

УДК 621.314.58, 622.23.05

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА РАБОТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА

Егоров Айаал Николаевич¹,
egorovan@alrosa.ru

Харитонов Яков Станиславович¹,
kharitonovyas@alrosa.ru

Шевчук Владислав Алексеевич²,
shevchukvlal@yandex.ru

Семёнов Александр Сергеевич³,
as.semenov@s-vfu.ru

¹ СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО),
Россия, 678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 6.

² АО «Научно-производственный центр «Полюс»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Кирова, 56, корп. В.

³ Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова,
Россия, 678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Тихонова, 5, корп. 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления причин выхода из строя узлов и деталей преобразователя частоты, а также конденсатора фильтрокомпенсирующего устройства в системе электропривода скиповой подъемной установки. Выход из строя этого узла при отработке алгоритма защиты приводит к наложению предохранительного тормоза на подъемную машину, обладающую достаточно большой кинетической энергией, которая в свою очередь, рассеиваясь в узлах и деталях подъемной машины, приводит к сокращению их срока службы.

Цель: определить степень влияния высших гармоник в системе электроснабжения подземного рудника на элементы преобразователя частоты системы электропривода скиповой подъемной установки и предложить методы по их снижению.

Объекты: преобразователь частоты, система электропривода подъемной установки, система электроснабжения подземного рудника, другие технологические установки и их системы электропривода, влияющие на генерацию высших гармоник.

Методы: инструментальный контроль показателей качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013; математическая обработка и анализ полученных результатов при помощи программного обеспечения MathCAD; компьютерное моделирование режимов работы системы электропривода в среде MatLab.

Результаты. Дана характеристика скиповой подъемной машины слепого скипового ствола и её системы электропривода. Проанализированы результаты обследования системы электропривода, полученные как до, так и после ввода установки в промышленную эксплуатацию. Исследованы причины выхода из строя фильтрокомпенсирующего устройства, а также проанализированы причины отказов в работе преобразователя частоты. Сделаны выводы о влиянии высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника. Предложены меры защиты электроустановок от высших гармоник и методы по их снижению.

Ключевые слова:

Высшие гармоники, преобразователь частоты, система электропривода, система электроснабжения, скиповая подъемная установка, подземный рудник.

Введение

Бурное развитие промышленной электроники, измерительной техники и информационных технологий обуславливает совершенствование технических средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий [1]. Совершенствование автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП) направлено на улучшение режимов работы технологических установок и процессов с точки зрения обеспечения требуемой производительности и качества при минимизации эксплуатационных затрат, включая максимальное снижение энергоёмкости [2, 3].

Снижение энергоёмкости технологических процессов достигается за счет регулирования процессов преобразования энергии, затрачиваемой на соверше-

ние конечной полезной работы [4, 5]. На данный момент на мощных технологических установках горнодобывающих предприятий (ГП) для повышения энергоэффективности и обеспечения оптимальных режимов работы установки наиболее широкое применение находит частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) [6, 7].

Для регулирования координат электропривода применяются преобразователи частоты (ПЧ), которые являются нелинейными устройствами, так как преобразование параметров электрической энергии в них происходит за счет коммутации полупроводниковых вентиляей [8–10].

Доля нелинейных нагрузок в электрических сетях ГП неуклонно растет ввиду непрерывного увеличения номинальной мощности ПЧ. Так, на сегодняшний

день мощность отдельных подъемных машин с ЧРП достигает 2 МВт, а номинальная мощность главной вентиляторной установки – 4 МВт при суммарной установленной мощности электроприёмников рудника порядка 30 МВт. При этом мощные единичные нелинейные нагрузки вносят значительный вклад в искажение кривых напряжения и тока системы электроснабжения (СЭС) предприятия.

Разумеется, производители ПЧ проводят работу по исследованию и совершенствованию схемотехнических решений, направленных на снижение уровней высших гармонических составляющих. Тем не менее, как показывает практика, в электрических сетях с вентильными преобразователями наблюдаются высшие гармоники напряжения и тока. При этом уровень этих гармоник и их состав зависит от вида преобразователя, от топологии силовой части, от схемотехнических решений, от параметров системы управления вентилями и др. [11].

Объект исследования

Скиповая подъемная машина слепого скипового ствола внедрена в промышленную эксплуатацию в 2017 г. Подъемная машина представляет собой однобарабанную машину компактной конструкции, которая предназначена для подземного размещения (исполнение РН, степень защиты оболочки IP 54) и используется в качестве скиповой подъемной установки. Приведение в движение установки обеспечивается одним приводным электродвигателем через редуктор. В качестве тормоза предусмотрен электрогидравлический дисковый тормозной механизм, который обеспечивает надежный останов подъемной машины. На одноконцевых подъемных машинах применяется рекуперативное торможение для обеспечения возврата энергии в сеть при спуске сосуда подъемной установки. Внешний вид такой подъемной машины показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид скиповой подъемной машины подземного рудника

Fig. 1. Appearance of an underground mine skip hoist

Для регулирования скорости движения скипа подъемной машины применяется ЧРП на базе ПЧ ProCrane X2 MPR 690V PESCe производства фирмы General Electric. В качестве коммутирующих ключей в данном преобразователе, как и во всех других современных низковольтных преобразователях, применены биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – insulated gate bipolar transistor) [12, 13]. Повсеместное применение IGBT обосновано их полной управляемостью (закрытие транзистора не требует дополнительных узлов искусственной коммутации) и значительным преимуществом по максимальной частоте коммутаций, что в купе с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет получить на выходе преобразователя напряжение близкое по форме к синусоиде [14].

На рис. 2 представлена упрощенная принципиальная электрическая схема силовой части преобразователя частоты. Силовая часть преобразователя состоит из выпрямителя – 3 и двух соединенных параллельно (для увеличения мощности) автономных инверторов напряжения – 4 и 5. Также во входную цепь преобразователя подключен дроссель – 2 и фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) – 1.

Для обеспечения обратного потока энергии в режимах рекуперации и выпрямитель, и инвертор преобразователя частоты выполнены на управляемых вентилях – IGBT. Последнее позволяет при обратном потоке энергии (от подъемной машины к двигателю) перевести инвертор в режим выпрямителя, а выпрямитель – в режим инвертора и тем самым обеспечить передачу выработанной подъемной машиной энергии в сеть [15, 16].

