

УДК 622:621.395.66 © С.С. Кубрин¹, И.М. Загоршменный¹, С.Н. Решетняк², Ю.М. Максименко², 2024

UDC 622:621.395.66 © S.S. Kubrin¹, I.M. Zakorshmennyy¹, S.N. Reshetnyak², Yu.M. Maksimenko², 2024

¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН), 111020, г. Москва, Россия

¹ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 119049, г. Москва, Россия
✉ e-mail:reshetniak@inbox.ru

² National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation
✉ e-mail:reshetniak@inbox.ru

Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт

Increasing operational efficiency of mining machines in coal mines

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-4-83-87>

В публикации представлены результаты исследования влияния генерации мощных горных машин поверхностного комплекса угольной шахты на эффективность функционирования электро-технической системы. Описана имитационная модель электро-технической системы угольной шахты, позволяющая проводить оценки влияния высших гармонических составляющих, генерируемых мощными нелинейными потребителями на поверхности, на параметры качества электрической энергии подземных потребителей. Приведены результаты моделирования в виде зависимостей по ряду параметров, дана их оценка и предложены рекомендации по повышению эффективности функционирования системы электроснабжения машин и оборудования поверхностного комплекса угольной шахты.

Ключевые слова: угольная шахта, горные машины, шахтная подъемная установка, система электроснабжения, качество электрической энергии, энергоэффективность, моделирование.

Для цитирования: Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт / С.С. Кубрин, И.М. Загоршменный, С.Н. Решетняк и др. // Уголь. 2024;(4):83-87. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.

Abstract

The publication presents the results of a study of the influence of the generation of powerful mining machines of the surface complex of a coal mine on the efficiency of the electrical system. A simulation model of the electrical system of a coal mine is described, which makes it possible to assess the influence of higher harmonic components generated by powerful nonlinear consumers on the surface on the quality parameters of electrical energy of underground consumers. The simulation results are presented in the form of dependencies on a number of parameters, their assessment is given

КУБРИН С.С.

Доктор техн. наук, профессор, ученый секретарь ИПКОН РАН, заведующий лабораторией 2.2 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Россия

ЗАКОРШМЕННЫЙ И.М.

Доктор техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории 2.2 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Россия

РЕШЕТНЯК С.Н.

Канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории 2.2 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия, e-mail: reshetniak@inbox.ru

МАКСИМЕНКО Ю.М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Геотехнология» НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

and recommendations are proposed to improve the efficiency of the power supply system for machinery and equipment of the surface complex of a coal mine.

Keywords

Coal mine, mining machines, mine lifting installation, power supply system, quality of electrical energy, energy efficiency, modeling.

For citation

Kubrin S.S., Zakorshmenny I.M., Reshetnyak S.N., Maksimenko Yu.M. Increasing operational efficiency of mining machines in coal mines. *Ugol'*. 2024;(4):83-87. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время доля угля в энергетическом балансе Российской Федерации находится на стабильно высоком месте и в ближайшее время снижение ее не прогнозируется [1, 2]. Это обусловлено рядом факторов, в том числе значительными объемами угля, который экспортируется за рубеж. В связи с этим Правительством Российской Федерации была разработана и утверждена Стратегия развития горнодобывающей отрасли России до 2035 года, в которой прописаны основные этапы. Одним из этапов этой стратегии является снижение издержек на добычу угля подземным способом за счет снижения себестоимости добычи. Это может быть достигнуто путем использования современного высокотехнологического оборудования, в том числе со значительным числом преобразовательной техники либо значительными мощностями нелинейных потребителей, входящих в его состав [3, 4, 5, 6]. В связи с этим возникает актуальная научная задача в области повышения уровня электромагнитной совместимости (качества электрической энергии) в электротехнических системах угольных шахт, а именно, оценка влияния генерации мощных нелинейных потребителей на эффективность функционирования электротехнической системы угольных шахт.

