



## ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-198>

УДК 621.316:622.272



## Оценка эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров

В. Л. Петров  , А. В. Пичуев   

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

 [alexstone@mail.ru](mailto:alexstone@mail.ru)

### Аннотация

Интенсивное внедрение частотно-регулируемых электроприводов машин и установок в технологических процессах при подземной добыче полезных ископаемых предусматривает необходимость решения ряда проблем, одной из которых является обеспечение качества электроэнергии. Именно поэтому повышение энергоресурса горных машин и энергоэффективности ведения горных работ требует обеспечения нормативных показателей качества электроэнергии в подземных комбинированных электрических сетях (ПКЭС). Это возможно на основе оценки уровня и состава высших гармонических составляющих напряжения и тока в силовых цепях с частотно-регулируемым электроприводом (ЧРЭП). Основными задачами являются: разработка на основе эквивалентной схемы замещения электрической сети с ЧРЭП скребкового конвейера имитационной модели для исследования спектрального состава высших гармонических составляющих напряжения и тока в силовых цепях ПКЭС; исследование и анализ влияния фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), реакторов и синус-фильтров на качество электроэнергии в системе с ЧРЭП скребкового конвейера; анализ спектрального состава высших гармонических составляющих напряжения и тока в цепях утечки через изоляцию и цепи измерителя устройства защитного отключения; разработка практических рекомендаций в области повышения качества электроэнергии в системе с ЧРЭП скребкового конвейера. Разработанная модель системы частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров позволила провести исследования эффективности средств повышения качества электроэнергии. Определен гармонический состав напряжения и тока в подземной комбинированной электрической сети в режиме максимального искажения и при наличии ФКУ, реакторов и синус-фильтров. Выбранные методы исследований позволили выявить спектральный состав напряжения и тока в симметричном и однофазном режимах утечки через изоляцию, а также в измерительных цепях устройств защитного отключения (УЗО). Установлено, что гармонический состав напряжения и тока утечки в основном определяется параметрами выходного напряжения, модулируемого автономным инвертором преобразователя частоты. Высокий уровень гармонических составляющих напряжения и тока необходимо учитывать при определении уставок УЗО, настройке компенсатора емкостного тока и блока защитного шунтирования. Для обеспечения электробезопасности необходимо научное обоснование нормативных показателей высших гармонических составляющих напряжения для цепей утечки и дальнейшее исследование физиологического воздействия высших гармоник тока на организм человека. Целесообразность установки ФКУ непосредственно на низковольтном участке питания скребкового конвейера должна быть технически обоснована. Наличие ФКУ, реакторов и синус-фильтров практически не оказывает влияния как на гармонический состав, так и на величину коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения сети относительно земли и токов утечки через изоляцию. Наличие наводимых в цепях утечки тока высших гармонических составляющих в симметричном режиме и режиме однофазной утечки тока может привести к нарушению магнитной совместимости при работе электронной измерительной схемы, блока питания и компенсатора емкостного тока утечки УЗО и представлять потенциальную опасность в случае прикосновения к токоведущим частям электрооборудования.

### Ключевые слова

подземные горные работы, подземная электрическая сеть, качество электроэнергии, электробезопасность, электропривод скребкового конвейера, фильтро-компенсирующее устройство, синус-фильтр, устройство защитного отключения, изоляция электрической сети

### Для цитирования

Petrov V. L., Pichuev A. V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):60–69. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-198>



## POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

**Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors**V. L. Petrov  , A. V. Pichuev   

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 [allexstone@mail.ru](mailto:allexstone@mail.ru)**Abstract**

The intensive implementation of variable-frequency drive machines and installations in underground mining processes necessitates addressing several issues, with a primary focus on ensuring the quality of electric power. Elevating the energy resource of mining machines and enhancing the energy efficiency of mining operations requires maintaining the rated indicators of electric power quality in mine power distribution systems. Achieving this involves assessing the level and composition of higher harmonic components in voltage and current within power circuits equipped with variable-frequency drives (VFD). Key objectives encompass the development of a simulation model based on the equivalent diagram of the power distribution system substitution with a scraper conveyor VFD to scrutinize the spectral composition of higher harmonic components in the power circuits of the mine power distribution system (MPDS). Additionally, the study involves analyzing the impact of harmonic filters (HFs), reactors, and sine filters on the quality of electric power in the VFD system of a scraper conveyor. Further analysis extends to the spectral composition of higher harmonic components in circuits related to insulation leakage and metering circuits of the residual-current device. Practical recommendations for improving electric power quality in the VFD system of a scraper conveyor are then developed based on the research findings. The established model of a variable-frequency drive system for scraper conveyors facilitates the assessment of the effectiveness of electric power quality improvement measures. The harmonic composition of voltage and current in the mine power distribution system is determined under maximum distortion conditions and in the presence of HFs, reactors, and sine filters. Research methods are chosen to unveil the spectral composition of voltage and current in symmetrical and single-phase modes of insulation leakage, as well as in metering circuits of residual-current devices (RCDs). It is noted that the harmonic composition of leakage voltage and current is primarily influenced by the parameters of the output voltage modulated by the autonomous frequency converter inverter. Considering the high level of harmonic components in voltage and current, adjustments to RCD settings, capacitive current compensator, and the protective shunting unit are recommended for electrical safety. The study emphasizes the importance of scientifically substantiating the rated indicators of higher harmonic components for leakage circuits and further exploring the physiological effects of higher current harmonics on the human body. The feasibility of installing a harmonic filter (HF) directly on the low-voltage supply section of a scraper conveyor should be technically justified. Interestingly, the presence of HFs, reactors, and sine filters does not significantly impact the harmonic composition or the magnitudes of coefficients of the harmonic components in the phase voltage of the system concerning ground and leakage currents through insulation. However, higher harmonic components induced in leakage current circuits may pose a potential hazard, leading to a violation of magnetic compatibility and posing risks in case of contact with live parts of electrical equipment.