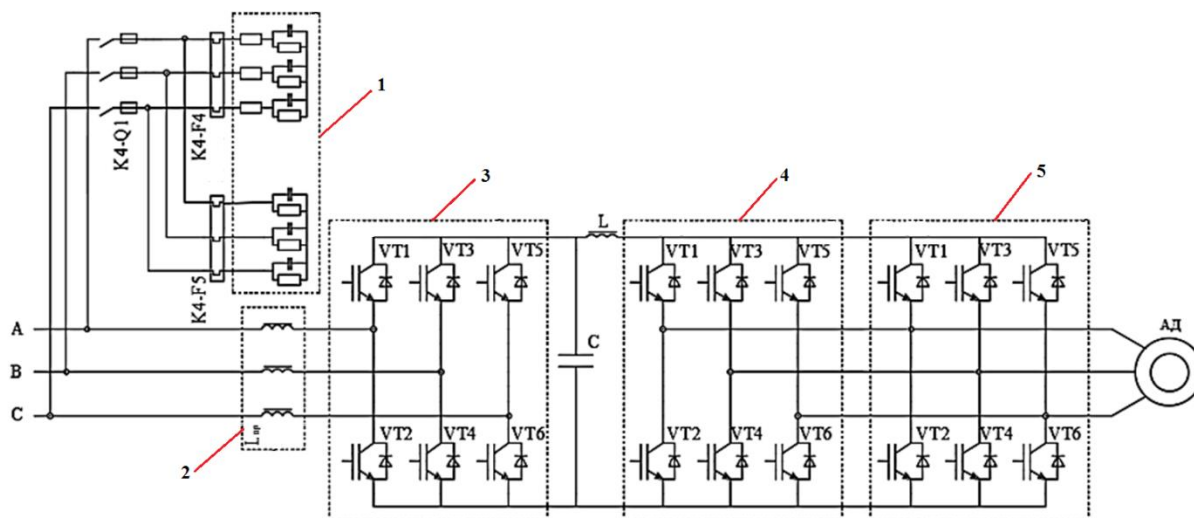


Рис 2. Упрощенная принципиальная электрическая схема силовой части преобразователя частоты: 1 – фильтро-компенсирующее устройство; 2 – дроссель; 3 – выпрямитель; 4 и 5 – автономные инверторы напряжения

Fig. 2. Simplified circuit diagram of the power section of the frequency converter: 1 – filter-compensating device; 2 – throttle; 3 – rectifier; 4 and 5 – autonomous voltage inverters

Постановка цели и задач исследования

С начала промышленной эксплуатации скиповой подъемной установки слепого скипового ствола подземного рудника были зафиксированы неоднократные выходы из строя узлов и деталей ПЧ. Из актов ремонтно-восстановительных работ следует, что первый выход из строя был зафиксирован до промышленной эксплуатации подъемной машины во время эксплуатации специализированным шахтно-строительным трестом.

29 августа 2018 г. зафиксирован первый выход из строя конденсатора ФКУ. Затем после передачи шахтной подъемной машины в промышленную эксплуатацию выход из строя данного конденсатора участился и повторялся неоднократно.

Кроме того, в ходе промышленной эксплуатации неоднократно фиксировался отказ в работе самого ПЧ. При этом система контроля и управления шахтной подъемной установкой работает в соответствии с алгоритмом, заложенным в программном обеспечении. Конечным итогом отработки алгоритма защиты является наложение предохранительного тормоза. Наложение предохранительного тормоза является аварийным режимом работы шахтной подъемной установки и часто происходит в моменты, когда установка обладает достаточно большой кинетической энергией. Торможение подъемной машины в этом случае требует рассеивания запасенной энергии на тормозных элементах и в узлах и деталях подъемной машины, что в свою очередь приводит к сокращению их срока службы.

В ходе изучения проектной и технической документации, а также соответствующей научно-практической литературы по расчету ФКУ авторами было сформулировано предположение о том, что причиной выхода из строя конденсаторов ФКУ является чрезмерное отклонение от ГОСТ 32144-2013 суммарного коэффициента гармонических составля-

ющих напряжения и коэффициентов отдельных гармонических составляющих кривой напряжения.

Также специалистами рудника было выдвинуто предположение о том, что установленная мощность системы электропривода недостаточна для обеспечения проектной мощности шахтной подъемной машины при углублении ствола до проектной отметки –955 м.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящего исследования является определение степени влияния высших гармоник в СЭС подземного рудника на элементы ПЧ скиповой подъемной установки и формулирование предложений по их снижению. Достижение поставленной цели потребует решения следующих задач: проведение инструментального контроля показателей качества электрической энергии; разработка алгоритма математической обработки и анализа полученных результатов; компьютерное моделирование режимов работы системы электропривода.

О методике инструментального контроля

Методика исследования заключается в инструментальном контроле показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [17] в течение 7 суток с 10 минутным интервалом. Исследованию и анализу подлежит суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициенты отдельных гармонических составляющих кривой напряжения. Контроль выполнялся с помощью анализатора качества электрической энергии типа С.А 8335 (Qualistar+). Величины допустимых отклонений вышеуказанных параметров приведены в табл. 1.

Анализатор С.А 8335 (Qualistar+) производится фирмой Chauvin Arnoux (Франция) и работает в соответствии со стандартом IEC 61010, класс S. Анализатор утвержден в качестве средства измерения в реестре федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ за номером 62232-15 до

16.11.2020. К анализаторам ПКЭ применяются требования в погрешностях к точности измерений. Для исследуемых ПКЭ эти величины равны: суммарный коэффициент гармонических составляющих напря-

жения $\pm 0,05$ % (абс.), $\pm 5,0$ % (отн.); коэффициенты нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратные трем $\pm 0,15$ % (абс.), $\pm 5,0$ % (отн.). Анализатор полностью соответствует этим параметрам.

