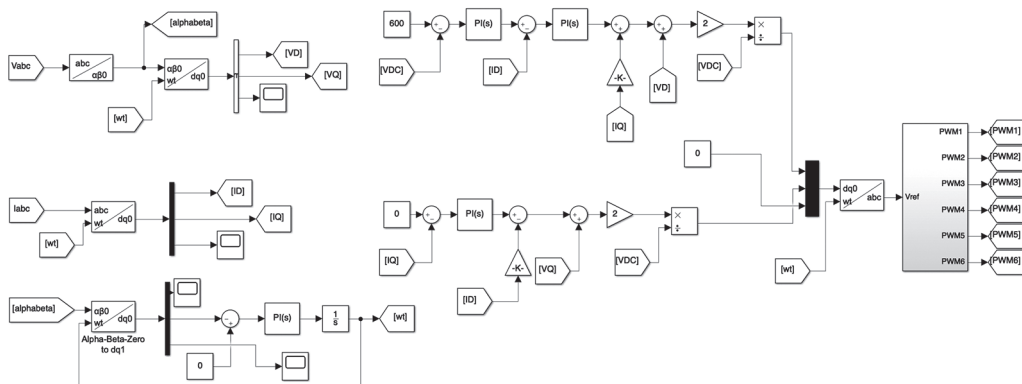


Рис. 5. Модель САУ DC-AC преобразователя

Fig. 5. Model of the DC-AC converter control system

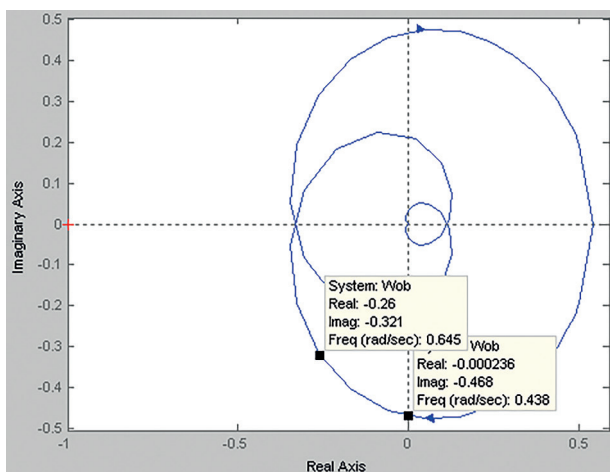


Рис. 6. Амплитудно-фазовая характеристика W11

Fig. 6. Amplitude-phase characteristic of W11

$$W_p(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right)$$

Используя результат, получим переходную характеристику второго ПИ-регулятора:

$$\begin{aligned} W_{p2}(p) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right) = \\ &= 1,598 \left( 1 + \frac{1}{2,772 p} \right) \end{aligned}$$

Коэффициент взаимосвязи определится по следующей формуле:

$$K_{CB} = \frac{K_{12} K_{21}}{K_{11} K_{22}} = \frac{0,433 \cdot 0,160}{0,541 \cdot 0,32} = 0,4 \quad (2)$$

Так как коэффициент взаимосвязи  $K_{CB} > 0,2$ , то принимаем связанное регулирование [27, 28].

Для достижения высокого качества процесса регулирования в двухсвязной системе управления необходимо обеспе-