**Keywords**

underground mining operations, mine power distribution system, electric power quality, electrical safety, scraper conveyor electric drive, filter-compensating device, sine filter, residual-current device, power distribution system insulation

**For citation**

Petrov V.L., Pichuev A.V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):60–69. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-198>

**Введение**

В настоящее время на современных шахтах интенсивно внедряется прогрессивная система асинхронного частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) мощных забойных машин, обеспечивающая регулирование скорости электродвигателей как в режиме пуска, так и непосредственно в процессе ведения

горных работ. В связи с этим в модернизированной структуре подземной электрической сети появились участки с постоянным током и током изменяющейся частоты, далее – подземные комбинированные электрические сети (ПКЭС).

К таким системам относится применение асинхронного ЧРЭП скребковых конвейеров на основе



преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения (ПЧ с АИН) и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Использование ЧРЭП скребкового конвейера с преобразователями частоты обеспечивает плавный пуск, ограничение нагрузок в тяговой цепи при ее заклинивании, выравнивание нагрузок головного и хвостового приводов, а также позволяет применить систему поддержания постоянной погонной нагрузки скребкового конвейера путем регулирования скорости движения скребковой цепи при переменном поступлении потока угля от комбайна в процессе его циклической работы [1–3]. В ПКЭС для управления электроприводом в основном применяется преобразователь частоты с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения.

В целях повышения энергоресурса горных машин и энергоэффективности ведения горных работ возникает необходимость обеспечения нормативных показателей качества электроэнергии в ПКЭС на основе оценки уровня и состава высших гармонических составляющих (ВГС) напряжения и тока в силовых цепях с ЧРЭП [4].

Научные исследования показывают, что уровень и состав ВГС в значительной степени зависят от протяженности питающей линии, мощности преобразователей частоты (ПЧ) и нагрузки асинхронных электродвигателей, наличия ПЧ на сопряженных участках и т.д. [5–8].

В участковой электрической сети напряжением до 1140 В, от которой питается электропривод скребкового конвейера, суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения  $K_U\%$  при увеличении протяженности питающей участок кабельной линии 6 кВ от 3 до 6 км и суммарной установленной мощности асинхронных электродвигателей от 1200 до 2000 кВт при отсутствии фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) увеличиваются от 8,2 до 15,8 %, что превышает нормативные значения не только непосредственно в узле нагрузки ( $K_{U\text{норм}} = 8\%$ ), но и на сопряженных участках ( $K_{U\text{норм}} = 5\%$ ). Применение ФКУ первой ступени компенсации позволяет снизить уровень ВГС напряжения до 5,14–7,6 % [9].

Одним из способов повышения качества электроэнергии является установка после преобразователя частоты синус-фильтров (СФ), позволяющих выполнить фильтрацию модулированного преобразователем частоты напряжения на зажимах электродвигателя<sup>1</sup> [10]. Однако из-за того, что данный способ на настоящее время имеет ряд ограничений как по

конструктивному исполнению, так и по сложности подбора параметров и настройки СФ, анализ его эффективности в условиях подземных электрических сетей может носить лишь теоретический характер.

Важным аспектом является исследование гармонического состава напряжения и в цепях утечки тока через изоляцию электрической сети и измерительные цепи устройств защитного отключения (УЗО). Общая тенденция развития и совершенствования защиты от токов утечки направлена на применение микропроцессорных устройств в электронных блоках питания, контроля изоляции, управления автоматической компенсации и защитного шунтирования, на обеспечение самоконтроля, диагностики исправности и телеметрии данных о состоянии защитных комплексов, что при эксплуатации в условиях ПКЭС требует решения вопроса о магнитной совместимости [11]. Научные работы, выполненные в этом направлении, показывают, что ВГС могут оказывать существенное влияние на эффективность работы УЗО и уровень безопасности электрической сети<sup>2</sup> [12, 13].

Таким образом, исследования в области оценки влияния качества электроэнергии на эффективность работы частотно-регулируемых электроприводов забойных машин в подземных электрических сетях горных предприятий являются актуальной научной проблемой.

В качестве основного в исследовании применен метод математического имитационного моделирования, который позволяет определить новые научные результаты и их практическую значимость.

### Цели и задачи

Целью исследований в данной работе является определение эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе управления ЧРЭП скребковых конвейеров в ПКЭС горных предприятий.