Таблица 1. Максимально допустимые отклонения исследуемых показателей качества электроэнергии

Table 1. Maximum allowable deviations of the studied indicators of the quality of electricity

Показатель Indicator	Напряжение электрической сети, кВ Electric network voltage, kV				
	0,38		6–25		
	Максимально допустимое отклонение в течение времени измерений с усреднением в интервале 10 мин Maximum permissible deviation during the measurement time with averaging in the interval of 10 min				
	95 %	100 %	95 %	100 %	
Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, K_U , % Value of the total coefficient of harmonic voltage components, K_U , %	8,0	12,0	5,0	8,0	
Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем, $K_{U(n)}$, % Values of the coefficients of the odd harmonic components of the voltage, not a multiple of three, $K_{U(n)}$, %					
гармоническая составляющая harmonic component	5	6,0	9,0	4,0	6,0
	7	5,0	7,5	3,0	4,5
	11	3,5	5,25	2,0	3,0
	13	3,0	4,5	2,0	3,0
	17	2,0	3,0	1,5	2,25
	19	1,5	2,25	1,0	1,5
	23	1,5	2,25	1,0	1,5
	25	1,5	2,25	1,0	1,5
>25	1,5	2,25	1,0	1,5	

Результаты исследования

В ходе исследования авторы решили в первую очередь подтвердить или опровергнуть предположение персонала рудника о том, что система электропривода подобрана некорректно и работает в режиме перегрузок и преобразователь частоты выходит из строя по защите от перегруза. Для этого в табл. 2 представлены технические характеристики оборудования скиповой подъемной установки.

Из табл. 2 видно, что продолжительный ток перегрузки, выдерживаемый обмотками двигателя в течение 30 секунд, составляет 850 А, а преобразователя частоты – 820 А. С целью определения фактически потребляемой мощности и значений токов на входе силового канала системы электропривода, а также выявления причины отказов в работе преобразователя проводились измерения параметров потребляемой электрической энергии при интенсивной работе подъемной машины.

За смену (29.01.2019 г.) произошло семь отказов в работе шахтной подъемной машины, из них две ошибки по комплексу загрузки скипа и пять по преобразователю частоты. Максимальное пиковое значение потребляемой системой электропривода активной мощности за время измерений составило 861100 Вт. Как раз в этот момент пришелся один из отказов в работе шахтной подъемной машины. На рис. 3 приведены графики изменения потребляемой активной мощности (а) и фазных токов (б). На графиках показаны максимальные значения измеренных параметров на интервале наблюдения. Из графиков видно, что максимальные значения токов не превышают значения токов перегрузки преобразователя частоты и электродвигателя, указанные в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики оборудования скиповой подъемной установки

Table 2. Skip hoist equipment technical specifications

Наименование параметра Parameter name	Значение параметра Parameter value
Основные параметры скиповой подъемной машины Basic parameters of a skip hoist	
Тип скипа/Skip type	CH4
Масса скипа, кг/Weight of skip, kg	5400
Грузоподъемность, кг/Load capacity, kg	6000
Масса погонного метра каната, кг Mass running meter of rope, kg	4,7
Скорость подъема, м/с/Lifting speed, m/s	5
Основные параметры электродвигателя Basic parameters of the electric motor	
Тип двигателя/Engine type	DSf 500 M 154-6
Номинальная мощность двигателя, кВт Engine rated power, kW	677
Линейное напряжение, В/Line voltage, V	690
Номинальный ток, А/Rated current, A	675
Ток перегрузки, А/Overload current, A	850
Номинальная частота вращения ротора, об/мин Nominal rotor speed, rpm	747
Коэффициент мощности/Power factor	0,87
Коэффициент полезного действия, % Engine efficiency, %	97,5
Основные параметры преобразователя частоты Basic parameters of the frequency converter	
Тип преобразователя Type of frequency converter	ProCrane X2 MPR 690 PECe
Номинальное входное линейное напряжение, В Rated input line voltage, V	690
Входная частота, Гц/Input frequency, Hz	47–63
Продолжительный ток перегрузки (30 с), А Continuous overload current (30 s), A	820
Максимальный ток (10 с), А Maximum current (10 s), A	1140
Выходная частота, Гц/Output frequency, Hz	0–300

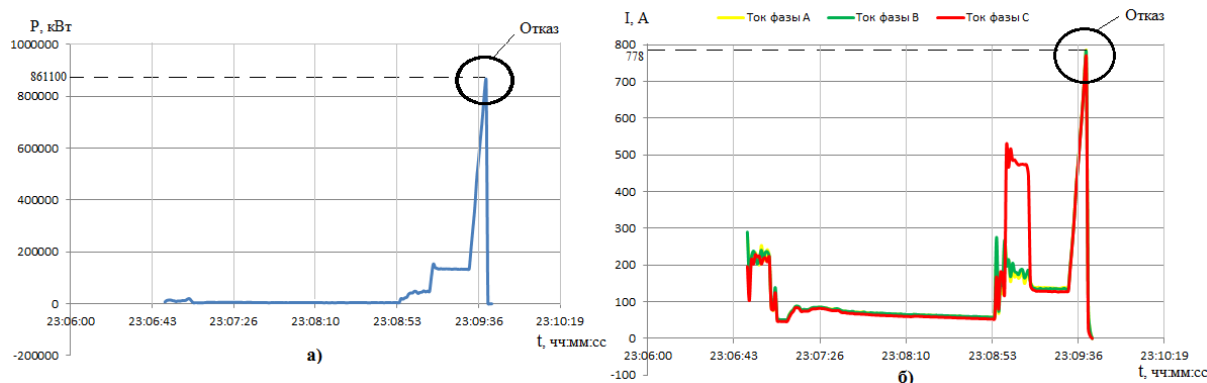


Рис. 3. График изменения величины в момент возникновения отказа в работе шахтной подъемной машины: а) потребляемой активной мощности; б) фазных токов

Fig. 3. Graph of the value change at failure moment of the mine hoist of: a) consumed active power; b) phase currents

Таким образом, было сделано заключение, что режим критических перегрузок в работе ПЧ отсутствует и, следовательно, система электропривода выбрана корректно.

