

## Результаты исследования интергармоник систем тягового электропривода горного транспорта

А.Н. Назарычев, Т.Е. Минакова, М.В. Попов✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
✉ [popov.mark.viktorovich@yandex.ru](mailto:popov.mark.viktorovich@yandex.ru)

**Резюме:** Асинхронный электродвигатель в связке с преобразователем частоты является наиболее распространённой реализацией электропривода горного транспорта, а также источником интергармоник, которые обычно рассматриваются только с точки зрения качества электроэнергии и последующих проблем для оборудования. Рассматривается использование интергармоник в качестве идентификационного признака успешного пуска асинхронного электродвигателя, являющегося приводом для различного горного транспорта. В статье (1) описываются причины возникновения интергармонических составляющих в спектре тока и напряжения, проводятся исследования пуска электродвигателя шахтной подъёмной установки и трёхфазного короткого замыкания в обмотках статора двигателя, (2) анализируются полученные спектры тока с помощью быстрого преобразования Фурье, (3) подтверждается наличие интергармоник в пусковом токе электродвигателя и выясняется их источник.

**Ключевые слова:** шахтные подъёмные машины, вольт-амперная характеристика, нелинейная вольт-амперная характеристика, высшие гармоники, интергармоники, качество электроэнергии, частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты

**Для цитирования:** Назарычев А.Н., Минакова Т.Е., Попов М.В. Результаты исследования интергармоник систем тягового электропривода горного транспорта. *Горная промышленность*. 2025;(1S):68–72. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-68-72>

## Results of research into interharmonics of traction electric drive systems for mining transport machines

A.N. Nazarychev, T.E. Minakova, M.V. Popov✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation  
✉ [popov.mark.viktorovich@yandex.ru](mailto:popov.mark.viktorovich@yandex.ru)

**Abstract:** An induction motor in conjunction with a frequency converter is the most common design of the electric drive for mining transport machines, as well as a source of interharmonics, which are usually considered only in terms of electric power quality and subsequent problems they create for the equipment. The paper addresses the use of interharmonics as an identification sign of a successful start-up of the induction motor that is used as a power drive for various types of mining transport equipment. The paper (1) describes the causes of interharmonic components in the current and voltage spectrum, investigates the start-up of a mine hoist motor and a three-phase short circuit in the motor's stator windings, (2) analyzes the obtained current spectra using Fast Fourier Transform, and (3) confirms the presence of interharmonics in the motor inrush current while identifying their source.

**Keywords:** mine hoist, current-voltage characteristic, nonlinear current-voltage characteristic, higher harmonics, interharmonics, electric power quality, frequency-controlled electric drive, frequency converter

**For citation:** Nazarychev A.N., Minakova T.E., Popov M.V. Results of research into interharmonics of traction electric drive systems for mining transport machines. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):68–72. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-68-72>

### Введение

Транспортировка полезных ископаемых может занимать до половины себестоимости добычи, поэтому снижение затрат и времени простоя является одним из главных способов увеличения эффективности. Постоянное опережающее по сравнению с электричеством удорожание дизельного топлива способствует расширению применения

электротранспорта с различными силовыми установками в данной отрасли [1; 2].

В закрытых способах добычи полезных ископаемых повышение эффективности подъёмных машин является одним из главных способов снижения энергозатрат [3; 4]. Наиболее распространёнными реализациями электроприводов шахтных подъёмных машин (далее ШПМ) слу-

жат: «тиристорный преобразователь-электродвигатель постоянного тока» (ТП-ДПТ, данная установка чаще всего применяется при реконструкции уже существующих приводов постоянного тока) [5]; асинхронный двигатель с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ)<sup>1</sup> и синхронным двигателем или же вместо НПЧ трехуровневый инвертор с нейтральной точкой [6].

Из всего вышесказанного видим, что все современные реализации горного электротранспорта обладают различной нелинейной нагрузкой [7], представленной главным образом асинхронным двигателем с ПЧ различных конструкций. Данная связка потребляет ток, кривая которого является несинусоидальной, а в некоторых случаях и непериодической, что приводит к появлению различных гармоник в спектре питающего тока и напряжения.