Основными задачами являются следующие.

1. Разработка на основе эквивалентной схемы замещения электрической сети с ЧРЭП скребкового конвейера имитационной модели для исследования спектрального состава высших гармонических составляющих напряжения и тока в силовых цепях ПКЭС.

2. Исследование и анализ влияния ФКУ, реакторов и синус-фильтров на качество электроэнергии в системе с ЧРЭП скребкового конвейера.

3. Анализ спектрального состава высших гармонических составляющих напряжения и тока в цепях утечки через изоляцию и цепи измерителя устройства защитного отключения.

4. Разработка рекомендаций в области повышения качества электроэнергии в системе с ЧРЭП скребкового конвейера.

<sup>1</sup> EPCOS. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Product Profile 2009. URL: [http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC\\_Katalog2009.pdf](http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC_Katalog2009.pdf)

Danfoss. Output Filters Design Guide. URL: [www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EA0-849044873F59/0/Output\\_Filters\\_Design\\_Guide.pdf](http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EA0-849044873F59/0/Output_Filters_Design_Guide.pdf)

LC Sine Wave Filter for Motor Drives. Output Filters FN5040/FN5045. Schaffner. URL: <http://www.schaffner.com/en/products/datasheet-low-res/product/fn-5040-fn-5045-lc-sine-wavefilter-for-motor-drives.html>

<sup>2</sup> O'shea P. Counteracting high leakage currents. URL: <https://www.powerelectronicsnews.com/counteracting-high-leakage-currents/>

### Структура имитационной модели

Структура подземной комбинированной электрической сети питания электродвигателей скребкового конвейера включает в себя силовой трансформатор ТСВП участковой подстанции с встроенным автоматическим выключателем АВДО и устройством защиты (УЗО) от токов утечки типа АЗУР, группой магнитных пускателей серии ПВИТ и взрывозащищенных преобразователей частоты, находящихся в составе энергопоезда, установленного на максимальном приближении к лаве (не ближе 50 м от сопряжения забоя и вентиляционного штрека). Длина питающего кабеля (КЛ) от преобразователя частоты до удаленных электродвигателей конвейера определяется протяженностью лавы (400–600 м).

На рис. 1 приведена эквивалентная схема замещения ПКЭС для питания скребкового конвейера.

На участке с напряжением промышленной частоты активное сопротивление изоляции сети относительно земли принято  $R_I \geq 300$  кОм/фазу, а емкость  $C_I \approx 0$ . С учетом значительной протяженности участка ПКЭС с переменной частотой активное сопротивление изоляции  $R_{IA}, R_{IB}, R_{IC}$  принято в пределах от 31,5 до 300 кОм/фазу, а емкость  $C_{IA}, C_{IB}, C_{IC}$  – от 0,01 до 1 мкФ/фазу. Цепь однофазной утечки имитировалась активным сопротивлением  $R_y = 1$  кОм (эквивалент сопротивления тела человека). Параметры УЗО, включающие фильтр присоединения к электрической сети ( $R_{FI}, L_{FI}$ ), цепь измерителя ( $R_0, R_{PN}, L_{PN}$ ) с источником оперативного выпрямленного тока  $e_+$ , а также параметрами компенсатора емкостного тока утечки (фильтр подключения  $R_0, L_g$ , компенсатор  $R_g, C_{sh}$ , шунтирующая емкость  $C_{sh}$ ) определены по характери-

кам АЗУР [14]. На скребковом конвейере в качестве приводных используются 2–4 асинхронных электродвигателя типа SG3-450L-8/4 мощностью от 110 до 400 кВт. В схеме замещения в соответствии с правилами эквивалентирования [15, 16] в модели принят электродвигатель мощностью 250 кВт, параметры которого рассчитаны в соответствии с практически рекомендациями [17]. В качестве эквивалентного мощности приводного электродвигателя принят частотный преобразователь фирмы WANTAI. Параметры дросселей  $L_{FI1}$ , фильтро-компенсирующих устройств  $L_{FCU}, C_{FCU}$  и синус-фильтров  $L_{FI2}, L_{FS}, R_{FS}$  определялись в соответствии с Практическими советами по выбору выходных фильтров<sup>3</sup>. В качестве прототипа использовался синус-фильтр PD-SIN-0,5-300.

На рис. 2 приведена имитационная модель ПКЭС с фазным напряжением  $U_F = 660$  В, оборудованной УЗО с активно-индуктивным фильтром и компенсатором емкостного тока утечки, ФКУ, реакторами и синус-фильтром, а также параметрами изоляции на участках промышленной и регулируемой частоты.

В табл. 1 приведены суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока в силовой цепи ПКЭС на участках до и после ПЧ.