В то же время при наблюдении за работой ПЧ при интенсивной работе шахтной подъемной машины установлено, что отказ преобразователя происходит по ошибке «DC Link overvoltage», которая в журнале ошибок и предупреждений преобразователя отмечена жирным шрифтом как первичная. При этом контроль соответствующих переменных в подсистемах управления выпрямителем и инверторами показывает, что напряжение звена постоянного тока, действительно, превышает значение установленного предела 1175 В. Превышение происходит в конце разгона шахтной подъемной машины, как при подъеме, так и при её опускании. При этом увеличение напряжения звена постоянного тока в указанной точке происходит не всегда. Причинами превышения установленного предела напряжения могут быть: влияние некорректно подобранного входного ФКУ; изменение характеристик конденсаторов (внутреннее сопротивление, емкость) звена постоянного тока под действием нагрузки или температуры; изменение характеристик электродвигателя при увеличении температуры его обмоток; возможное изменение соотношения «напряжение со стороны питающей сети – ЭДС электродвигателя». Инженерами завода-изготовителя ПЧ производилась перенастройка параметров регулятора скорости с целью обеспечения плавного перехода из кривой разгона на заданную скорость. Эти мероприятия не дали результата.

Перейдем к обсуждению основной проблемы – выход из строя конденсаторов ФКУ.

С целью определения причин выхода из строя конденсаторов ФКУ проводились исследования ПКЭ СЭС рудника. В ходе этих исследований в качестве основной причины выхода из строя конденсаторов авторами было предположено значительное снижение срока службы конденсаторов под влиянием высших гармонических составляющих в питающей сети.

При расчете параметров ФКУ для ПЧ было принято условие соответствия качества электрической энергии требованиям ГОСТ 32144-2013. Последнее

обуславливает расчет параметров фильтра из условия минимизации влияний на качество электроэнергии питающей сети преобразователя, для которого ведется расчет фильтра. В данном конкретном случае завод-изготовителем были приняты трехфазные конденсаторы типа МКР (с металлизированной полипропиленовой пленкой), хорошо зарекомендовавшие себя в работе на околопромышленных частотах.

Дополнительная мощность гармонических составляющих, генерируемых другими нелинейными потребителями рудника, приводит к чрезмерному нагреву конденсаторов фильтрокомпенсирующего устройства, что обуславливает постепенную деградацию диэлектрика и в конечном счете выход из строя конденсатора. Сопротивление конденсаторов для высших гармоник высокой частоты несоизмеримо мало по сравнению с сопротивлением других потребителей системы электроснабжения, рассчитанных на промышленную частоту. Так, например, для семнадцатой и девятнадцатой гармоники сопротивления конденсатора рассчитываются следующим образом:

$$X_{c17} = \frac{1}{2\pi 17 f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 17 \cdot 50 \cdot 166 \cdot 10^{-6}} = 1,13 \text{ Ом},$$

$$X_{c19} = \frac{1}{2\pi 19 f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 19 \cdot 50 \cdot 166 \cdot 10^{-6}} = 1,01 \text{ Ом},$$

где $f=50$ Гц – частота питающей сети; $C=166$ мкФ – емкость конденсатора ФКУ.

Высшие гармоники в сетях электроснабжения рудника могут генерироваться преобразователями подъемных машин и вентиляторов главного проветривания. В нашем случае система электропривода вентиляторов главного проветривания рудника представлена асинхронным двигателем и преобразователем частоты Power Flex 7000 с 18-пульсным выпрямителем, а подъемные машины приводятся в движение двигателем постоянного тока с тиристорным выпрямителем фирмы АВВ типа DCS600, в котором применена 6-пульсная схема выпрямления. При этом на руднике предусмотрено распределение нелинейных нагрузок. Так, например, при работе вентилятора главного проветривания № 1 подъемные машины скипового ствола переводятся на питание от второй

секции шин, так как вентилятор главного проветривания № 1 запитан от первой секции. При переходе с вентилятора № 1 на вентилятор № 2 подъемные машины скипового ствола переводятся на питание от первой секции шин.

Подъемная машина слепого скипового ствола установлена в подземном комплексе рудника, и её электроснабжение осуществляется от первого ввода. Учитывая, что на руднике раз в месяц проводится переход с вентилятора № 1 на вентилятор № 2 и наоборот, состав и уровень высших гармоник на ПЧ подъемной установки слепого скипового ствола меняется ежемесячно. Поэтому измерения ПКЭ проводились при различных сочетаниях нелинейных нагрузок на первом вводе.

На рис. 4 приведен фрагмент упрощенной схемы СЭС центральной распределительной подстанции (ЦРП) № 1 рудника. Контроль выполнялся одновременно в трех точках. Первая точка измерений нахо-

дилась на ячейке № 9 первой секции шин ЦРП № 1. Вторая точка измерений находилась на ячейке № 2 первой секции шин РПП-3. Третья точка измерения находилась непосредственно на входе ПЧ.

Обработка и анализ измеренных данных при работе скиповой подъемной машины совместно с вентилятором главного проветривания показали, что во всех трех точках наблюдается превышение коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 и 19 порядков. Остальные показатели качества электрической энергии соответствуют требованиям ГОСТ 32144-2013. Математическая обработка результатов измерений по выборкам n -ой гармонической составляющей проводилась с использованием программы MathCAD. Численные характеристики параметров, такие как размерность выборки, среднее значение выборки, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и др., рассчитывались по известным выражениям [18].