Большинство исследований в области гармонического анализа сосредоточено на высших гармониках (ВГ). Интергармоники представляют собой гармонические колебания с частотами, которые не кратны частоте питающей сети [8; 9] (в нашем случае это частоты, не кратные 50 Гц). Основной причиной их появления в спектре электрического тока является модуляция несинусоидальных процессов, которые содержат только кратные ВГ, а также низкочастотные колебания, характерные для сетей с резкими изменениями нагрузки [10]. Обычно эти процессы имеют случайный характер, что приводит к нестабильности интергармонических составляющих как по частоте, так и по амплитуде, которая ещё и в разы меньше, чем у кратных гармоник.

Второй причиной являются силовые электронные устройства, частоты переключения которых не совпадают с частотой электроснабжения [11]. Наиболее ярким представителем данной причины является преобразователь частоты с непосредственной связью, который изменяет частоту питающего напряжения напрямую. Похожее явление происходит и при пуске асинхронного двигателя, при этом данное явление возможно рассматривать не только с точки зрения качества электроэнергии, но и как признак срабатывания релейной защиты от несостоявшихся

пусков, что актуально для транспортировочных устройств с тяжёлым условием пуска [12], где разгон может занимать до нескольких секунд, а токи короткого замыкания сопоставимы с пусковыми.

### Методы и материалы

Анализ литературных источников на предмет причин возникновения интергармоник. Моделирование пуска асинхронного электродвигателя и трёхфазного короткого замыкания в его статоре с помощью «Simulink». Анализ полученных спектров с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Любую синусоиду тока можно рассматривать как совокупность простых гармонических колебаний различных частот. Представляется она обычно рядом Фурье:

$$i(t) = I_0 + \sum_{v=1}^n I_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v),$$

где  $I_0$  – постоянная составляющая (в трёхфазных сетях практически всегда  $I_0 = 0$ );  $I_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v)$  – высшие гармоники (ВГ) или гармонические составляющие  $v$ -го порядка с амплитудой  $I_{vm}$  и начальной фазой  $\psi_v$ ;  $n$  – порядок (номер) последней из учитываемых ВГ. Гармоника  $v = 1$ , частота которой соответствует частоте сети, называется первой и основной; остальные высшими [13; 14].

Собственно, с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) можно получить амплитуду любой высшей гармоники, присутствующей в спектре тока или напряжения, относительно основной частоты [15]. В случае применения данного способа для интергармоник существует значительная погрешность в полученных результатах, так как амплитуда интергармонической составляющей конкретной частоты «размазывается» по соседним, однако для доказательства именно наличия их в спектре этого достаточно [16]. Минимальный промежуток измерений для выявления какой-либо гармоники нормируется ГОСТ ИЕС/TR 61000-3-14–2019 в 10 периодов основной частоты.

Экспериментальная схема, собранная с помощью средств «Simulink», представлена на рис. 1.

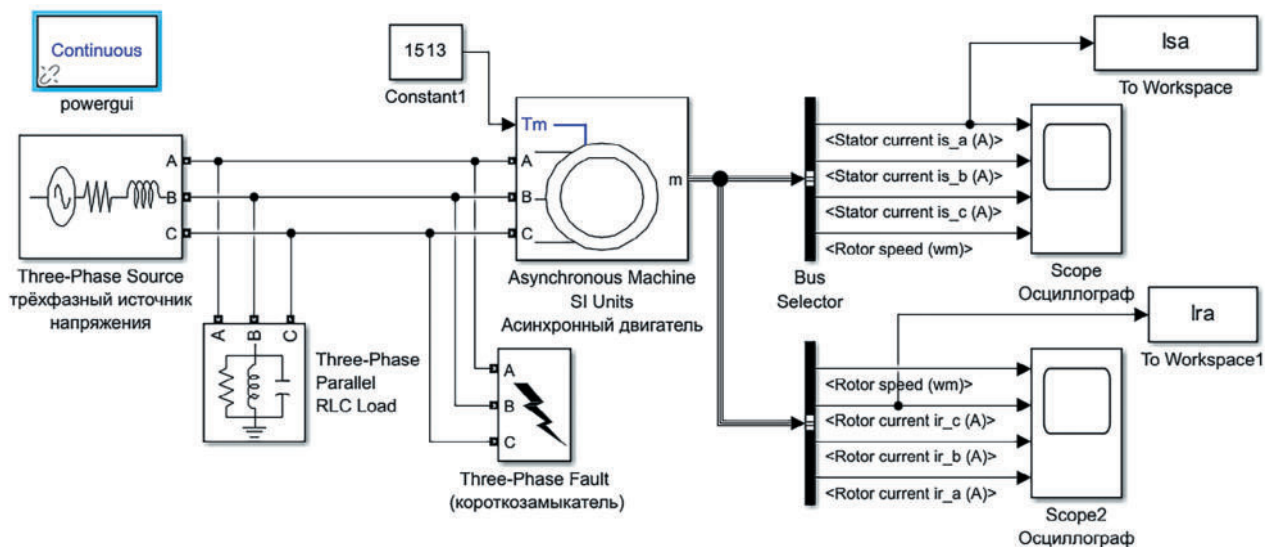


Рис. 1  
 Математическая модель пуска асинхронного электродвигателя, выполненная средствами пакета «Simulink»

Fig. 1  
 Mathematical model of the induction motor start-up using the Simulink suite

<sup>1</sup> Миркон. Основные источники искажений в силовых сетях объектов: преобразователи. Режим доступа: <https://www.elec.ru/publications/promyshlennoe-oborudovanie/7404/> (дата обращения: 15.12.2024).

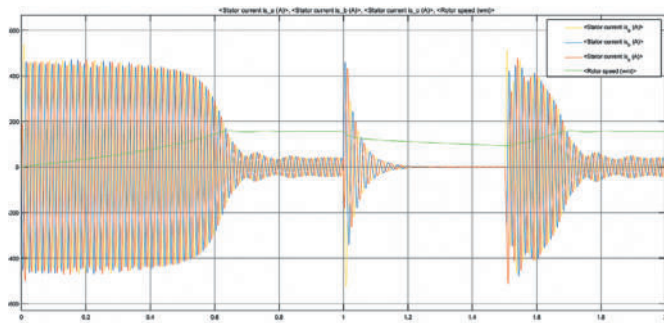
Блок «Powergui» необходим для работы модели [17; 18]. Нагрузка задана постоянным моментом, так как рассматривается подъёмная машина. Короткозамыкатель создаёт трёхфазное короткое замыкание после одной секунды моделирования. Первый осциллограф снимает показания токов статора и скорость ротора, а второй – токов ротора и его же скорость. Блок «To Workspace» необходим для вывода токов в средство преобразования сигналов [19].

**Результаты**

На рис. 2 изображены осциллограммы мгновенных значений токов. Во-первых, осциллограмма наглядно демонстрирует, что токи короткого замыкания в системе электроснабжения горного транспорта вполне могут быть сопоставимы с пусковыми электродвигателя, во-вторых, во время пуска синусоиды токов имеют различные пики, что указывает на наличие каких-либо интергармоник в спектре. Если же взглянуть на синусоиды после одной секунды моделирования, когда происходит трёхфазное КЗ, то видим, что амплитуды плавно снижаются, что указывает на отсутствие гармоник.

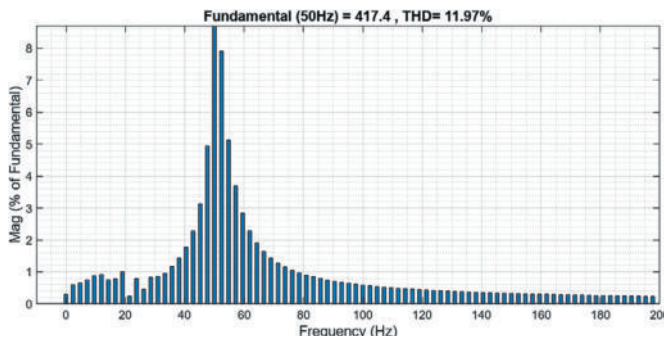
БПФ для пусковых токов статора (рис. 3) показывает, что величины субгармоник находятся в пределах погрешности, кроме спектра около 20 Гц, однако амплитуды в пределах 1% несущей частоты рассматривать в качестве какого-либо признака затруднительно.

Если же рассмотреть рис. 4, где изображены результаты БПФ первых 10 периодов пускового тока в роторе, то в спек-



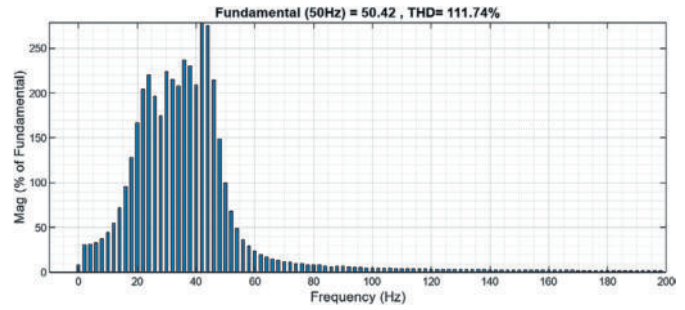
**Рис. 2**  
Осциллограммы мгновенных значений токов статора

**Fig. 2**  
Oscillograms of the instantaneous stator currents



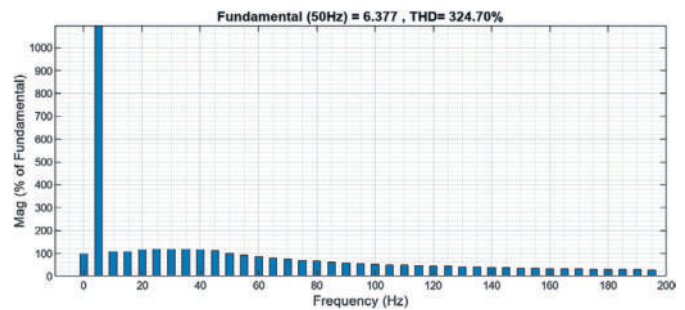
**Рис. 3**  
Результаты быстрого преобразования Фурье первых десяти периодов пускового тока статора

**Fig. 3**  
Results of the Fast Fourier Transform for the first ten periods of the stator inrush current



**Рис. 4**  
Результаты быстрого преобразования Фурье первых десяти периодов пускового тока ротора

**Fig. 4**  
Results of the Fast Fourier Transform for the first ten periods of the rotor inrush current



**Рис. 5**  
Результаты быстрого преобразования Фурье первых десяти периодов тока трёхфазного короткого замыкания

**Fig. 5**  
Results of the Fast Fourier Transform for the first ten periods of the three-phase short circuit current

тре отчётливо наблюдаются интергармонические составляющие в промежутке 20–40 Гц. Отсюда же можно сделать вывод, что в статоре мы наблюдали всего лишь наводки от данных составляющих.

Если же мы рассмотрим тот же анализ, но уже токов короткого замыкания (рис. 5), то обнаружим отсутствие каких-либо значимых интергармоник в спектре.

Следовательно, данный опыт подтверждает, что интергармоники можно рассматривать как идентификационный признак успешного пуска асинхронного электродвигателя, что позволит значительно повысить быстродействие релейной защиты, которая на данный момент отстраивается от времени успешного пуска, что для механизмов с тяжёлыми условиями пуска (например, шахтная подъёмная машина) может достигать нескольких секунд. Для выявления же интергармоник достаточно 10 периодов измеряемого тока (0,2 с).

**Заключение**

Асинхронный электродвигатель даже без преобразователя частоты является источником интергармоник, которые можно использовать в качестве идентификационного признака успешного пуска, однако рассматривать стоит не токи статора, как это обычно делается в релейной защите транспортного электрооборудования, а ротора.

**Вклад авторов**

**А.Н. Назарычев** – научное руководство; обоснование концепции; формулировка выводов; утверждение окончательного варианта статьи.

**Т.Е. Минакова** – сбор и систематизация данных; визуализация данных; сбор данных литературы; формальный анализ.

**М.В. Попов** – анализ и обобщение данных литературы; написание исходного текста; работа с графическим материалом; редактирование и оформление.

**Authors' contribution**

**A.N. Nazarychev** – scientific guidance; justification of the concept; formulation of conclusions; approval of the final version of the paper.

**T.E. Minakova** – collection and systematization of data; data visualization; collection of literature data; formal analysis.

**M.V. Popov** – analysis and summarization of literature data; writing the original text; working with graphic material; editing and design of the paper.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no relevant conflict of interests.

**Список литературы / References**

1. Черепанов В.А., Журавлев А.Г., Глебов И.А., Чендырев М.А. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий. *Проблемы недропользования*. 2019;(1):33–49. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/388> (дата обращения: 25.10.2024).  
Cherepanov V.A., Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Chendyrev M.A. Overview of transport with power supply in focus of mining industry development. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(1):33–49. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/388> (accessed: 25.10.2024).
2. Safiullin R., Tian H. Method of effective implementation of intelligent hardware complexes in the management of passenger transportation processes within urban agglomerations. *The Open Transportation Journal*. 2024;18(1):e26671212272101. <https://doi.org/10.2174/0126671212272101231128060918>
3. Safiullin R., Efremova V., Ivanov B. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle. *The Open Transportation Journal*. 2024;18:e18744478309909. <https://doi.org/10.2174/0118744478309909240807051315>
4. Максаров В.В., Минин А.О., Васильков Д.В. Применение высокочастотного волнового воздействия для технологического обеспечения качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов. *Цветные металлы*. 2025;(1):76–83. <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.01.11>  
Maksarov V.V., Minin A.O., Vasilkov D.V. The use of high-frequency wave action for technological quality assurance of boring surfaces of products made of corrosion-resistant aluminum alloys. *Tsvetnye Metally*. 2025;(1):76–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.01.11>
5. Абрамов Б.И., Иванов А.Г., Шиленков В.А., Кузьмин И.К., Шевырев Ю.В. Электропривод современных шахтных подъёмных машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-2):145–162. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_52\\_0\\_145](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_145)  
Abramov B.I., Ivanov A.G., Shilenkov V.A., Kuzmin I.K., Shevyrev Yu.V. Electric drive of modern mining machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-2):145–162. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_52\\_0\\_145](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_145)
6. Vemulapati U., Johannesson D., Wikström T., Stiasny T., Corvace C., Winter C. High-Voltage (8.5 kV) Asymmetric IGCT for MVD and HVDC Applications. In: *2023 11<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia), Jeju Island, 22–25 May 2023*. IEEE; 2023, pp. 1189–1194. <https://doi.org/10.23919/ICPE2023-ECCEAsia54778.2023.10213487>.
7. Han L., Liang L., Kang Y., Qiu Y. A review of SiC IGBT: Models, fabrications, characteristics, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021;36(2):2080–2093. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3005940>
8. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий*. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат; 2000. 331 с
9. Карчина Е.И., Иванова М.В., Волохина А.Т., Глебова Е.В., Вихров А.Е. Усовершенствование процедуры групповой экспертной оценки при анализе профессиональных рисков на предприятиях ТЭК. *Записки Горного института*. 2024;270:994–1003. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16336> (дата обращения: 25.10.2024).  
Karchina E.I., Ivanova M.V., Volokhina A.T., Glebova E.V., Vikhrov A.E. Improving the procedure for group expert assessment in the analysis of professional risks in fuel and energy companies. *Journal of Mining Institute*. 2024;270:994–1003. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16336> (accessed: 25.10.2024).
10. Минакова Т.Е., Маларев В.И., Коржев А.А. Метод распознавания режимов работы асинхронных электродвигателей горных производств по субгармоническим параметрам. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11):96–108. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_11\\_0\\_96](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_96)  
Minakova T. E., Malarev V. I., Korzhev A. A. Method to identify operating regimes of asynchronous drivers by subharmonic parameters in mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11):96–108. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_11\\_0\\_96](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_96)

11. Вынгра А.В. Исследование интеграции активного фильтра в цепи питания электропривода с изменяющимся моментом. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(11):406–409.  
Vyngra A.V. Study of the integration of an active filter in the power circuit of an electric drive with variable torque. *Izvestiya Tulsksogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2023;(11):406–409. (In Russ.)
12. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022;338:130530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>
13. Сериков В.А., Костин В.Н., Сычев Ю.А., Хайдар С. Метод оценки качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий с мощными высоковольтными частотнорегулируемыми электроприводами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(12):162–177.  
Serikov V.A., Kostin V.N., Sychev Yu.A., Haidar S. Evaluation method of power quality in mine supply systems with high-powered high-voltage variable frequency drives. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(12):162–177. (In Russ.)
14. Соснина Е.Н., Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А. Тиристорное вольтодобавочное устройство для снижения колебаний напряжения в системах электроснабжения горно-рудных предприятий. *Записки Горного института*. 2025. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16450> (дата обращения: 25.10.2024).  
Sosnina E.N., Asabin A.A., Bedretdinov R.S., Kryukov E.V., Gusev D.A. Thyristor booster device for voltage fluctuation reduction in power supply systems of ore mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2025. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16450> (accessed: 25.10.2024).
15. Завьялов В.М., Семькина И.Ю., Дубков Е.А., Велиляев А.С. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза. *Записки Горного института*. 2023;261:428–442. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16188> (дата обращения: 25.10.2024).  
Zavyalov V.M., Semykina I.Y., Dubkov E.A., Velilyaev A.-han S. The wireless charging system for mining electric locomotives. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:428–442. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16188> (accessed: 25.10.2024).
16. Николаев А.В., Фёт Ш., Кычкин А.В. Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию. *Записки Горного института*. 2023;261:403–414. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.33>  
Nikolaev A.V., Vöth S., Kychkin A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:403–414. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.33>
17. Babaei Z., Samet H. Optimized time varying parameters of the power balance equation model for electric arc furnaces. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024;18(4):779–792. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13113>
18. Fatemi S.S., Samet H. Optimal placement and coordination of the protection devices simultaneous with optimal allocation of the DGs. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023;17(18):4119–4133. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12970>
19. Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения. *Записки Горного института*. 2023;261:392–402. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16185> (дата обращения: 25.10.2024).  
Klyuev R.V., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Bosikov I.I., Morgoev I.D. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:392–402. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16185> (accessed: 25.10.2024).

#### Информация об авторах

**Назарычев Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6223-4150>; e-mail: nazarychev\_an@pers.spmi.ru

**Минакова Татьяна Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5776-1917>; e-mail: t.e.minakova@mail.ru,

**Попов Марк Викторович** – аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: popov.mark.viktorovich@yandex.ru

#### Information about the authors

**Alexander N. Nazarychev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Electric Power and Electromechanics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6223-4150>; e-mail: nazarychev\_an@pers.spmi.ru

**Tatyana E. Minakova** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric Power and Electromechanics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5776-1917>; e-mail: t.e.minakova@mail.ru,

**Mark V. Popov** – Postgraduate Student, Department of Electric Power and Electromechanics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: popov.mark.viktorovich@yandex.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.12.2024

Поступила после рецензирования: 06.02.2025

Принята к публикации: 07.02.2025

#### Article info

Received: 29.12.2024

Revised: 06.02.2025

Accepted: 07.02.2025