Вопросам повышения параметров качества электрической энергии для общепромышленных предприятий, для предприятий нефтегазового комплекса уделено достаточно большое внимание [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], однако данные вопросы были рассмотрены недостаточно в условиях электротехнических систем угольных шахт, в том числе шахт высокой производительности. Это обусловлено рядом технологических факторов добычи угля подземным способом, а также особенностями построения систем электроснабжения. К технологическим факторам следует отнести особенности аэрогазовой обстановки в подземных горных выработках, особенно для угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли, а также отсутствие возможности использования общепринятых методик и общепромышленного оборудования [18, 19]. Особенности построения систем электроснабжения угольных шахт заключаются в различных режимах нейтрали, которые используются одновременно. В частности, на поверхности угольной шахты используется режим глухозаземленной нейтрали, в подземных горных выработках используется режим изолированной нейтрали.

Отметим, что несоответствие параметров качества электрической энергии вызывает повышенный нагрев электродвигателей, силовых трансформаторов, кабелей, а также сбои в работе устройств управления и защиты [20, 21].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Одним из способов оценки влияния высших гармонических составляющих в системе электроснабжения, в том числе, системе электроснабжения угольной шахты, являются имитационное моделирование и сравнение его результатов с результатами экспериментальных исследований для оценки адекватности модели.

Широкое применение для электроснабжения угольных шахт находят две системы: с использованием двухобмоточных силовых трансформаторов на ГПП (главная понижающая подстанция) и с использованием трехобмоточных силовых трансформаторов. В качестве примера в публикации рассмотрена система электроснабжения с двухобмоточными силовыми трансформаторами. Для разработки модели была построена структурная схема системы электроснабжения угольной шахты с использованием двухобмоточных трансформаторов на ГПП (рис. 1). Анализ схем электроснабжения угольных шахт высокой производительности позволил определить наиболее распространенные из них, это одногоризонтная схема со скважинами для питания фланговых подземных потребителей.

В ее состав входит ряд подземных потребителей угольной шахты: два проходческих участка (ПУ1 и ПУ2); выемочный участок (ВУ); участок шахтного конвейерного транспорта (УКТ); участок водоотлива (УВ); обособленная нагрузка околоствольного двора (ОНПОД 1 и ОНПОД 2). В качестве потребителей поверхности выступают: две шахтные подъемные установки (ШПУ1 и ШПУ2); два вентилятора главного проветривания (ГВУ1 и ГВУ2); обособленная нагрузка потребителей поверхностного комплекса (ОНППК 1 и ОНППК 2). Следует отметить, что проходческий участок (ПУ2) получает питание через скважину, расположенную на фланге шахтного поля, транспортировка электроэнергии до скважины осуществляется, как правило, по воздушной линии.

На рис. 2 представлена имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты для оценки влияния

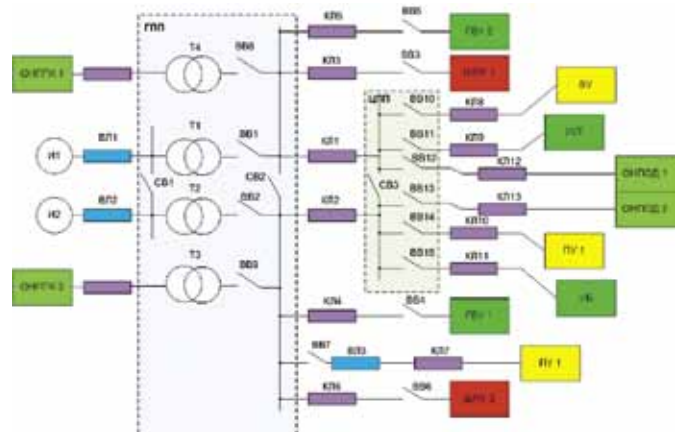


Рис. 1. Структурная схема электроснабжения угольной шахты
Fig. 1. A structural diagram of the power supply system in a coal mine