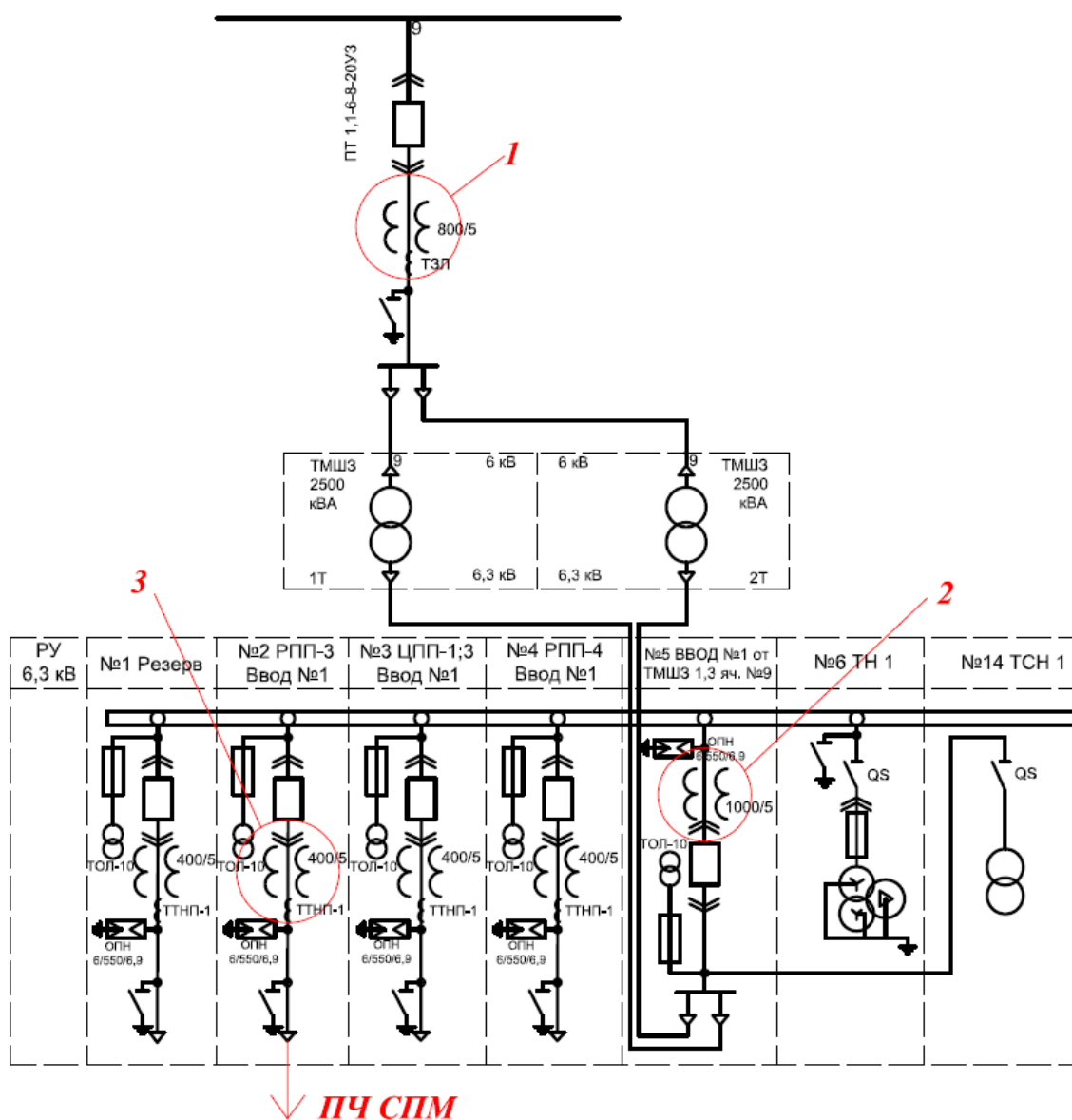


Рис. 4. Фрагмент схемы электроснабжения рудника
 Fig. 4. Fragment of the power supply scheme of the mine

Расчет коэффициента n -ой гармонической составляющей межфазных напряжений проводился по формуле:

$$k_{U(n)} = \frac{U(n)}{U(1)} \cdot 100 \%,$$

где $U(n)$ – действующее значение n -ой гармонической составляющей напряжения; $U(1)$ – действующее значение напряжения основной частоты.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения определяется по выражению:

$$k_{(U)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N k_{(n)}^2}}{k_{U(1)}} \cdot 100 \%,$$

где n – порядок гармонической составляющей напряжения; N – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих напряжений.

Для проверки корректности рассчитанных параметров авторами разработана компьютерная модель системы электропривода подъемной установки в пакете программ MatLab/Simulink/SimPowerSystems. При помощи интерактивного обозревателя Powergui FFT Analysis Tool исследованы отдельные коэффициенты нелинейных гармонических составляющих и суммарный коэффициент. Получено подтверждение

превышения ТНД, а также 17 и 19 гармоник, которые коррелируются с рассчитанными параметрами с погрешностью менее 10 %. Компьютерному моделированию системы электропривода подъемной установки будет посвящено отдельное исследование. Подробная информация о разработке компьютерных моделей систем ЭП технологических установок горных предприятий представлена в [19].

На рис. 5 приведены суточные графики изменения коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 и 19 порядков. По мнению авторов, именно эти гармоники являются причиной выхода из строя конденсаторов ФКУ, поскольку сопротивление конденсатора для этих гармоник в 17 и 19 раз соответственно ниже по сравнению с сопротивлением для частоты первой гармоники при той же ёмкости.

Обработка и анализ измеренных данных при работе скиповой подъемной машины слепого скипового ствола отдельно от вентилятора главного проветривания, но совместно с другими подъемными машинами рудника показал, что во всех трех точках все показатели качества электрической энергии соответствуют требованиям ГОСТ 32144-2013. Это подтверждается суточными графиками изменений коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 и 19 порядков, приведенных на рис. 6.

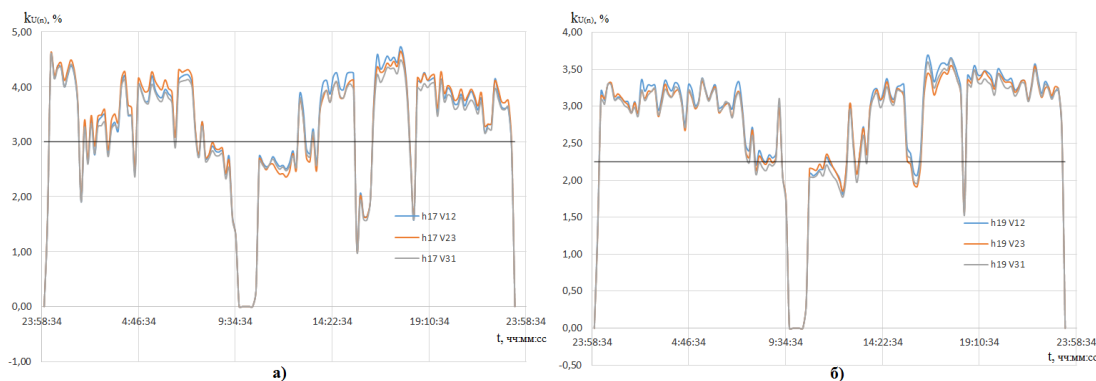


Рис. 5. Графики коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 (а) и 19 (б) порядков на входе преобразователя частоты