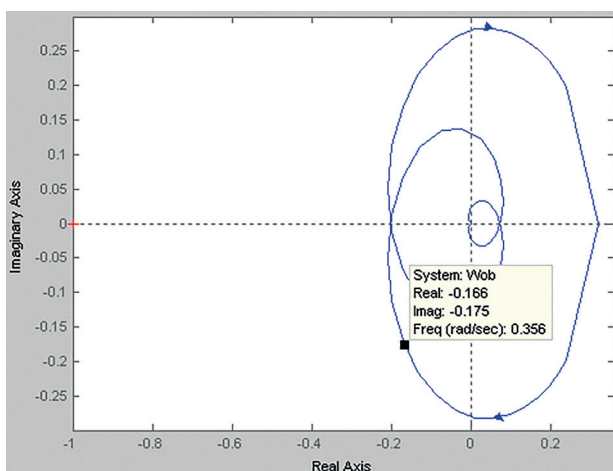


Рис. 7. Амплитудно-фазовая характеристика W22

Fig. 7. Amplitude-phase characteristic of W22

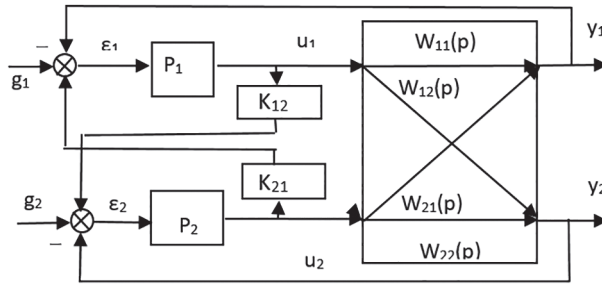


Рис. 8. Структурная схема САУ связанного регулирования  
 Fig. 8. Structural diagram of the control system of the connected regulation

чить наложение дополнительных связей между регуляторами. Данные регуляторы обеспечивают компенсацию перекрестных связей в объекте управления системой синхронизации [29].

Включение в схему управления специальных компенсаторов  $K_{12}(p)$ ,  $K_{21}(p)$  обеспечивает автономность отдельных контуров управления двухсвязной системы. Данные связи устанавливаются между собой непосредственно с выхода одного регулятора на вход другого [30, 31].

Структурная схема двухсвязной системы с компенсирующими связями представлена на рис. 8.

Условие автономности достигается при независимости второго контура управления  $W_{22}(p)$  от первого:

$$W_{12}(p) - K_{12}(p) \cdot W_{p2}(p) \cdot W_{22}(p) = 0 \quad (3)$$

Для обеспечения автономности первого контура  $W_{11}(p)$  от второго

$$W_{21}(p) - K_{21}(p) \cdot W_{p1}(p) \cdot W_{11}(p) = 0 \quad (4)$$

Таким образом, передаточные функции компенсаторов примут следующий вид:

$$K_{12}(p) = \frac{W_{12}(p)}{W_{p2}(p)W_{22}(p)} \quad (5)$$

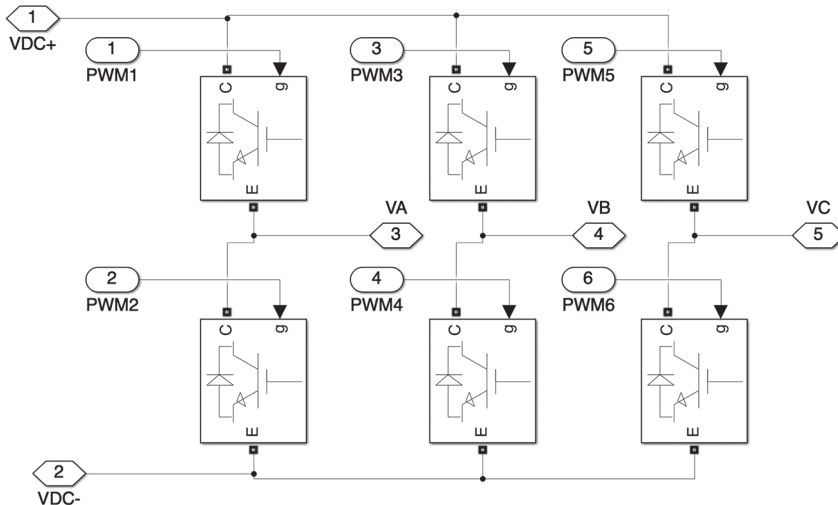


Рис. 9. Подсистема модели инвертора напряжения  
 Fig. 9. Subsystem of the voltage inverter model