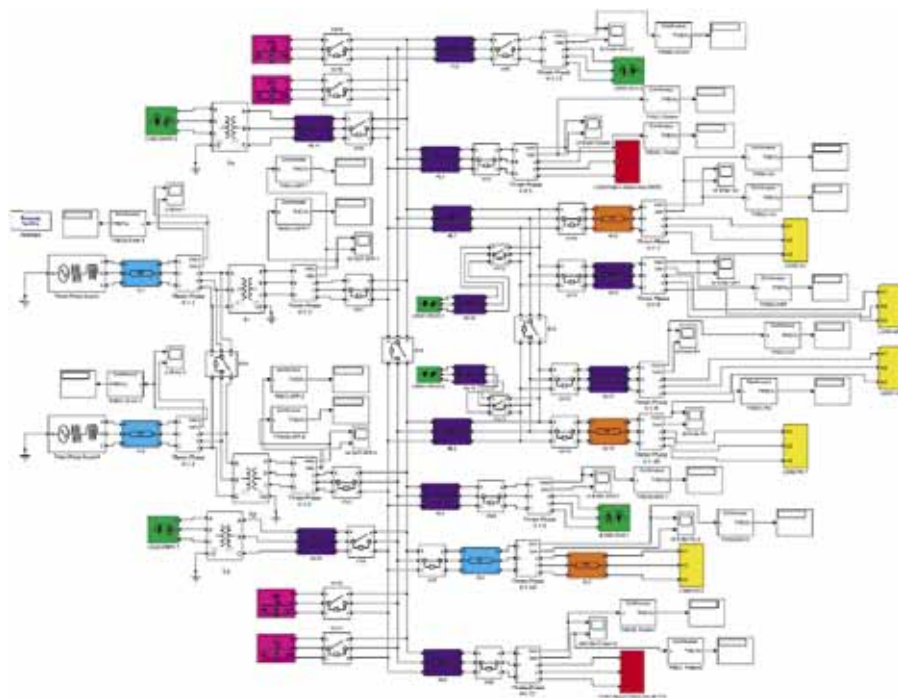


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты для оценки влияния высших гармонических составляющих потребителей поверхности на параметры качества электрической энергии в подземных электрических сетях

Fig. 2. A simulation model of the coal mine power supply system to assess the effects of higher harmonic components of the day surface consumers on the quality parameters of electrical energy in underground power networks

высших гармонических составляющих потребителей поверхности на параметры качества электрической энергии в подземных электрических сетях. В состав модели входят: два источника напряжением 110 кВ; два силовых трансформатора 110/6; коммутационные аппараты; воздушные и кабельные линии; подсистемы, имитирующие работу основных технологических участков угольных шахт.

Адекватность модели составляет 0,9, что подтверждается сравнением результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, проведенных на высокопроизводительных угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Характеристика потребителей электроэнергии угольной шахты (см. таблицу) позволила определить источник генерации высших гармонических составляющих – мощные нелинейные потребители, которые в значительной степени влияют на параметры качества электрической энергии

Характеристика потребителей электроэнергии угольной шахты

Characteristics of coal mine electricity consumers

Вид потребителей	Доля в балансе мощности, %	Вид нагрузки
Потребители поверхности	5	Линейная
Водоотлив	10	Линейная
Вентиляционные установки	20	Линейная
Конвейерный транспорт	20	Линейная
Подъемные установки	20	Нелинейная
Выемочный участок	20	Нелинейная
Проходческий участок	5	Нелинейная

и ($P_{н.п.}$) и длина кабельной линии от ЦПП (Центральная подземная подстанция) до выемочного участка ($L_{кл.ву}$). Анализ результатов позволил сделать заключение о значительном превышении уровня суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению THD(U) как для потребителей на поверхности, так и значительного влияния на подземных потребителей угольных шахт, получающих питание от одних шин ГПП. При нормируемом параметре THD(U) для напряжения 6 кВ – 5% (ГОСТ 32144-2013), данный параметр превышает это значение по всему диапазону мощностей подъемных установок.

Это позволило обосновать необходимость введения в систему электроснабжения дополнительных устройств повышения показателей качества электрической энергии в виде пассивных фильтров высших гармоник на шинах ГПП.

Результаты имитационного моделирования с использованием пассивного фильтра представлены в виде трехмерных (рис. 5) и двухмерные (рис. 6) зависимостей уровня суммарного коэффициента гармонических искажений THD(U) на шинах ГПП от мощности ФКУ (фильтрокомпенсирующих устройств) ($Q_{фку}$) и мощности нелинейных потребителей поверхности (шахтных подъемных установок) ($P_{н.п.}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оценки влияния высших гармонических составляющих мощных нелинейных потребителей поверхности на эффективность функционирования электротехнической системы угольных шахт можно сделать заключение о необходимости гальванической развязки питания мощных

во всей электротехнической сети – это шахтные подъемные установки (ШПУ). В системе электропривода ШПУ (редукторной или безредукторной) используются двигатели постоянного тока (однодвигательная или двухдвигательная схема), получающие питание от управляемых выпрямителей.

Анализ систем управления электроприводом шахтных подъемных установок показал, что преобладающей по отношению к другим используемым является система «Управляемый выпрямитель – Двигатель постоянного тока», поэтому эта система представлена в имитационной модели в качестве нелинейной нагрузки поверхностного комплекса угольной шахты.

Моделирование проведено путем изменения параметров мощности нелинейных потребителей поверхностного комплекса (подъемных установок) и длины кабельной линии к выемочному участку. Результаты моделирования представлены в виде трехмерных (рис. 3) и двухмерных (рис. 4) зависимостей уровня суммарного коэффициента гармонических искажений THD(U) на шинах ГПП от параметров: мощность подъемной установ-



Рис. 3. Результаты моделирования $(THD(U)_{гпп} = f(P_{н.п.п.}, L_{кл.ву.}))$
 Fig. 3. Simulation results $(THD(U)_{гпп} = f(P_{н.п.п.}, L_{кл.ву.}))$

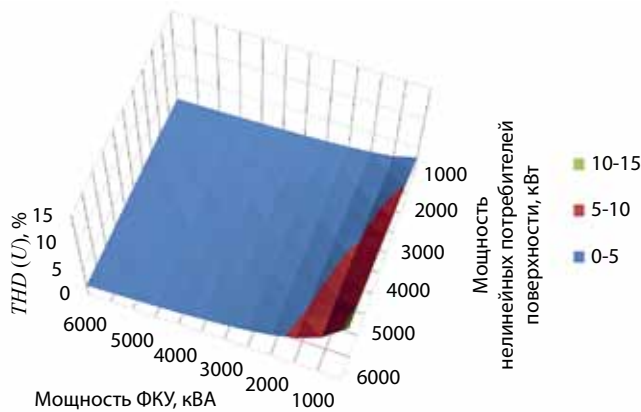


Рис. 5. Результаты моделирования $THD(U)_{гпп} = f(P_{н.п.п.}, Q_{фку})$
 Fig. 5. Simulation results of $THD(U)_{гпп} = f(P_{н.п.п.}, Q_{фку})$

нелинейных потребителей (горных машин) с прочей нагрузкой. Также возможно использование фильтр-компенсирующих устройств, основные параметры которых получены в результате моделирования системы электроснабжения угольной шахты с целью ограничения влияния высших гармонических составляющих на потребителей, включая подземных.

Список литературы • References

1. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Руденко Ю.Ф. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. М.: Издательство ООО «Московский издательский дом», 2009. 396 с.
2. Meshkov A.A., Kazanin O.I., Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the kuzbass mines. *Journal of Mining Institute*. 2021;(5):342-350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.
3. Панов Ю.П., Грабский А.А., Рожков А.А. Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий в угольной промышленности России // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. № 5. С. 8-21. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21>.
 Panov Yu.P., Grabsky A.A., Rozhkov A.A. Current state and prospects for digitalization of the Russian coal industry. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*. 2023;(5): 8-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21>
4. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты // Уголь. 2018. № 10. С. 66-70. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-66-70.
 Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. The importance of improving energy efficiency and safety of coal mine extraction area. *Ugol*. 2018;(10):66-70. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-66-70.

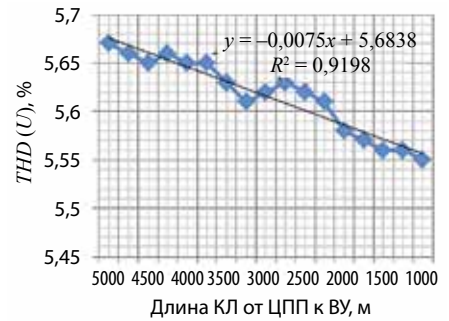
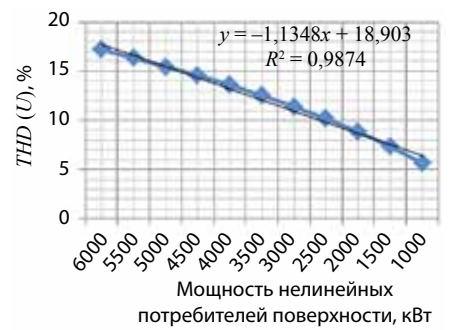


Рис. 4. Результаты моделирования системы электроснабжения угольной шахты (двухмерные зависимости)

Fig. 4. Simulation results of the power supply system in a coal mine (two-dimensional relationships)

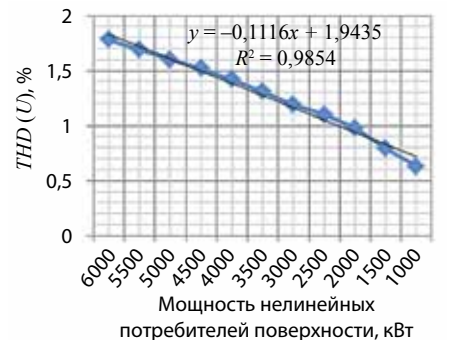
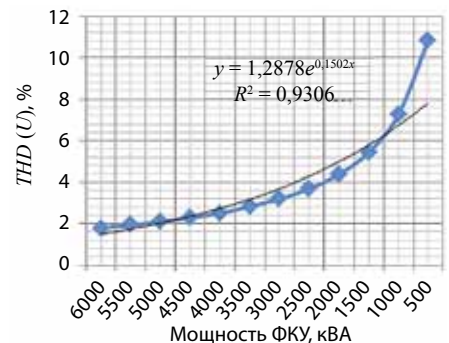


Рис. 6. Результаты моделирования системы электроснабжения угольной шахты (двухмерные зависимости)

Fig. 6. Simulation results of the coal mine power supply system (two-dimensional relationships)

5. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Blokhin D.I. The simulation of the excavation sites of coal mines. *Mining Goes Digital – Proceedings of the 39th international symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 473-480. DOI: 10.1201/9780429320774-54.
6. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт / К.Н. Копылов, С.С. Кубрин, И.М. Загоршменный и др. // *Уголь*. 2019. № 3. С. 46-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-46-49.
Kopylov K.N., Kubrin S.S., Zakorshmenniy I.M., Reshetniak S.N. Reserves of increase of efficiency of coal extraction sections of coal mines. *Ugol*. 2019;(3):46-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-46-49.
7. Patterson S.R., Kozan E.A., Hyland P.B. An integrated model of a coal mine: Improving energy efficiency decisions. *International Journal of Production*. 2016;54(14):4213-4227. DOI: 10.1080/00207543.2015.1117150.
8. Yu B. Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;27(8):8371-8385. DOI: 10.1007/s11356-019-07363-5.
9. Huang H., Liang R., Lu C., Gong D., Yin S. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system. *Applied Energy*. 2021;(290). DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116759.
10. Kumar M., Maity T., Kirar M.K. Energy-use assessment and energy-saving potential analysis in an underground coal mine: A case study. *IEEE Kansas Power and Energy Conference, KPEC 2021*. DOI: 10.1109/KPEC51835.2021.9446232.
11. Nazarychev A.N., Dyachenok G.V., Sychev Yu.A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023;(261): 363-373.
12. Sychev Yu.A., Nazarychev A.N., Dyachenok G.V. Improving the Labor Safety of Mining Dump Truck Drivers by Reducing the Risk of Failure of the Functional Units of the Traction Electric Drive under Operating Conditions. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*. 2023;9:52-58. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-9-52-58.
13. Sychev Yu.A., Aladin M.E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines. *Gornyj Informatsionno-Analiticheskij Byulleten*. 2023;(11):159-181. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-159.
14. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Kuznetsov P.A., Zimin R.Yu. Efficiency Estimation of Hybrid Electrotechnical Complex for Non-Sinusoidal Signals Level Correction in Autonomous Power Supply Systems for Oil Fields. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Vol. 194, Article number 052001.
15. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Pelenev D.N. Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 327, Is. 5, Article number 052027.
16. Abramovich B.N., Sychev Yu.A. Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(4):2640-2645.
17. Prokhorova V.B., Sychev Yu.A. The control system on the base of signal processing for power quality improvement in electrotechnical complexes of alternative and renewable power sources, In *Proceedings of 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*, 26-29 September 2016, pp. 119-124.
18. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kolikov K.S. Aerological risk management in designing, operation, closure and temporary shutdown of coal mines. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*. 2020;(6):85-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94.
19. Скопинцева О.В., Баловцев С.В. Контроль качества атмосферного воздуха на угольных шахтах на основе статистики газового мониторинга // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № 1. С. 78-89. DOI: 10.25018 / 0236-1493-2021-1-0-78-89.
Skopintseva O.V., Balovtsev S.V. Control of atmospheric air quality at coal mines based on gas monitoring statistics. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*. 2021;(1):78-89. (In Russ.). DOI: 10.25018 / 0236-1493-2021-1-0-78-89.
20. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт // *Горный журнал*. 2020. № 5. С. 63-67. DOI:10.17580/gzh.2020.05.11.
Plashchansky L.A., Reshetnyak M.Yu. Analysis of harmonic structure in electric networks of step-down substations coal mines. *Gornyj zhurnal*. 2020;(5):63-67. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2020.05.11.
21. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Условия возникновения резонансных явлений в системе подземного электроснабжения выемочных участков угольных шахт // *Горный журнал*. 2021. № 9. С. 65-71. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.12.
Plashchansky L.A., Reshetnyak M.Yu. Conditions for the occurrence of resonance phenomena in the underground power supply system of coal extraction sections of coal mines. *Gornyj zhurnal*. 2021;(9): 65-71. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2021.09.12.

Authors Information

Kubrin S.S. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Academic Secretary of IPCON RAS, Head of the Laboratory 2.2 “Geotechnological risks in the development of gas-bearing coal and ore deposits” of Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation

Zakorshmenniy I.M. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading researcher of the Laboratory 2.2 “Geotechnological risks in the development of gas-bearing coal and ore deposits” of Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation

Reshetnyak S.N. – PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory 2.2 “Geotechnological risks in the development of gas-bearing coal and ore deposits” of Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation, Associate Professor of the Department “Energy and Energy Efficiency of Mining Industry” of National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: reshetniak@inbox.ru

Maksimenko Yu.M. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geotechnology of National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, 119049, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.02.2024

Поступила после рецензирования: 28.02.2024

Принята к публикации: 26.03.2024

Paper info

Received February 20, 2024

Reviewed February 28, 2024

Accepted March 26, 2024