Fig. 5. Graphs of the coefficients of nonlinear harmonic distortion of 17 (a) and 19 (b) orders at the input of the frequency converter

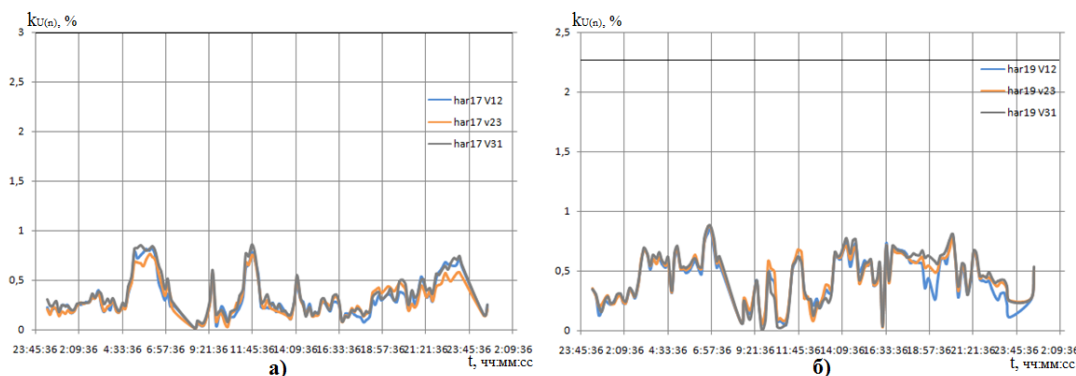


Рис. 6. Графики коэффициентов нелинейных гармонических искажений 17 (а) и 19 (б) порядков на входе преобразователя частоты при работе отдельно от вентилятора

Fig. 6. Graphs of the harmonic distortion coefficients of 17 (a) and 19 (b) orders at the input of the frequency converter when operating separately from the fan unit

Следует отметить, что при работе скиповой подъемной машины слепого скипового ствола отдельно от вентилятора главного проветривания зафиксировано значительное снижение отказов в работе ПЧ. Учитывая, что при снижении гармонических составляющих в сети электроснабжения отказы ПЧ сокращаются, можно предположить, что косвенной причиной отказов преобразователя является изменение свойств конденсатора ФКУ под действием высших гармоник. Иными словами, перенапряжение в звене постоянного тока преобразователя частоты является следствием некорректной работы конденсаторов ФКУ. Таким образом, предположение авторов было полностью подтверждено. Очевидно, высшие гармонические составляющие в сетях электроснабжения рудника влияют на работу ПЧ скиповой подъемной машины, а именно, приводят к постепенной деградации конденсаторов ФКУ ПЧ и в конечном счете к выходу из строя конденсаторов. При этом постепенное изменение параметров конденсатора влияет на интенсивность отказов в работе преобразователя.

Для компенсации высших гармонических составляющих на секции шин ЦРП 6 кВ в системе электроснабжения подземного рудника авторами предложен вариант внедрения активных фильтров (АФ) высших гармоник и проведен расчет эффективности этого метода. АФ содержит полупроводниковые ключевые элементы и работает по принципу генератора «антигармонику».

Значение сопротивления АФ для компенсации n -ой гармоники будет определяться по формуле:

$$x_{(n)} = x_{L(n)} - x_{C(n)} = n\omega L_{(n)} - \frac{1}{n\omega(C_1^{(n)} + C_2^{(n)})},$$

где n – порядок гармонической составляющей напряжения.

Эквивалентное сопротивление между секцией шин 6 кВ и системой на n -й гармонике с учетом параллельной ветви АФ будет равно:

$$x_{\text{ЭКВ}(n)} = \frac{(x_{\text{СИСТ}} + x_{\text{В}} + x_{\text{Н}} + x_{\text{Р}})nx_{(n)}}{(x_{\text{СИСТ}} + x_{\text{В}} + x_{\text{Н}} + x_{\text{Р}})n + x_{(n)}},$$

где $x_{\text{СИСТ,В,Н,Р}}$ – сопротивление системы, коммутационного аппарата, нагрузки и токоограничивающего реактора соответственно.

Модуль напряжения n -й гармоники будет определяться по формуле:

$$U_{(n)} = I_{(n)} \frac{\sqrt{(R_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2 + (X_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2}}{\sqrt{(R_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2 + (x_{\text{ЭКВ}(n)} + X_{\text{НГ}(n)}^{\text{ЭКВ}})^2}} x_{\text{ЭКВ}(n)},$$

где $I_{(n)}=I_1/n$, I_1 – действующее значение тока основной частоты; n – порядок гармоники тока; $R_{\text{НГ}}^{\text{ЭКВ}}$ и $X_{\text{НГ}}^{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление линейной и нелинейной нагрузок соответственно.

Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения на шине 6 кВ будет равен:

$$k_{U(n)} = \frac{\sqrt{3}U_{(n)}}{U_{\text{НОМ}}},$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение на секции шин.

Результаты расчета для 17 и 19 гармоник представим в табл. 3.