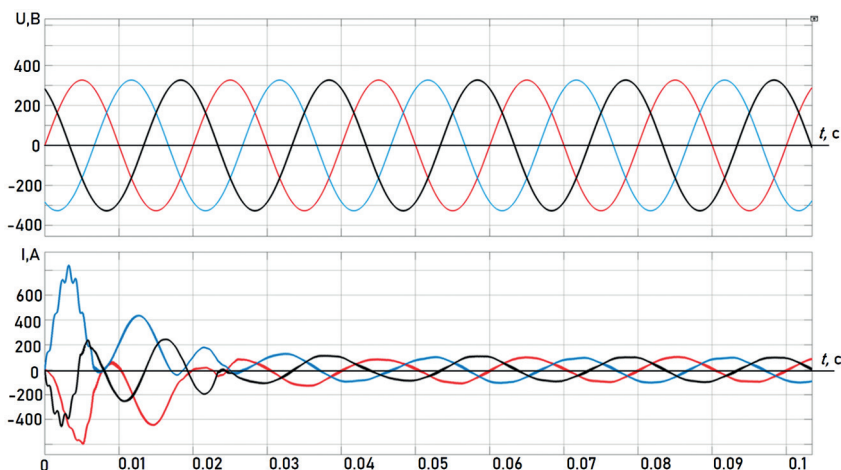


Рис. 10. Напряжение и ток на выходе DC-AC преобразователя  
 Fig. 10. Voltage and current at the output of the DC-AC converter

$$K_{21}(p) = \frac{W_{21}(p)}{W_{p1}(p)W_{11}(p)} \quad (6)$$

Включение компенсаторов, согласно формулам (5) и (6), обеспечивает автономность каждому из контуров двухсвязной системы регулирования, однако технически точная реализация компенсаторов вида (5) и (6) невозможна ввиду сложной передаточной функции объекта управления. Следовательно, неполной автономности контуров управления можно достичь с помощью компенсаторов  $K_{12}^*(p)$  и  $K_{21}^*(p)$ , передаточные функции которых максимально приближаются к условиям (5) и (6), имеющим следующий вид [32]:

$$K_{12}^*(p) = \frac{1 + T_{1k}p}{1 + T_{2k}p} \quad (7)$$

$$K_{21}^*(p) = \frac{1 + T_{3k}p}{1 + T_{4k}p} \quad (8)$$

В формулах (7) и (8)  $T_{1k}$ ,  $T_{2k}$ ,  $T_{3k}$ ,  $T_{4k}$  — значения параметров компенсатора, при которых осуществляется наилучшее из возможных приближений (7) и (8) к уравнениям идеальных компенсаторов по формулам (5) и (6) [33].

С помощью данных уравнений были рассчитаны ПИ-регуляторы для обеспечения синхронизации двух независимых систем электроснабжения [34].

Схема подключения транзисторов для обеспечения требуемого 3-фазного напряжения представлена на рис. 9. При этом выход DC-DC преобразователя соединен с входом DC-AC преобразователя через звено постоянного тока автономной системы электроснабжения, представленного на рис. 1.

Результат имитационного моделирования показал, что разработанный алгоритм САУ обеспечивает переменное напряжение на выходе DC-AC преобразователя. График 3-фазного выходного напряжения и потребляемого тока нагрузки на выходе DC-AC преобразователя представлен на рис. 10.

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что разработанная система управления, содержащая два ПИ-регулятора, отвечающих за синхронизацию с параллельно работающей системой электроснабжения, обеспечивает требуемый для нагрузки уровень напряжения на выходе DC-AC преобразователя. Время регулирования и пере-

ходного процесса составляет 0,04 с, тем самым обеспечивается необходимая синхронизация двух независимых систем электроснабжения без возникновения аварийных ситуаций.

### Обсуждение результатов

По результатам имитационного моделирования в программе Matlab среды Simulink предполагается проведение дальнейших исследований по повышению эффективности работы автономных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии за счет совершенствования системы автоматического управления преобразователями энергии с целью обеспечения требуемого качества электрической энергии и скорости синхронизацией с параллельно работающей системой электроснабжения.

### Заключение

В работе представлены режимы работы и расчет систем управления DC-DC и AC-DC преобразователей с ПИ-регуляторами для обеспечения передачи электрической энергии в условиях

автономной системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Результаты имитационного моделирования показали, что разработанная система управления DC-DC и DC-AC преобразователей в автономной системе электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии удовлетворяет заданным условиям по обеспечению требуемого уровня напряжения и синхронизации по фазе с параллельно работающей системой электроснабжения с целью надежного и бесперебойного функционирования технологического оборудования предприятий минерально-сырьевого комплекса.

Установлено, что предлагаемые в работе системы управления автономной системы электроснабжения обеспечивают требуемое качество электрической энергии, а также синхронизацию с параллельно работающей системой электроснабжения для обеспечения непрерывного электроснабжения предприятий по добыче железомарганцевых конкреций, распространенных вдоль шельфовой зоны Арктики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимин Р. Ю., Сержан С. Л., Малеванный Д. В. Применение преобразователей на постоянном и переменном токе в автономных системах электроснабжения на основе ветрогенераторов в условиях арктического шельфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 6. — С. 69–87. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_6\_0\_69.
2. Рогов В. С., Фролов В. В., Никольская Н. С., Титов А. Л. Опыт добычи и промышленного использования железомарганцевых конкреций // Горный журнал. — 2012. — № 3. — С. 50–55.
3. Zhukovskiy Y. L. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit // Indonesian Journal of Science and Technology. 2022, vol. 8, no. 1, pp. 65–78.
4. Котелева Н. И., Вальнев В. В., Королев Н. А. Технология дополненной реальности как средство технического обслуживания оборудования металлургических производств // Цветные металлы. — 2023. — № 4. — С. 14–23. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.02.
5. Koteleva N., Korolev N., Zhukovskiy Y., Baranov G. A soft sensor for measuring the wear of an induction motor bearing by the park's vector components of current and voltage // Sensors. 2021, vol. 21, no. 23, article 7900. DOI: 10.3390/s21237900.
6. Лавренко С. А., Шорников В. В., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е., Шмидт И. В. Взвешивание самосвалов как инструмент повышения эффективности эксплуатации погрузочно-доставочной техники // Горная промышленность. — 2025. — № 1S. — С. 81–85. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-81-85.

7. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275. – С. 5–17.

8. Seyed Milad Hosseini Kavkani, Reza Sedaghati, Amir Ghaedi A novel topology of nonisolated DC-DC high step up converters for solar PV power plants // Journal of Integrated Circuits and Systems. 2022, vol. 17, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.29292/jics.v17i2.604.

9. Anwar Al Omar, Pat Wheeler, Pericle Zanchetta, Claudio Burgos-Mellado A fixed frequency full-bridge three-level DC-DC LCL-type series resonant converter for large scale solar PV plants applications / European Conference on Power Electronics and Applications. 2021. DOI: 10.23919/EPE21EC-CEEurope50061.2021.957070715.

10. Uthirasamy R., Kumar Chinnaiyan V., Vishnukumar S., Karthick A., Mohanavel V., Subramaniam U., Muhibbullah M. Design of boosted multilevel DC-DC converter for solar photovoltaic system // International Journal of Photoenergy. 2022, pp. 1–23. DOI: 10.1155/2022/1648474.

11. Amrouyache M. Proposal of a sizing algorithm for an optimal design of DC/DC converters used in photovoltaic conversion // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI). 2022, vol. 10, no. 3, pp. 534–548. DOI: 10.52549/ijeiv10i3.3890.

12. Sikorski A., Falkowski P., Korzeniewski M. Comparison of two power converter topologies in wind turbine system // Energies. 2021, vol. 14, no. 20, pp. 1–16. DOI:10.3390/en14206574.

13. Taghavi M., Delkhosh H., Moghaddam M. P., Fini A. S. Combined PV-wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of converters and demand flexibility // Sustainability. 2021, vol. 14, pp. 1–28. DOI: 10.3390/su14137558.

14. Gang Du, Dongmei Zhao, Xin Liu, Zhiqiang Wu, Chao Li Decentralized robust dispatch for multi-area AC/DC system considering wind power uncertainty // IET Generation, Transmission & Distribution. 2021, pp. 2710–2720. DOI: 10.1049/gtd2.12209.

15. Zhenshan Zhu, Dichen Liu, Qingfen Liao, Fei Tang, Jun Jason Zhang, Huaiguang Jiang Optimal power scheduling for a medium voltage AC/DC hybrid distribution network // Sustainability. 2018, vol. 10, pp. 1–22. DOI: 10.3390/su10020318.

16. Kumar Abhishek Singh, Kalpana Chaudhary High gain boost converter with ripple free input current for solar power integration in DC microgrid // 2022 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). 2022. DOI: 10.1109/iSPEC54162.2022.10032983.