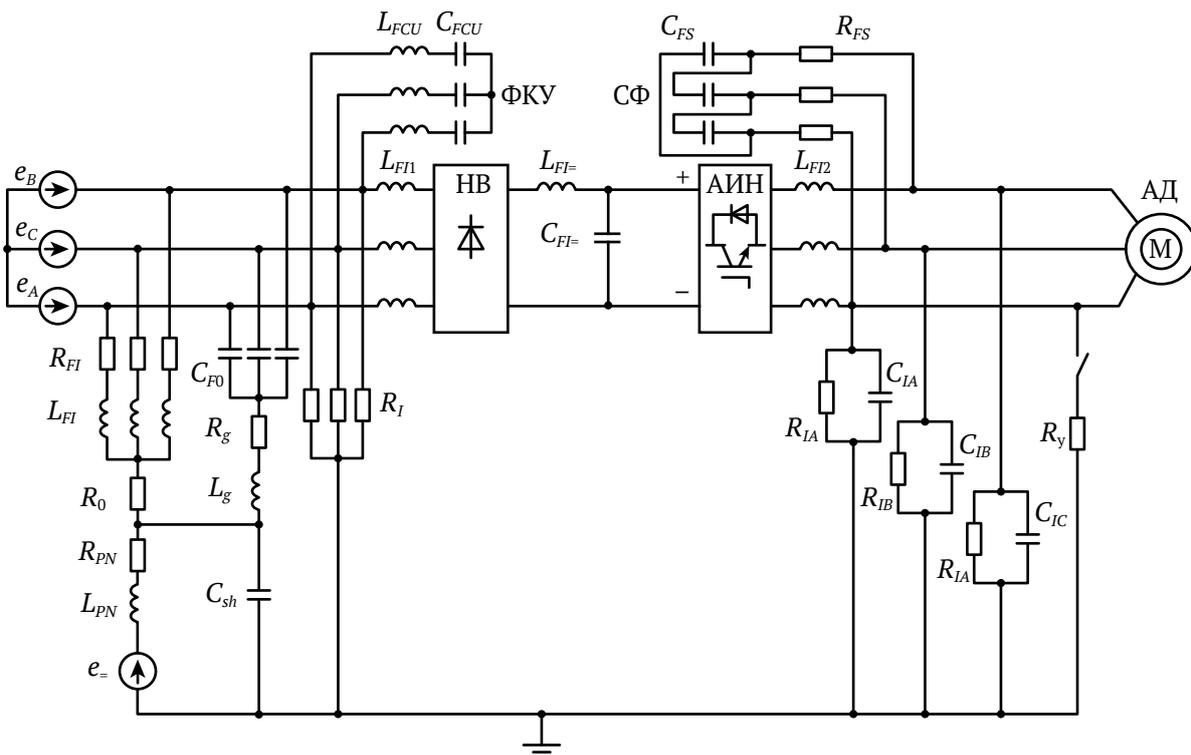


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения ПКЭС

<sup>3</sup> Практические советы по выбору выходных фильтров. URL: <https://drives.ru/stati/prakticheskie-aspekty-povyboru-vygodnyh-filtrov/>

Дроссели и синус-фильтры PROMPOWER. Технический каталог. URL: [https://prompower.ru/docs/inverter-accessories/Chokes\\_Sinewave-Filters.pdf](https://prompower.ru/docs/inverter-accessories/Chokes_Sinewave-Filters.pdf)



Таблица 1

## Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока

Структура ПКЭС	До ПЧ с АИН		После ПЧ с АИН	
	$K_U\%$	$K_I\%$	$K_U\%$	$K_I\%$
Без средств компенсации	2,81/2,77	80,45/80,89	2,81/1,35	0,29/0,28
Реакторы	2,20/2,19	64,67/65,49	1,39/1,39	0,30/0,29
Реакторы, СФ	5,68/5,67	26,25/26,26	1,77/1,77	0,25/0,26
Реакторы, ФКУ-5	1,31/1,25	21,00/19,30	1,36/1,36	0,30/0,26
Реакторы, ФКУ-5, ФКУ-7	0,51/0,31	5,63/3,46	1,35/1,35	0,29/0,28
Реакторы, ФКУ-5, ФКУ-7, СФ	0,40/0,37	1,89/1,08	1,69/1,69	0,25/0,26

Примечание. Режимы утечки тока через изоляцию (симметричный/однофазный).

Анализ спектрального состава высших гармонических составляющих напряжения и тока в силовой цепи ПКЭС показал следующее.

Уровень ВГС без учета параметров внешней электрической сети (от источника энергии до трансформатора ПУПП) не превышает допустимых значений согласно ГОСТу<sup>4</sup>. Наиболее значимыми являются 5-я и 7-я гармонические составляющие напряжения.

Использование реакторов и ФКУ на участке до преобразователя частоты, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники, позволяет снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U\%$  с 2,81 до 0,51 %. Наибольший эффект достигается за счет значительного снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока  $K_I\%$  с 80,45 до 5,63 %. При этом показатели ВГС тока и напряжения на участке после преобразователя частоты остаются практически неизменными ( $K_U\% \approx 1,36\%$ ,  $K_I\% \approx 0,3\%$ ).

Использование синус-фильтра, устанавливаемого после преобразователя частоты (при отсутствии в схеме ФКУ), приводит к увеличению  $K_U\%$  до 5,68 %. Причинами такого роста могут являться неточный подбор параметров настройки СФ и реакторов или наведение ВГС во внешнюю сеть по цепи утечки тока через изоляцию. При этом применение в качестве компенсатора только СФ позволяет снизить уровень суммарного коэффициента гармонических составляющих тока в четыре раза по сравнению с уровнем максимального искажения (при отсутствии ФКУ).