Таблица 3. Расчет коэффициентов n -й гармонической составляющей напряжения на шинах 6 кВ после установки активных фильтров

Table 3. Calculation of the coefficients of the n^{th} harmonic component of the voltage on the 6 kV buses after installing active filters

Расчетный параметр Design parameter	Номер гармоники Harmonic number		
	17	19	
Тип преобразователя частоты Type of frequency converter	6-пульсный+ 18-пульсный 6-pulse+18-pulse		
Суммарная мощность искажающей нагрузки, кВА Total power of the distorting load, kVA	4033,6		
Действующее значение тока высшей гармоники, А Effective value of the current of the highest harmonic, A	21,74	19,46	
Эквивалентное сопротивление линейной нагрузки, Ом Equivalent resistance of linear load, Ohm	72,3	76,4	
Эквивалентное сопротивление нелинейной нагрузки, Ом Equivalent resistance of non-linear load, Ohm	417,2	466,3	
Эквивалентное сопротивление между секцией шин и системой на n -ой гармонике, Ом Equivalent resistance between the bus section and the system at the n^{th} harmonic, Ohm	1,190	1,515	
Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, % Coefficient of the n^{th} harmonic component of the voltage, %	0,71	0,81	
Нормативные значения коэффициентов n -ой гармонической составляющей напряжения, % Standard values of the coefficients of the n^{th} harmonic component of the voltage, %	95 %	1,5	1,0
	100 %	2,25	1,5

Рассчитываем суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, который будет равен $k_{(U)}=1,64$ %. Таким образом, расчеты подтверждают, что в случае установки АФ произойдет значительное снижение высших гармоник на секции шин ЦРП № 1 6 кВ, вследствие этого снижается и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения [20].

Заключение

Авторами проведено исследование влияния высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника, а именно: сформулированы возможные причины выхода из строя конденсатора фильтрокомпенсирующего устройства преобразователя; проведен инструментальный контроль показателей качества электроэнергии, выявивший проблемы с высшими гармониками; применена методика математической обработки и анализа измеренных результатов; для подтверждения корректности рассчитанных параметров разработана компьютерная

модель системы электропривода подъемной установки; проведен расчет установки активных фильтров в систему электроснабжения рудника для снижения влияния высших гармоник на работу преобразователя частоты.

В результате расчетов возможной установки активных фильтров на секцию шин центральной распределительной подстанции 6 кВ получено фактическое снижение уровней коэффициентов n -й гармони-

ческой составляющей напряжения, вследствие чего снизился и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения до нормативного значения в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Были даны рекомендации энергослужбам предприятия по установке таких фильтров на 17 и 19 гармоники.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-50104 мол_нр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lodha K., Bhawalkar M.P. Robust control of DC drive using sliding mode control // 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA). – Pune, India, 30 October–1 November, 2015. – P. 645–649. DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503429
2. Sharygin G.S., Sharygina L.I. Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century // 2015 ICONTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). – Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307319
3. Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty / V. Luchinin, A. Afanasjev, V. Ilyin, A. Koriyakov, A. Petrov // 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). – St. Petersburg, Russia, 4–8 July, 2017. – P. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089
4. Панихидников С.А., Новоселов С.В., Куликович А.В. Оценка и оптимизация энергетических затрат труда машинистов горно-выемочных машин очистных забоев – составная часть безопасности жизнедеятельности на шахтах России // Уголь. – 2018. – № 11 (1112). – С. 64–69. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-64-69
5. Energy saving in mining production / V.I. Golik, V.I. Komashchenko, V.S. Morkun, N.V. Morkun, S.M. Hryshchenko // Science and Innovation. – 2018. – V. 14. – № 3. – P. 29–39. DOI: 10.15407/scine14.03.029
6. Электропривод вентиляторов шахтных установок / Б.И. Абрамов, Л.Х. Дацковский, И.К. Кузьмин, Ю.В. Шевырëв // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 67–74.
7. Змиева К.А. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 2–9.
8. Костыгов А.М., Кычкин А.В., Артемов С.А. Автоматизированная система удаленного энергомониторинга подвижных объектов с электроприводом // Электротехника. – 2015. – № 11. – С. 48–50.
9. Усовершенствованный электропривод шахтных установок с возможностью рекуперации электроэнергии / Э.Е. Пугачëва, В.М. Степанов, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов, А.А. Букарев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 6. – С. 412–418.
10. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Энергоэффективный резонансный режим электромеханических систем органов резания горных машин на базе современных структур управления // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 4 (122). – С. 41–45.
11. Исаева Т.М. О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции // Главный энергетик. – 2016. – № 11. – С. 32–35.
12. Iwahashi Y., Mizuno Y., Hara M., Tagami R., Ishigaki M. Analysis of current distribution on IGBT under unclamped inductive switching conditions // Microelectronics Reliability. – 2012. – V. 52. – № 9–10. – P. 2430–2433. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.06.075
13. Comparative study of MOSFET and IGBT for high repetitive pulsed power modulators / S.-R. Jang, H.-J. Ryoo, G. Goussev, G.H. Rim // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2012. – V. 40. – № 10–1. – P. 2561–2568. DOI: 10.1109/TPS.2012.2186592
14. Кодкин В.Л., Аникин А.С., Мальчер М.А. Проблемы внедрения частотного регулирования в горно-добывающей отрасли // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 37 (296). – С. 45–49.
15. Assessment of the energy efficient of the modernized main fan unit of the underground mine / A.N. Egorov, A.S. Semenov, Yu.V. Bebikhov, A.A. Sigaenko // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2019. – V. 20. – № 2. – P. 153–165. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026505
16. Анализ эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в условиях алмазодобывающих предприятий / А.Н. Егоров, А.С. Семенов, Я.С. Харитонов, О.В. Федоров // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 77–82. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.16
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
18. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Н.М. Кузнецов, А.С. Семëнов. – М.: Изд-во «Перо», 2013. – 142 с.
19. Semenov A.S., Egorov A.N., Khubieva V.M. Assessment of energy efficiency of electric drives of technological units at mining enterprises by mathematical modeling method // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russia, 25–29 March, 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743025
20. Abramovich B.N., Sychev Y.A., Zimin R.Y. 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). – Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638

Поступила 27.08.2019 г.

Информация об авторах

Егоров А.Н., начальник управления связи СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО).

Харитонов Я.С., начальник участка силовой преобразовательной техники СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО).

Шевчук В.А., кандидат технических наук, инженер-конструктор, АО «Научно-производственный центр «Полнос».

Семëнов А.С., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

UDC 621.314.58, 622.23.05

INFLUENCE OF HIGH HARMONICS ON A FREQUENCY CONVERTER OPERATION IN UNDERGROUND MINING

Ayaal N. Egorov¹,
egorovan@alrosa.ru

Yakov S. Kharitonov¹,
kharitonovyas@alrosa.ru

Vladislav A. Shevchuk²,
shevchukvlal@yandex.ru

Alexander S. Semenov³,
as.semenov@s-vfu.ru

¹ PJSC ALROSA,
6, Lenin street, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678170, Russia.