17. Bilal Naji Alhasnawi, Basil H. Jasim, Amjad Anvari-Moghaddam, Frede Blaabjerg A new robust control strategy for parallel operated inverters in green energy applications // Energies. 2020, vol. 13, no. 13, pp. 1–31. DOI: 10.3390/en13133480.

18. Zimin R. Yu., Kuchin V. N. Improving the efficiency of oil and gas field development through the use of alternative energy sources in the Arctic / 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020, article 9271103. DOI: 10.1109/FarEast-Con50210.2020.9271103.

19. Ibrahim Alhamrouni, Mohamed Salem, Younes Zahraoui, Bazilah Ismail, Awang Jusoh, Tole Sutikno. Multi-input interleaved DC-DC converter for hybrid renewable energy applications // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2022, vol. 11, pp. 1765–1778. DOI: 10.11591/eei.v11i3.3779.

20. Sangwongwanich Ariya F., Blaabjerg F. Mitigation of interharmonics in PV systems with maximum power point tracking modification // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019, vol. 34, no. 9, pp. 8279–8282. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2902880.

21. Vasudevan R., Ramalakshmi S. Dynamic stability improvement of power system with VSC-HVDC transmission // International Journal of Engineering & Technology. 2018, vol. 7, pp. 500–503. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.27.18003.

22. Kai Qu, Gangquan Si, Zeyu Yang, Yuehui Huang, Pai Li Correlation modeling of multiple wind farms based on piecewise cloud representation and regular vine copulas // Energy Reports. 2020, vol. 6, pp. 289–297. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.239.

23. Moein Taghavi, Hamed Delkhosh, Mohsen Parsa Moghaddam, Alireza Sheikhi Fini Combined PV-wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of converters and demand flexibility // Sustainability. 2021, vol. 14, pp. 1–28.

24. Fabian Limberger, Georg Rumpfer, Michael Lindenfeld, Hagen Deckert Development of a numerical modelling method to predict the seismic signals generated by wind farms // Scientific Reports. 2022, vol. 12, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-022-19799-w.

25. *Ilushin Yu., Martirosyan A.* The development of the sodberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system // *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 3501. DOI: 10.1038/s41598-024-52002-w.

26. *Abramovich B. N., Sychev Y. A., Zimin R.* The hybrid correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises / 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018, article 8602638. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638.

27. *Abramovich B. N., Sychev Y. A., Zimin R.* Selection of shunt active filter main parameters in conditions of centralized and distributed power supply systems / 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018, article 8728566. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728566.

28. *Kokonkov A. A., Liakh D. D., Ivanov S. L., Stroykov G. A., Ivanova P.* Experimental estimation of specific heat of combustion of agglomerated peat fuel // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012046.


29. *Шпенст В. А., Бельский А. А., Орел Е. А.* Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 261. — С. 479—492. EDN SNUKNA

30. *Shpenst V. A., Orel E. A., Babyr K. V.* Reliability improvement of DC-DC power converters by means of feedback signals reserve / 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2022, pp. 1270—1275. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755770.

31. *Bolshunova O. M., Korzhev A. A., Vatlina A. M.* Power stabilization system for the regulated electric drive of transport vehicles // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012014.

32. *Yablochnikova I. O., Dzobelova V. B., Yablochnikov S. L., Belinskaya D. B., Martemyanova A. N.* Educational process management at IT-universities / 2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2025. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948106.

33. *Kameshkov A. V., Rudko V. A., Gabdulkhakov R. R., Nazarenko M. Y., Starkov M. K., Povarov V. G., Pyagay I. N.* Technology of producing petroleum coking additives to replace coking coal // *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 51, pp. 35307—35314. DOI: 10.1021/acsomega.1c04075.

34. *Yungmeister D. A., Smolenskii M. P., Serzhan S. L., Urazbaktin R. Y.* Parameters of a stepping device for mining of scattered minerals on the sea bed // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 487—502. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-487-502. 

## REFERENCES

1. Zimin R. Yu., Serzhan S. L., Malevannyi D. V. Application of DC/AC converters in self-contained power supply systems based on wind generators in the conditions of the Arctic Shelf. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 6, pp. 69—87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_6\_0\_69.

2. Rogov V. S., Frolov V. V., Nikolskaya N. S., Titov A. L. Experience in mining and industrial use of ferromanganese nodules. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 3, pp. 50—55. [In Russ].

3. Zhukovskiy Y. L. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 2022, vol. 8, no. 1, pp. 65—78.

4. Koteleva N. I., Valnev V. V., Korolev N. A. Augmented reality as a means of metallurgical equipment servicing. *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 14—23. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.02.

5. Koteleva N., Korolev N., Zhukovskiy Y., Baranov G. A soft sensor for measuring the wear of an induction motor bearing by the park's vector components of current and voltage. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 23, article 7900. DOI: 10.3390/s21237900.

6. Lavrenko S. A., Shornikov V. V., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E., Shmidt I. V. Weighing of dump trucks as a tool to improve the operating efficiency of loading and hauling equipment. *Russian Mining Industry*. 2025, no. 1S, pp. 81—85. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-81-85.

7. Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K. Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 275, pp. 5—17. [In Russ].

8. Seyed Milad Hosseinikavkani, Reza Sedaghati, Amir Ghaedi A novel topology of nonisolated DC-DC high step up converters for solar PV power plants. *Journal of Integrated Circuits and Systems*. 2022, vol. 17, no. 2, pp. 1 – 6. DOI: 10.29292/jics.v17i2.604.

9. Anwar Al Omar, Pat Wheeler, Pericle Zanchetta, Claudio Burgos-Mellado A fixed frequency full-bridge three-level DC-DC LCL-type series resonant converter for large scale solar PV plants applications. *European Conference on Power Electronics and Applications*. 2021. DOI: 10.23919/EPE21EC-CEEurope50061.2021.957070715.

10. Uthirasamy R., Kumar Chinnaiyan V., Vishnukumar S., Karthick A., Mohanavel V., Subramaniam U., Muhibbullah M. Design of boosted multilevel DC-DC converter for solar photovoltaic system. *International Journal of Photoenergy*. 2022, pp. 1 – 23. DOI: 10.1155/2022/1648474.

11. Amrouayache M. Proposal of a sizing algorithm for an optimal design of DC/DC converters used in photovoltaic conversion. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*. 2022, vol. 10, no. 3, pp. 534 – 548. DOI: 10.52549/ijeie.v10i3.3890.

12. Sikorski A., Falkowski P., Korzeniewski M. Comparison of two power converter topologies in wind turbine system. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 20, pp. 1 – 16. DOI:10.3390/en14206574.

13. Taghavi M., Delkhosh H., Moghaddam M. P., Fini A. S. Combined PV-wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of converters and demand flexibility. *Sustainability*. 2021, vol. 14, pp. 1 – 28. DOI: 10.3390/su14137558.

14. Gang Du, Dongmei Zhao, Xin Liu, Zhiqiang Wu, Chao Li Decentralized robust dispatch for multi-area AC/DC system considering wind power uncertainty. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021, pp. 2710 – 2720. DOI: 10.1049/gtd2.12209.

15. Zhenshan Zhu, Dichen Liu, Qingfen Liao, Fei Tang, Jun Jason Zhang, Huaiguang Jiang Optimal power scheduling for a medium voltage AC/DC hybrid distribution network. *Sustainability*. 2018, vol. 10, pp. 1 – 22. DOI: 10.3390/su10020318.

16. Kumar Abhishek Singh, Kalpana Chaudhary High gain boost converter with ripple free input current for solar power integration in DC microgrid. *2022 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. 2022. DOI: 10.1109/iSPEC54162.2022.10032983.

17. Bilal Naji Alhasnawi, Basil H. Jasim, Amjad Anvari-Moghaddam, Frede Blaabjerg A new robust control strategy for parallel operated inverters in green energy applications. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 13, pp. 1 – 31. DOI: 10.3390/en13133480.

18. Zimin R. Yu., Kuchin V. N. Improving the efficiency of oil and gas field development through the use of alternative energy sources in the Arctic. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020, article 9271103. DOI: 10.1109/FarEast-Con50210.2020.9271103.

19. Ibrahim Alhamrouni, Mohamed Salem, Younes Zahraoui, Bazilah Ismail, Awang Jusoh, Tole Sutikno. Multi-input interleaved DC-DC converter for hybrid renewable energy applications. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022, vol. 11, pp. 1765 – 1778. DOI: 10.11591/eei.v11i3.3779.

20. Sangwongwanich Ariya F., Blaabjerg F. Mitigation of interharmonics in PV systems with maximum power point tracking modification. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019, vol. 34, no. 9, pp. 8279 – 8282. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2902880.

21. Vasudevan R., Ramalakshmi S. Dynamic stability improvement of power system with VSC-HVDC transmission. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, vol. 7, pp. 500 – 503. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.27.18003.

22. Kai Qu, Gangquan Si, Zeyu Yang, Yuehui Huang, Pai Li Correlation modeling of multiple wind farms based on piecewise cloud representation and regular vine copulas. *Energy Reports*. 2020, vol. 6, pp. 289 – 297. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.239.

23. Moein Taghavi, Hamed Delkhosh, Mohsen Parsa Moghaddam, Alireza Sheikhi Fini Combined PV-wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of converters and demand flexibility. *Sustainability*. 2021, vol. 14, pp. 1 – 28.

24. Fabian Limberger, Georg Rumpker, Michael Lindenfeld, Hagen Deckert Development of a numerical modelling method to predict the seismic signals generated by wind farms. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-022-19799-w.

25. Ilushin Yu., Martirosyan A. The development of the sodberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 3501. DOI: 10.1038/s41598-024-52002-w.

26. Abramovich B. N., Sychev Y. A., Zimin R. The hybrid correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises. *2018 International Multi-Con*

ference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018, article 8602638. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638.

27. Abramovich B. N., Sychev Y. A., Zimin R. Selection of shunt active filter main parameters in conditions of centralized and distributed power supply systems. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2018, article 8728566. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728566.

28. Kokonkov A. A., Liakh D. D., Ivanov S. L., Stroykov G. A., Ivanova P. Experimental estimation of specific heat of combustion of agglomerated peat fuel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012046.

29. Shpenst V. A., Belskiy A. A., Orel E. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complex with renewable energy sources by means of adaptive regulation of its operating modes. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 479 – 492. [In Russ]. EDN SNUKNA.

30. Shpenst V. A., Orel E. A., Babyr K. V. Reliability improvement of DC-DC power converters by means of feedback signals reserve. *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2022, pp. 1270 – 1275. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755770.

31. Bolshunova O. M., Korzhev A. A., Vatlina A. M. Power stabilization system for the regulated electric drive of transport vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012014.

32. Yablochnikova I. O., Dzobelova V. B., Yablochnikov S. L., Belinskaya D. B., Martemyanova A. N. Educational process management at IT-universities. *2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2025. DOI: 10.1109/IEEECONF64229.2025.10948106.

33. Kameshkov A. V., Rudko V. A., Gabdulkhakov R. R., Nazarenko M. Y., Starkov M. K., Povarov V. G., Pyagay I. N. Technology of producing petroleum coking additives to replace coking coal. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 51, pp. 35307 – 35314. DOI: 10.1021/acsomega.1c04075.

34. Yungmeister D. A., Smolenskii M. P., Serzhan S. L., Urazbakhtin R. Y. Parameters of a stepping device for mining of scattered minerals on the sea bed. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 487 – 502. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-487-502.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Зимин Роман Юрьевич**<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
руководитель направления научно-образовательных программ,  
e-mail: zim\_in\_ryu@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-0498-8904,

**Сычев Юрий Анатольевич**<sup>1</sup> — д-р техн. наук, доцент,  
профессор, ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Зимин Р.Ю., e-mail: zim\_in\_ryu@pers.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**R. Y. Zimin**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Head of Scientific  
and Educational Programs,  
e-mail: zim\_in\_ryu@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-0498-8904,

**Y. A. Sychev**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Professor, ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II,  
Saint-Petersburg, 199106, Russia.

**Corresponding author:** R. Y. Zimin, e-mail: zim\_in\_ryu@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 09.12.2025; получена после рецензии 09.02.2026; принята к печати 10.04.2026.

Received by the editors 09.12.2025; received after the review 09.02.2026; accepted for printing 10.04.2026.