Комплексное применение реакторов, ФКУ и СФ позволяет добиться максимального уровня компенсации ВГС напряжения и тока, однако целесообразность их использования, с учетом изначально низких значений суммарного коэффициента гармонических составляющих, должна быть обоснована технической необходимостью обеспечения качества электроэнергии на участке после преобразователя частоты.

<sup>4</sup> ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 39 с.

Таблица 2

## Гармонический состав тока и напряжения в фазной изоляции

Номер гармоники	Режим утечки $I_y^{(3)}$		Режим утечки $I_y^{(1)}$	
	$K_{I(n)}\%$	$K_{U(n)}\%$	$K_{I(n)}\%$	$K_{U(n)}\%$
0	1,05	9,92	41,43	41,45
2	0,40	0,20	0,57	0,57
3	10,5	3,52	25,95	25,85
4	0,75	0,19	3,07	3,05
5	11,10	2,23	19,60	19,40
6	3,02	0,51	1,45	1,43
7	52,58	7,59	1,95	1,87
8	4,160	0,52	0,76	0,74
9	13,49	1,51	4,12	3,96
Суммарный	56,91	8,83	33,03	32,79

Еще одним из важных результатов исследования является то, что на уровень ВГС и их гармонический состав режим утечки тока через изоляцию (симметричный/однофазная утечка) практически не оказывает влияния. Это объясняется тем, что параметры силовой сети и параметры изоляции цепи утечки тока (вторичные цепи) различаются на 3–4 порядка.

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы и спектрограммы тока и напряжения в цепях утечки через изоляцию на участке ПЧ-АД при наличии в силовой сети реакторов и ФКУ, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники.

Гармонический состав тока и напряжения в фазной изоляции электрической сети на участке ПЧ-АД при включенных на участке ТР-ПЧ реакторах, ФКУ-5 и ФКУ-7 приведены в табл. 2.

Следует отметить, что на коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$ , наводимых в цепях утечки тока через изоляцию, в ветвях фильтра УЗО и компенсаторе емкостного тока утечки, действие ГОСТа<sup>5</sup> не распространяется, т.к. он относится к показателям нормы качества электрической энергии в системах электропитания общего назначения.

Анализ гармонического состава показал, что в симметричном режиме наибольшее значение имеют 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники тока и 0-я, 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники напряжения. Наибольшее искажение имеют 7-я гармоника тока, 0-я и 7-я гармоники напряжения. В режиме однофазной утечки тока через активное сопротивление  $R_y = 1$  кОм наибольшее значение имеют 0-я, 3-я, 5-я гармоники тока и 0-я, 3-я, 5-я гармоники напряжения. Наибольшее искажение имеют 0-я и 7-я гармоники тока, а также 0-я и 3-я гармоники напряжения.

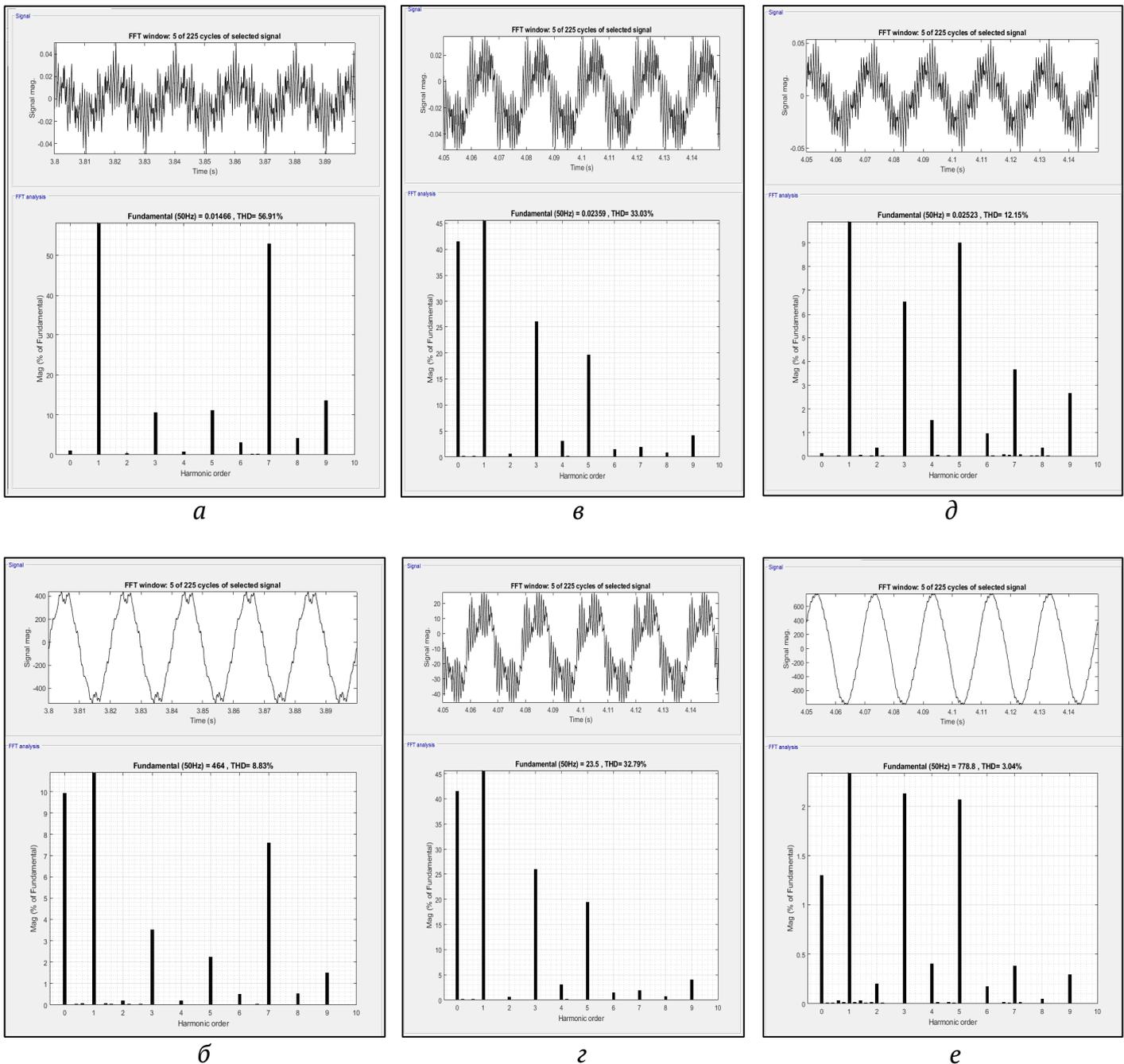
<sup>5</sup> ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 39 с.

Присутствие нулевой гармонической составляющей напряжения и тока объясняется наличием источника выпрямленного тока в цепи измерителя УЗО для реализации контроля сопротивления изоляции в симметричных режимах утечки и протеканием тока нулевой последовательности в режиме однофазной утечки, спектральный состав которого определяется модулированным сигналом напряжения на выходе преобразователя.

В результате исследования установлено, что в случае утечки тока через человека на него оказывает влияние целый спектр гармонических составляющих тока

утечки. Наиболее значимыми являются 3-я, 5-я, 6-я, 7-я и 9-я гармоники. При этом коэффициент  $K_{IH(3)}$  многократно превышает свое значение относительно первой гармоники. Такой широкий спектр может оказать негативное влияние на организм человека. Например, значительно повышается вероятность возникновения фибрилляции в случае совпадения пика гармоник тока с  $P$ - и  $T$ -периодами сердечного кардиоцикла.

На рис. 4 представлены характерные осциллограммы и спектрограммы тока и напряжения нулевой последовательности в цепях измерителя УЗО в симметричном и однофазном режимах утечки.



**Рис. 3.** Характерные осциллограммы и спектрограммы тока и напряжения в цепях утечки через изоляцию на участке ПЧ-АД при наличии в силовой сети ФКУ: симметричный режим – ток утечки (а), напряжение (б); режим однофазной утечки – ток в поврежденной фазе (в), напряжение в поврежденной фазе (г), ток в неповрежденной фазе (д), напряжение в неповрежденной фазе (е)

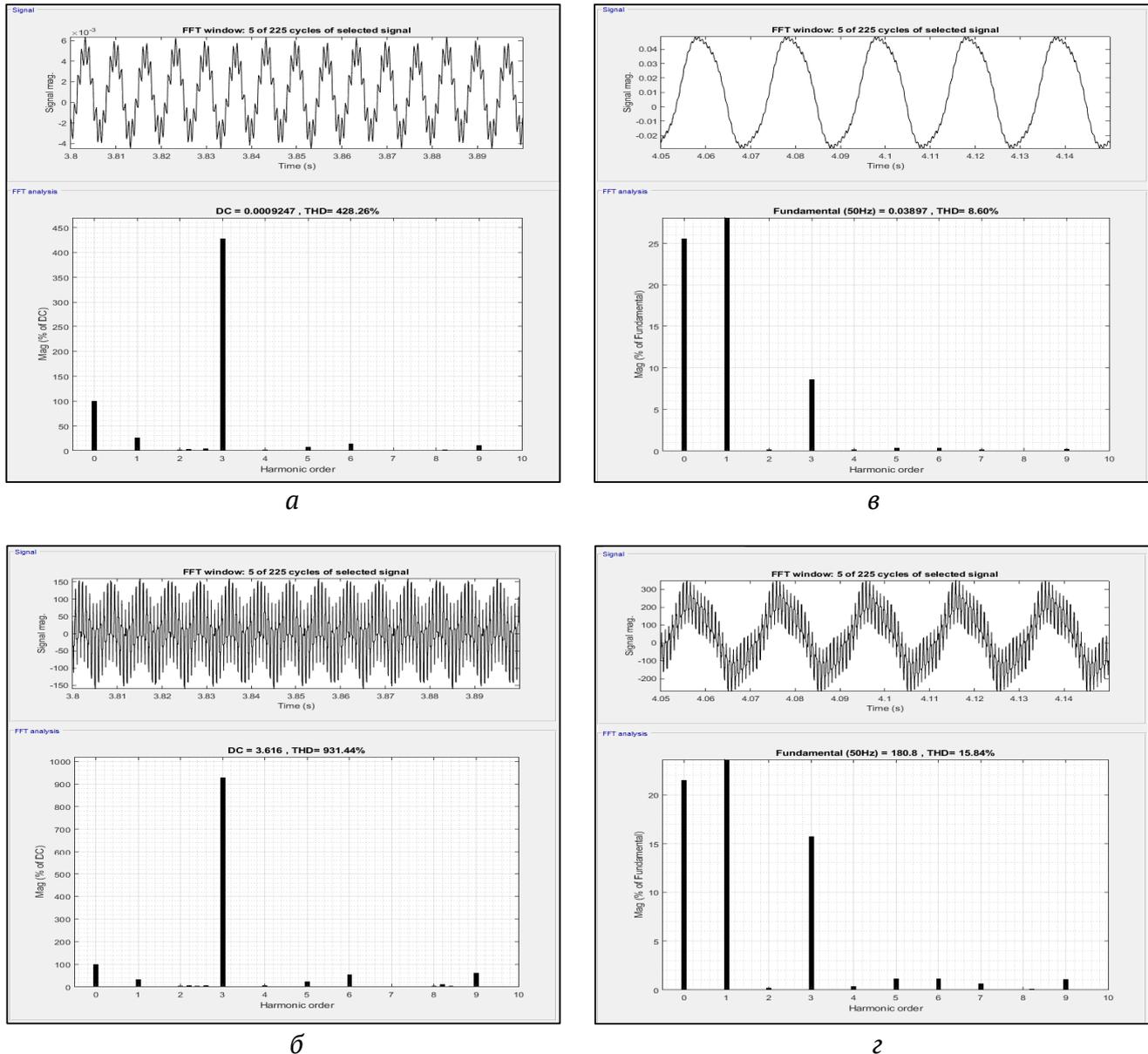


Рис. 4. Характерные осциллограммы и спектрограммы тока в цепях измерителя и напряжения нулевой последовательности: симметричный режим – ток (*a*), напряжение (*б*); режим однофазной утечки – ток (*в*), напряжение (*г*)

Анализ показал, что в рассмотренных режимах в измерительных цепях, ветвях фильтра подключения и в компенсаторе емкостного тока УЗО имеет место явно выраженная третья гармоника напряжения и тока. При этом в режиме симметричной утечки величины  $K_{U(3)}$  и  $K_{I(3)}$  постоянной составляющей третьей гармоники кратно превышают свои значения по сравнению с первой гармоникой. В режиме однофазной утечки за счет протекания в измерительной цепи УЗО тока нулевой последовательности  $K_{U(0)}$  увеличивается до 25 %,  $K_{U(3)}$  – до 16 %,  $K_{I(3)}$  – до 8,5 %. Для подавления третьей гармонической составляющей тока утечки в схеме измерительных цепей был подобран фильтр, применение которого позволило повысить работоспособность и эффективность серийно выпускаемых УЗО.

## Выводы и рекомендации

1. Применение ФКУ, реакторов и СФ положительно сказывается на качестве электроэнергии, поступающей к электродвигателю через преобразователь частоты, и может быть предложено к практической реализации при условии выполнения требований, предъявляемых к взрывозащищенному электрооборудованию шахт. Одним из ключевых условий является обеспечение температурного контроля внутри корпусов ФКУ и синус-фильтров при максимально возможном отводе тепла от токоведущих частей и изоляции.

2. Целесообразность установки ФКУ непосредственно на низковольтном участке питания скребкового конвейера должна быть технически обоснована как с точки зрения необходимости достижения высокого качества электроэнергии, так и экономического



обоснования данного мероприятия, с учетом того, что ФКУ и СФ во взрывозащищенном исполнении на класс напряжения до 1140 В не выпускаются, имеется ограничение по масса-габаритным параметрам и необходимость принудительной вентиляции конструктивных элементов аппаратов.

3. Наличие ФКУ, реакторов и синус-фильтров практически не оказывает влияния как на гармонический состав, так и на величину коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения сети относительно земли и токов утечки через изоляцию. При этом необходима дополнительная фильтрация

высших гармонических составляющих в диапазоне 1–1,5 кГц, которые используются для формирования модулированного напряжения АИН.

4. Наличие наводимых в цепях утечки тока высших гармонических составляющих в симметричном режиме и режиме однофазной утечки тока может привести к нарушению магнитной совместимости при работе электронной измерительной схемы, блока питания и компенсатора емкостного тока утечки УЗО и представлять потенциальную опасность в случае прикосновения к токоведущим частям электрооборудования.

### Список литературы / References

1. Shi J.G., Mao J., Wei X.H. Research on dynamic tension control theory for heavy scraper conveyor. *Applied Mechanics and Materials*. 2010;34–35:1956–1960. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.1956>
2. Stecula K., Brodny J., Tutak M. Informatics platform as a tool supporting research regarding the effectiveness of the mining machines' work. In: *CBU International Conference on Innovations in Science and Education*. 2017;5:1215–1219. <https://doi.org/10.12955/cbup.v5.1099>
3. Воронин В.А., Непша Ф.С., Ермаков А.Н., Кантович Л.И. Анализ режимов работы электротехнического оборудования выемочного участка современной угольной шахты. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;(4):599–607. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607>  
Voronin V.A., Nepsha F.S., Ermakov A.N., Kantovich L.I. Analysis of electrical equipment operating modes of the excavation site of a modern coal mine. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;(4):599–607. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607>
4. Ключев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А., Ляшенко В.И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>  
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Lyashenko V.I. Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):211–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>
5. Бабокин Г.И. Исследование влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии очистного комбайна. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):139–149. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-139-149>  
Babokin G.I. Influence of process flow diagram and longwall length on specific energy consumption of shearers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2):139–149. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-139-149>
6. Бойков И.Л., Шестаков В.В., Заклика М., Ульрих Н. Опыт внедрения преобразователей частоты для привода забойных конвейеров шахты Воргашорская. *Глюкауф*. 2010;(1):79–83.  
Boykov I.L., Shestakov V.V., Zaklika M., Ulrich N. Experience in introducing frequency converters to drive face conveyors of the Vorgashorskaya mine. *Gluckauf*. 2010;(1):79–83. (In Russ.)
7. Shevyrev Y.V., Pichuev A.V., Shevyreva N.Y. Improving energy performance in networks with semiconductor converters. In: *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019*. Sochi, March 25–29, 2019. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743020>
8. Feng D., Lu M., Lan J., Sun L. Research on switching operation transient electromagnetic environment of substations in a coal mine. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016;10(13):3322–3329. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0292>
9. Бабокин Г.И., Шевырëв Ю.В., Шевырева Н.Ю. Исследование качества электроэнергии очистного забоя угольной шахты. *Горный журнал*. 2021;(7):80–85. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.07.14>  
Babokin G.I., Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu. Power quality in coal longwalls. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(7):80–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.07.14>
10. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода. *Известия Томского политехнического университета*. 2014;324(4):84–94. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/5238>  
Pustovetov M.Yu. Experience in developing sine-wave filter for power circuit of VVVF-drive with induction motor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2014;324(4):84–94. (In Russ.) URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/5238>
11. Пичуев А.В., Петров В.Л. Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока через изоляцию. *Горные науки и технологии*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>



- Pichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>
12. Бабокин Г.И., Куницкий В.Г., Шеленев П.И. Защитное отключение на постоянном оперативном токе для комбинированных шахтных сетей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(S8):285–288.  
Babokin G.I., Kunitsky V.G., Shelenev P.I. Protective switching-off on a direct operating current for combined mine networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(S8):285–288. (In Russ.)
  13. Щуцкий В.И., Бабокин Г.И., Лазарев А.И. Экспериментальное исследование условий работы устройств защитного отключения в сети с преобразователем частоты. *Электробезопасность*. 1996;(3–4):31–41.  
Shchutsky V.I., Babokin G.I., Lazarev A.I. Experimental study of the operating conditions of protective shutdown devices in a network with a frequency converter. *Elektrobezopasnost'*. 1996;(3–4):31–41. (In Russ.)
  14. Пичуев А.В., Петров В.Л. Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока через изоляцию. *Горные науки и технологии*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>  
Pichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>
  15. Сыромятников И.А. *Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей*. Под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат; 1984. 240 с.  
Syromyatnikov I.A. *Operating modes of asynchronous and synchronous motors*. Mamikonyants L. G. (Ed.) 4<sup>th</sup> ed., revised and additional. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 240 p. (In Russ.)
  16. Пичуев А.В. Информационно-аналитическая система анализа надежности и безопасности эксплуатации электроустановок на горных предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(3):355–359.  
Pichuev A.V. Information and analytical system for analyzing the reliability and safety of electrical installations at mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(3):355–359. (In Russ.)
  17. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин*. М.: Высшая школа; 2001. 218 с.  
Kopylov I.P. *Mathematical modeling of electrical machines*. Moscow: Vysshaya Shkola; 2001. 218 p. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Вадим Леонидович Петров** – доктор технических наук, проректор, профессор кафедры энергетики и энергоэффективности промышленных предприятий, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.com/authorid/8919065900); e-mail [petrovv@misis.ru](mailto:petrovv@misis.ru)  
**Александр Вадимович Пичуев** – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.com/authorid/57209798580); e-mail [allexstone@mail.ru](mailto:allexstone@mail.ru)

### Information about the authors

**Vadim L. Petrov** – Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector, Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of Industrial Enterprises, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.com/authorid/8919065900); e-mail [petrovv@misis.ru](mailto:petrovv@misis.ru)

**Alexandr V. Pichuev** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of Mining Industry, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.com/authorid/57209798580); e-mail [allexstone@mail.ru](mailto:allexstone@mail.ru)

Поступила в редакцию	05.01.2024	Received	05.01.2024
Поступила после рецензирования	27.01.2024	Revised	27.01.2024
Принята к публикации	18.02.2024	Accepted	18.02.2024