² JSC Research and Production Center Polyus,
56-B, Kirov avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny,
5/1, Tikhonov street, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678170, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to identify the reasons of failure of the nodes and parts of the frequency converter, as well as the capacitor of the filter compensating device in the electric drive system of the skip hoist. The failure of this unit during the development of the protection algorithm leads to application of a safety brake to the lifting machine, which has a sufficiently large kinetic energy, which, in its turn, dissipates in the components and parts of the lifting machine, leading to a reduction in their service life.

The aim of the research is to determine the degree of influence of higher harmonics in the power supply system of an underground mine on the elements of the frequency converter of the electric drive system of a skip hoist installation and propose methods to reduce them.

Objects: frequency converter, electric drive system of a lifting installation, power supply system of an underground mine, other technological installations and their electric drive systems that affect the generation of higher harmonics.

Methods: instrumental control of electric energy quality indicators in accordance with the requirements of GOST 32144-2013; mathematical processing and analysis of the results using the MathCAD software; computer simulation of the operation modes of the electric drive system in the MatLab environment.

Results. The authors have given the characteristic of a skip hoist machine for a blind skip shaft and its electric drive system and analyzed the results of inspection of the electric drive system obtained both before and after putting the unit into commercial operation. The reasons for the failure of the filter compensating device are investigated, and the causes of failures in the operation of the frequency converter are analyzed. The authors drew the conclusions on the effect of higher harmonics on a frequency converter operation in an underground mine and proposed the measures to protect electrical equipment from higher harmonics and methods for their reduction.

Key words:

Higher harmonics, frequency converter, electric drive system, power supply system, skip hoist installation, underground mine.

The reported study was funded by RFBR according to the research project no. 19-38-50104.

REFERENCES

- Lodha K., Bhawalkar M.P. Robust control of DC drive using sliding mode control. *2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA)*. Pune, India, 30 October–1 November, 2015. pp. 645–649. DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503429
- Sharygin G.S., Sharygina L.I. Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*. Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. pp. 1–4. DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307319
- Luchinin V., Afanasjev A., Ilyin V., Korlyakov A., Petrov A. Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty. *2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo)*. St. Petersburg, Russia, 4–8 July, 2017. pp. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089
- Panihidnikov S.A., Novoselov S.V., Kulinkovich A.V. Assessment and optimization of energy costs of the work of drivers of mining and extraction machines of coal mine face treatment – an integral part of the safety of life in the treatment areas of Coal Mines in Russia. *Ugol*, 2018, no. 11, pp. 64–69. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-64-69. In Rus.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M. Energy saving in mining production. *Science and Innovation*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 29–39. DOI: 10.15407/scine14.03.029
- Abramov B.I., Datskovskii L.K., Kuz'min I.K., Shevryev Y.V. Electric drives of mining installations. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 3, pp. 159–165. DOI: 10.3103/S1068371217030026
- Zmieva K.A. Modeling of an industrial enterprise power supply system using direct current. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 5, pp. 239–245. DOI: 10.3103/S1068371215050120
- Kostygov A.M., Kychkin A.V., Artemov S.A. An automated system for remote energy monitoring of mobile objects with

- electric drives. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 11, pp. 667–669. DOI: 10.3103/S1068371215110073
9. Pugacheva E.E., Stepanov V.M., Ivanov A.S. Improved electric drive of mine installations with the possibility of recovery electricity. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2018, no. 6, pp. 412–418. In Rus.
 10. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Energy-efficient resonant mode of electromechanical systems of bodies cutting mining machines based on modern governance structures. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2016, vol. 122, no. 4, pp. 41–45. In Rus.
 11. Isaeva T.M. Results of researching high harmonics at high voltage substation. *Chief Power Engineer*, 2016, no. 11, pp. 32–35. In Rus.
 12. Iwahashi Y., Mizuno Y., Hara M., Tagami R., Ishigaki M. Analysis of current distribution on IGBT under unclamped inductive switching conditions. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, no. 9–10, pp. 2430–2433. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.06.075
 13. Jang S.-R., Ryoo H.-J., Goussev G., Rim G.H. Comparative study of MOSFET and IGBT for high repetitive pulsed power modulators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, vol. 40, no. 10–1, pp. 2561–2568. DOI: 10.1109/TPS.2012.2186592
 14. Kodkin V.L., Anikin A.S., Malcher M.A. Problems of introduction of frequency control in the mining industry. *Bulletin of South Ural State University. Series Power Engineering*, 2012, no. 37 (296), pp. 45–49. In Rus.
 15. Egorov A.N., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Sigaenko A.A. Assessment of the energy efficient of the modernized main fan unit of the underground mine. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 153–165. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026505
 16. Egorov A.N., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S., Fedorov O.V. Efficiency of variable frequency drive in diamond mining. *Gornyi Zhurnal*, 2019, no. 2, pp. 77–82. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.16. In Rus.
 17. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestnost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electrical energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
 18. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Kuznetsov N.M., Semenov A.S. *Monitoring pokazateley kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya gornykh predpriyatiy* [Monitoring of indicators of the quality of electric energy in the power supply systems of mining enterprises]. Moscow, Pero Publ., 2013. 142 p.
 19. Semenov A.S., Egorov A.N., Khubieva V.M. Assessment of energy efficiency of electric drives of technological units at mining enterprises by mathematical modeling method. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia, 25–29 March, 2019. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743025
 20. Abramovich B.N., Sychev Y.A., Zimin R.Y. 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)*. Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018. pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638.

Received: 27 August 2019.

Information about the authors

Ayaal N. Egorov, head of communication department, ST Almazavtomatika, PJSC ALROSA.

Yakov S. Kharitonov, head of VFD department, ST Almazavtomatika, PJSC ALROSA.

Vladislav A. Shevchuk, Cand. Sc., engineer, JSC Research and Production Center Polyus.

Alexander S. Semenov, Cand. Sc., associate professor, head of E&AIP department, North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny.