



Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России

© В.И. Пантелеев*, И.С. Кузьмин**, А.А. Завалов***,
А.В. Тихонов***, Е.В. Умецкая*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

**ООО ГК «Рутас», г. Красноярск, Россия

***ООО «НПП «Рутас», г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – изучение влияния коэффициента загрузки преобразователей частоты и тиристорных преобразователей на качество электрической энергии с разработкой рекомендаций по снижению влияния высших гармоник и коммутационных перенапряжений на характеристики электроэнергии. В ходе исследования использовался инструментальный метод измерения высших гармоник с помощью прибора комплексного контроля электрических параметров ПКК57 и цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 2024 В. Импульсные коммутационные перенапряжения фиксировались с применением активно-резистивного делителя типа ДНЕК-10 и вышеуказанного осциллографа, при исследовании полученных данных использовались программы по обработке статистических данных LogiPlot 6.4 и методы математической статистики. Установлен нижний пороговый уровень величины коэффициента загрузки преобразователей частоты и тиристорных преобразователей равный 0,8, при котором значения искажения синусоидальности кривой напряжения соответствуют государственному стандарту Российской Федерации по качеству электрической энергии. Определена степень подавления высших гармоник с 5-й по 17-ю силовыми трансформаторами мощностью от 250 кВ·А до 6300 кВ·А, находящаяся в диапазоне от 95 до 45%. Обосновано использование системы «трансформатор–преобразователь–электроприемник» применительно к системам электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий. Показано, что электродвигатели мощностью до 2500 кВт включительно требуют защиты от коммутационных перенапряжений. Доказана высокая эффективность универсального RC-гасителя на базе RC-цепей, подключенного к зажимам электродвигателя, как средства защиты электродвигателей от коммутационных перенапряжений. Таким образом, для повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России следует обеспечить эксплуатацию преобразователей частоты и тиристорных преобразователей с коэффициентом загрузки 0,8 и более. Также рекомендовано выполнить переход на более эффективную и недорогую систему «трансформатор–преобразователь–электроприемник», если мощность трансформатора не превышает 1000 кВ·А. Эффективную защиту электродвигателей мощностью до 2500 кВт включительно можно обеспечить с помощью предлагаемого универсального RC-гасителя, при этом кратность перенапряжений не будет превышать 1,7.

Ключевые слова: качество электроэнергии, преобразователи частоты, частотно-регулируемый привод, высшие гармоники, коммутационные перенапряжения, RC-гаситель

Для цитирования: Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>

Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia

Vasiliy I. Panteleev*, Ilya S. Kuzmin**, Artem A. Zavalov***,
Aleksey V. Tikhonov***, Ekaterina V. Umetskaia*

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Rutas Group Limited Liability Company, Krasnoyarsk, Russia

***Research and production enterprise Rutas Limited Liability Company,

Abstract: This paper investigates the effect of the load factor of frequency converters and thyristor converters on electrical power quality. Recommendations for reducing the influence of higher harmonics and switching overvoltages on the

characteristics of electrical power are provided. Higher harmonics were measured by a PKK57 complex device for controlling electrical parameters and a digital oscilloscope of the Tektronix TDS 2024V type. Impulse switching overvoltages were recorded by an active resistance divider of the DNEK-10 type and the above-mentioned oscilloscope. The obtained data were processed by the Loginom 6.4 software and the methods of mathematical statistics. The lower threshold level of the load factor of frequency converters and thyristor converters was set equal to 0.8, at which the sinusoidal distortion of voltage curves correspond to the RF standard of electrical power quality. The suppression degree of higher harmonics from the 5th to 17th frequency by power transformers with a capacity of 250–6,300 kV·A ranged from 95 to 45%. The use of the 'transformer–converter–electric receiver' system as applied to the power supply systems of mining and processing enterprises was substantiated. It was shown that electric motors with a capacity of up to 2,500 kW inclusively require protection against switching overvoltages. Conventional RC-absorbers based on RC-circuits connected to the terminals of electric motors are shown to be highly efficient for protecting electric motors against switching overvoltages. Thus, the quality of electrical power in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia can be ensured by frequency converters and thyristor converters with a load factor of 0.8 or greater. Provided that the transformer capacity does not exceed 1,000 kV·A, a more efficient and less expensive 'transformer–converter–electrical receiver' system is recommended. Effective protection of electric motors of up to 2,500 kW inclusive can be provided using the proposed conventional RC absorber, which maintains the overvoltage rate at a level not exceeding 1.7.

Keywords: power quality, frequency converters, variable frequency drive, higher harmonics, switching overvoltages, RC snubber

For citation: Panteleev VI, Kuzmin IS, Zavalov AA, Tikhonov AV, Umetskaya EV. Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):356–368. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, выполненные на ряде горно-перерабатывающих предприятий, выявили, что основные показатели качества электрической энергии находятся в пределах норм, предусмотренных государственным стандартом России ГОСТ 32144–2013¹ «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»: отклонение и размах изменения напряжения, длительность провала напряжения, доза фликера, коэффициент несимметрии по обратной и нулевой последовательностям, отклонение частоты тока.

Особую озабоченность вызывает негативное влияние на качество электрической энергии высших гармоник тока и напряжения и импульсных перенапряжений.

Использование тиристорных преобразователей напряжения, преобразователей частоты и современных коммутационных аппаратов позволяет снизить затраты на переработку руды, но вызывает появление высших

гармоник и импульсных перенапряжений [1–10].

На горно-перерабатывающих предприятиях России в основном используются тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты мощностью до 750 кВт. В качестве современных коммутационных аппаратов используются вакуумные контакторы в сетях до 1000 В, а в сетях свыше 1000 В – вакуумные и элегазовые выключатели [11].

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СИСТЕМЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ–ДВИГАТЕЛЬ

Статистическая обработка экспериментальных данных, связанных с исследованием наличия высших гармоник тока и напряжения, показала, что значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой тока и напряжения в основном определяются коэффициентом загрузки преобразователей частоты или тиристорных преобразователей и практически не зависят от типа преобразователя.

¹ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. Росстандартом 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены зависимости коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и напряжения от коэффициента загрузки преобразователя, соответственно, для сетей до и свыше 1000 В.

Существующие методики выбора мощности преобразователей и опыт их эксплуатации показали, что преобразователи частоты и тиристорные преобразователи работают с не превышающим 60% коэффициентом загрузки. В этом случае коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях напряжением до и свыше 1000 В могут достигать значений равных 20% и 16%, что выше предельно-допустимых норм, предусмотренных государственным стандартом России¹, в 1,7 и 2 раза, соответственно. Это обстоятельство приводит к отказам контрольно-измерительной аппаратуры и нарушениям в системах управления технологическим процессом, что негативно отражается на качестве переработки руды.

Анализ представленных на рис. 1 и 2 зависимостей показывает, что при эксплуатации преобразователей с коэффициентом загрузки 0,8 и более значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения могут быть снижены до уровня 3% и 2%, соответственно, для сетей до и свыше 1000 В, что полностью соответствует требованиям государственного стандарта.

Снижения влияния высших гармоник на качество электрической энергии можно добиться не только за счет изменения коэффициента загрузки преобразователей частоты и тиристорных преобразователей, но и за счет замены системы «фильтр – преобразователь – электроприемник» на систему «трансформатор – преобразователь – электроприемник» [12]. Использование специальных схем соединения обмоток трансформаторов позволяет ограничить амплитуды отдельных гармоник тока и сократить их спектр.

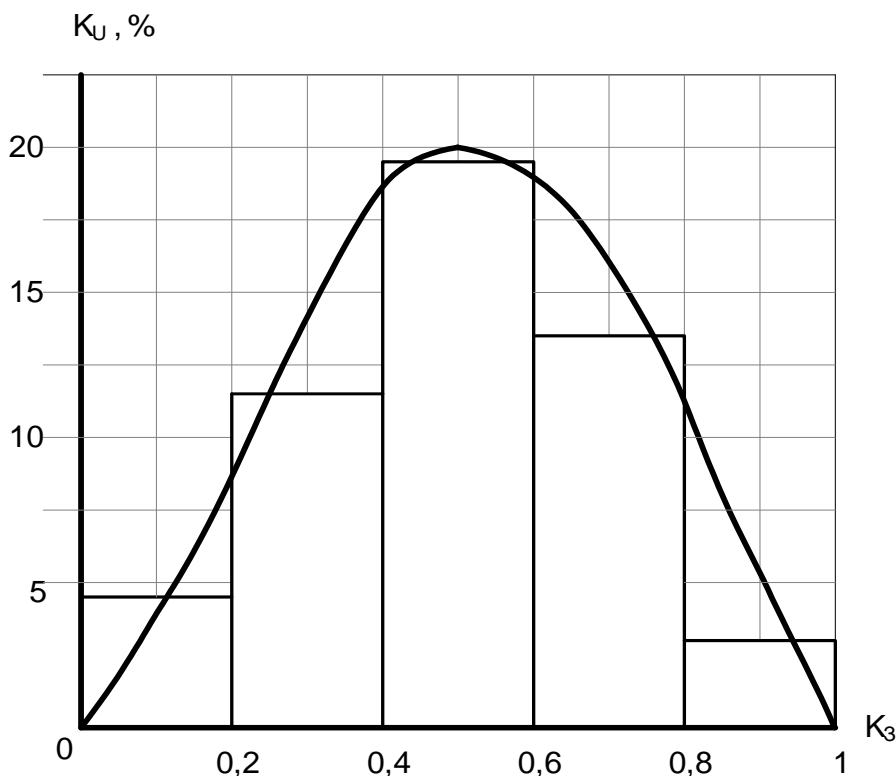


Рис. 1. Гистограмма и кривая, отображающие зависимость средних значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U от коэффициента загрузки преобразователя частоты K_3 в сетях до 1000 В

Fig. 1. Histogram and curve showing the dependence of average values of the distortion factor of the sinusoidal voltage curve K_U on the load factor of the frequency converter K_3 in the networks up to 1000 V

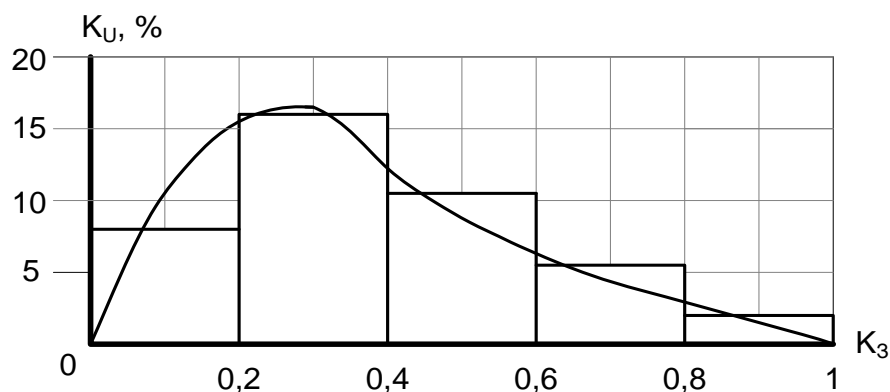


Рис. 2. Гистограмма и кривая, отображающие зависимость средних значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U от коэффициента загрузки преобразователя частоты K_3 в сети 6 кВ
 Fig. 2. Histogram and curve showing the dependence of average values of the distortion factor of the sinusoidal voltage curve K_U on the load factor of the frequency converter K_3 in the 6 kV network

Как показали исследования, силовые трансформаторы 6(10)/0,4(0,69) кВ и разделительные трансформаторы 6(10)/6(10) обладают высокой степенью подавления высших гармоник тока и напряжения, если мощ-

ность трансформатора не превышает 1000 кВ·А. На рис. 3 приведены зависимости степени подавления высших гармоник (γ) от мощности силовых трансформаторов.

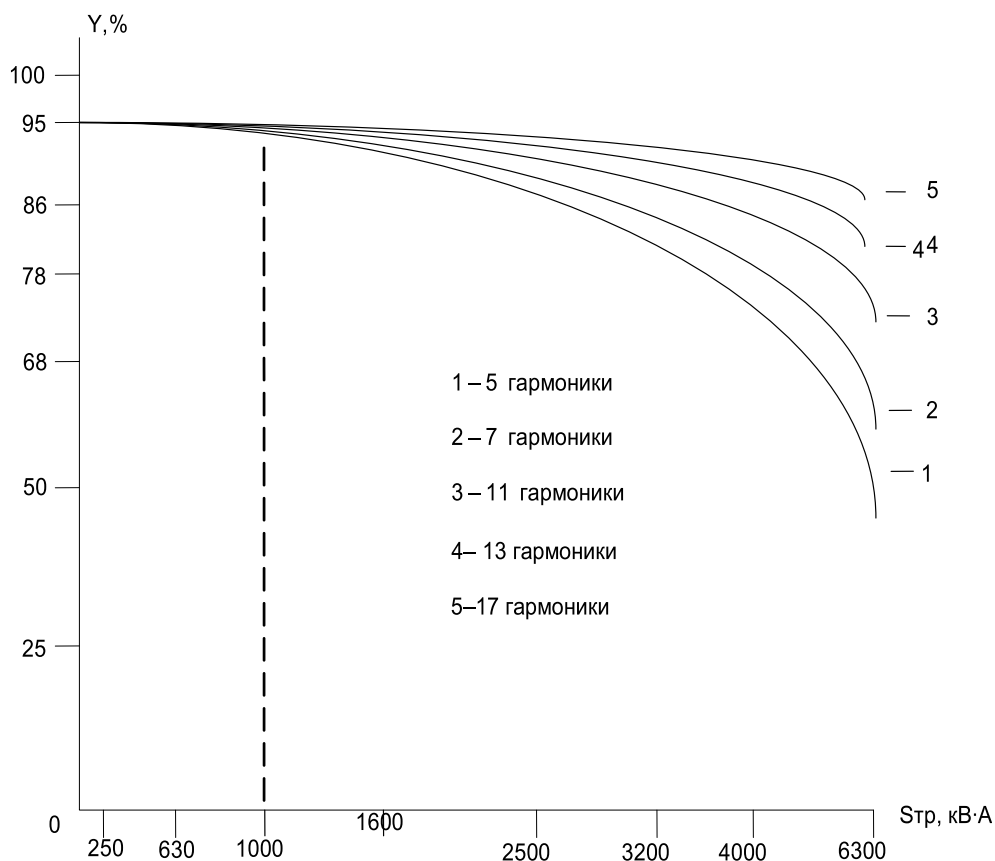


Рис. 3. Зависимость степени поглощения 5–17 гармоник тока и напряжения от мощности трансформатора
 Fig. 3. Absorption degree of 5–17 harmonics of current and voltage vs transformer power



Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, показывает, что степень подавления высших гармоник силовыми трансформаторами мощностью до 1000 кВ·А достигает 95%, что позволяет локализовать высшие гармоники в электрической цепи «преобразователь – электроприемник» и не допустить их проникновения в общую систему электроснабжения [13].

При использовании более мощных преобразователей (мощностью свыше 750 кВт) в сетях свыше 1000 В для подавления высших гармоник можно использовать параллельную работу трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А. Например, при использовании преобразователя с полной мощностью 2400 кВ·А в сетях свыше 1000 В для локализации высших гармоник можно использовать параллельную работу трех разделительных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А.

Опыт эксплуатации тиристорных преобразователей и преобразователей частоты в сетях горно-перерабатывающих предприятий свыше 1000 В показывает, что данные устройства обладают низкой устойчивостью к перенапряжениям в режиме дугового однофазного замыкания на землю, так как перенапряжения могут достигать четырехкратного значения номинального напряжения [14]. В этом случае применение разделительных трансформаторов позволит не только локализовать высшие гармоники на участке сети «разделительный трансформатор – преобразователь – электроприемник», но и защитить преобразователь от перенапряжений в режиме дугового однофазного замыкания на землю, так как преобразователь не будет иметь гальванической (непосредственной) связи в системах электроснабжения.

Анализ стоимости фильтрокомпенсирующих устройств на напряжение 6(10) кВ, применяющихся с тиристорными преобразователями частоты мощностью 2000 кВт в зависимости от функционала частотно-регулируемого привода и разделительных трансформаторов аналогичной мощности на напряжение 6(10) кВ, показал, что стоимость фильтрокомпенсирующего устройства превышает стоимость разделительного трансформатора в 5–6 раз.

Таким образом, использование разделительных трансформаторов взамен фильтрокомпенсирующих устройств в частотно-регулируемом приводе позволит снизить расходы в 2–2,5 раза. Последнее обстоятельство указывает на то, что использование системы «разделительный трансформатор – преобразователь – электроприемник» позволяет не только повысить качество электрической энергии за счет эффективной локализации высших гармоник, обеспечить защиту преобразователей от перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю, но и снизить стоимость.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Использование вакуумных и элегазовых выключателей для коммутации электродвигателей и трансформаторов способствует возникновению значительных импульсных перенапряжений.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости импульсных коммутационных перенапряжений от мощности высоковольтных электродвигателей, коммутацию которых осуществляют вакуумные, элегазовые, масляные и электромагнитные выключатели [15, 16].

Согласно ГОСТ Р 32144–2013¹, допустимая кратность коммутационных перенапряжений в сетях 6–10 кВ не должна превышать значение 4,3.

Сопоставляя данные, представленные на рис. 4, с допустимой кратностью коммутационных перенапряжений можно утверждать, что при коммутации высоковольтных электродвигателей мощностью до 2000 кВт масляными, элегазовыми и вакуумными выключателями кратность коммутационных перенапряжений выше допустимого значения. Следовательно, указанные электродвигатели необходимо эксплуатировать со средствами защиты от перенапряжений.

Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для электрических двигателей мощностью 630 кВт составляют 2,75 при коммутации асинхронного электродвигателя электромагнитным выключателем, 3 – при коммутации

синхронного электродвигателя электромагнитным выключателем, 4,1 – при коммутации асинхронного электродвигателя масляным выключателем, 4,35 – при коммутации синхронного электродвигателя масляным выключателем, 4,85 – при коммутации асинхронного электродвигателя элегазовым выключателем, 5,2 – при коммутации синхронного электродвигателя элегазовым выключателем, 5,8 – при коммутации асинхронного электродвигателя вакуумным выключателем, 6,3 – при коммутации синхронного электродвигателя вакуумным выключателем.

Таким образом, при коммутации электродвигателей мощностью 630 кВт современными быстродействующими выключателями требуется использовать защиту от коммутационных перенапряжений.

В настоящее время для защиты электродвигателей от коммутационных перенапряжений используются ограничители перена-

пряжений нелинейные (ОПН), а также RC-ограничители и RC-гасители которые представляют собой демпфирующие резистивно-емкостные цепи [17–20].

Исследования эффективности вышеперечисленных устройств защиты от перенапряжений показали, что использование ОПН не всегда позволяет обеспечить требуемый уровень ограничения коммутационных перенапряжений из-за наличия зоны замирания в работе ОПН. В частности, при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц за первый момент коммутации ОПН не реагирует на возникшие перенапряжения и начинает ограничивать перенапряжения спустя 3–4 периода высокочастотных колебаний. Такого промежутка времени достаточно для того, чтобы коммутационные перенапряжения достигали максимальных значений, то есть ОПН не ограничивает максимально возможные коммутационные перенапряжения [21].

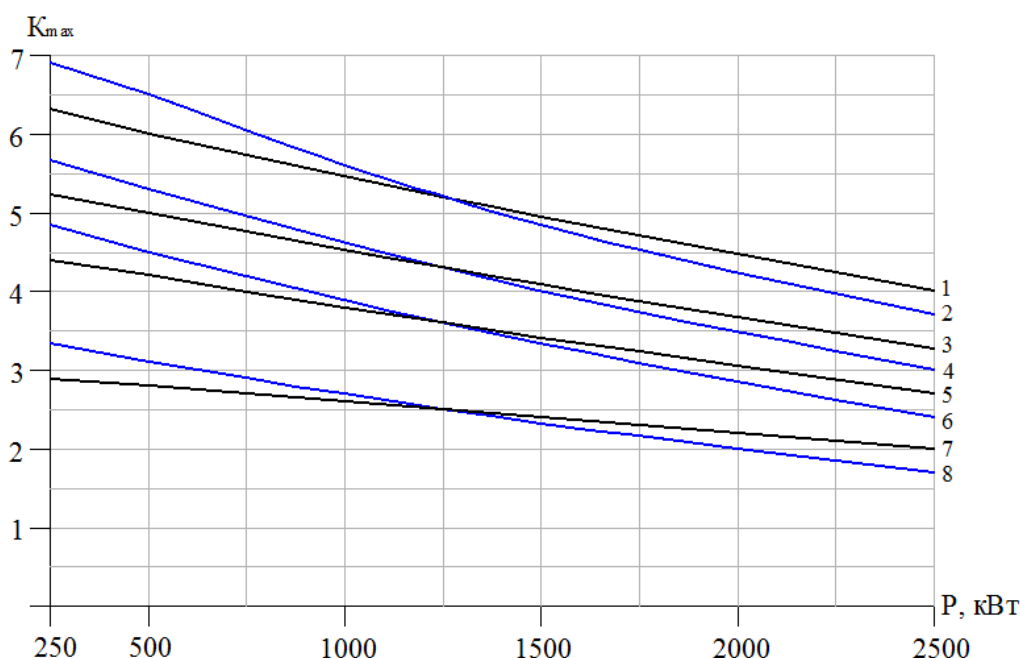
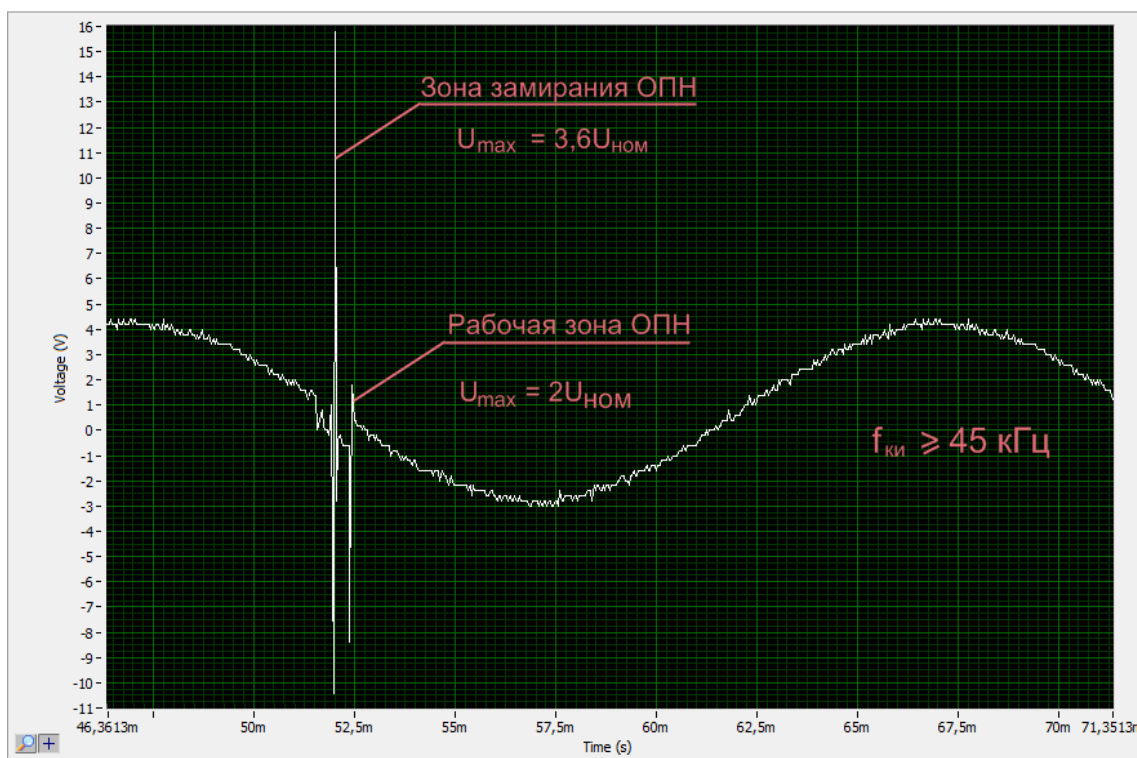
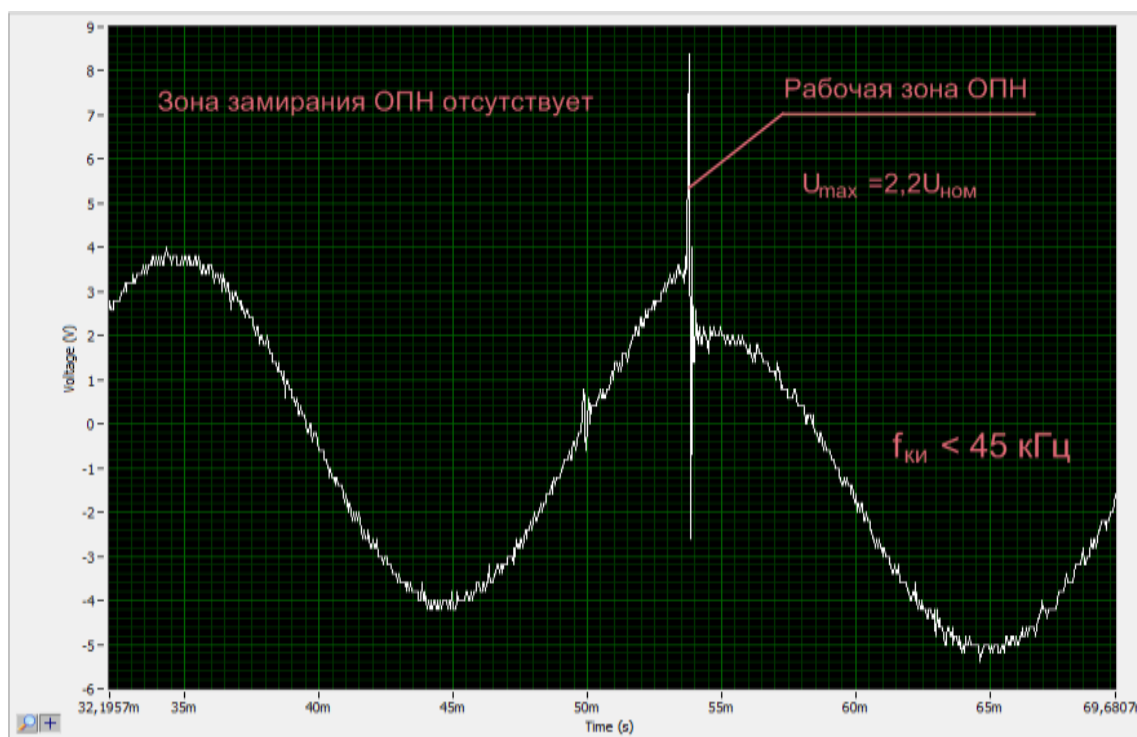


Рис. 4. Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для синхронных и асинхронных электродвигателей в зависимости от типа выключателя: 1 – асинхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 2 – синхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 3 – асинхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 4 – синхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 5 – асинхронный электродвигатель с масляным выключателем; 6 – синхронный электродвигатель с масляным выключателем; 7 – асинхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем; 8 – синхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем

Fig. 4. Maximum values of switching overvoltage multiplicity for synchronous and asynchronous motors depending on the circuit breaker type: 1 – asynchronous electric motor with a vacuum switch; 2 – synchronous electric motor with a vacuum switch; 3 – asynchronous electric motor with a gas switch; 4 – synchronous electric motor with a gas switch; 5 – asynchronous electric motor with an oil switch; 6 – synchronous electric motor with an oil switch; 7 – asynchronous electric motor with an electromagnetic switch; 8 – synchronous electric motor with an electromagnetic switch



a



b

Рис. 5. Осциллограммы, отражающие «зону замирания» в работе ограничителя перенапряжений нелинейного:
 а – отключение синхронного двигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем;
 б – отключение синхронного двигателя мощностью 2500 кВт элегазовым выключателем
 Fig. 5. Oscillograms reflecting the "fading zone" in the operation of a surge arrester:
 а – disconnection of the 250 kW synchronous motor by a vacuum switch;
 б – disconnection of the 2500 kW synchronous motor by a gas circuit breaker

В качестве примера на рис. 5 представлена зона замирания в работе ОПН. В первом случае осциллограмма фиксировалась при отключении синхронного двигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем, наблюдается зона замирания в работе ОПН. Во втором случае осциллограмма фиксировалась при отключении синхронного двигателя мощностью 2500 кВт элегазовым выключателем, зоны замирания в работе ОПН не наблюдается.

Установлено, что с увеличением мощности электрического двигателя частота коммутационного импульса снижается, и при мощности электрического двигателя 2500 кВт и более значение частоты коммутационного импульса меньше 40 кГц при условии, что отключение электродвигателя происходит в штатном рабочем режиме.

ОПН, как правило, собираются по схеме «звезда с заземленной нейтральной точкой». В этом случае при возникновении дугового однофазного замыкания на землю в сетях 6–10 кВ и работе защиты от однофазных замыканий на землю на сигнал или с выдержкой времени ОПН, связанный с неповрежденными фазами сети, может быть подвержен термическому разрушению. Разрушение ОПН произойдет вследствие протекания через него длительных значительных токов, превышающих значения тока термической стойкости ОПН, который, как правило, составляет 500 А.

Пример термического разрушения ОПН в режиме дугового однофазного замыкания на землю приведен на рис. 6.

Наиболее эффективными средствами

ограничения коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации электрических двигателей, являются RC-ограничители и RC-гасители, в конструкции которых используются RC-цепи. Использование RC-цепей позволяет за счет емкости конденсатора снизить волновое сопротивление электродвигателя, что, в свою очередь, при одном и том же срезе тока уменьшает величину коммутационных перенапряжений, так как величина перенапряжений определяется по формуле:

$$U_{max} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где i_0 – срез тока в выключателе, А; L – индуктивность обмотки электрического двигателя, Гн; C – сосредоточенная емкость на зажимах электрического двигателя с учетом емкости обмоток по отношению к земле, Ф.

Кратность коммутационных перенапряжений рассчитывалась по выражению:

$$K_{кп} = \frac{U_{max}}{U_{nom}} = \frac{0,82 \times U_{max}}{U_{фа}}, \quad (2)$$

где U_{nom} – номинальное напряжение, В; $U_{фа}$ – напряжение фазное амплитудное, В.

На рис. 7–9 приведены осциллограммы коммутационных перенапряжений, возникающие при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, без защиты от коммутационных перенапряжений, при использовании ОПН и при использовании RC-гасителя, соответственно.



Рис. 6. Термическое разрушение ограничителя перенапряжений нелинейного в режиме дугового однофазного замыкания на землю

Fig. 6. Thermal destruction of the surge arrester in a single arc fault mode

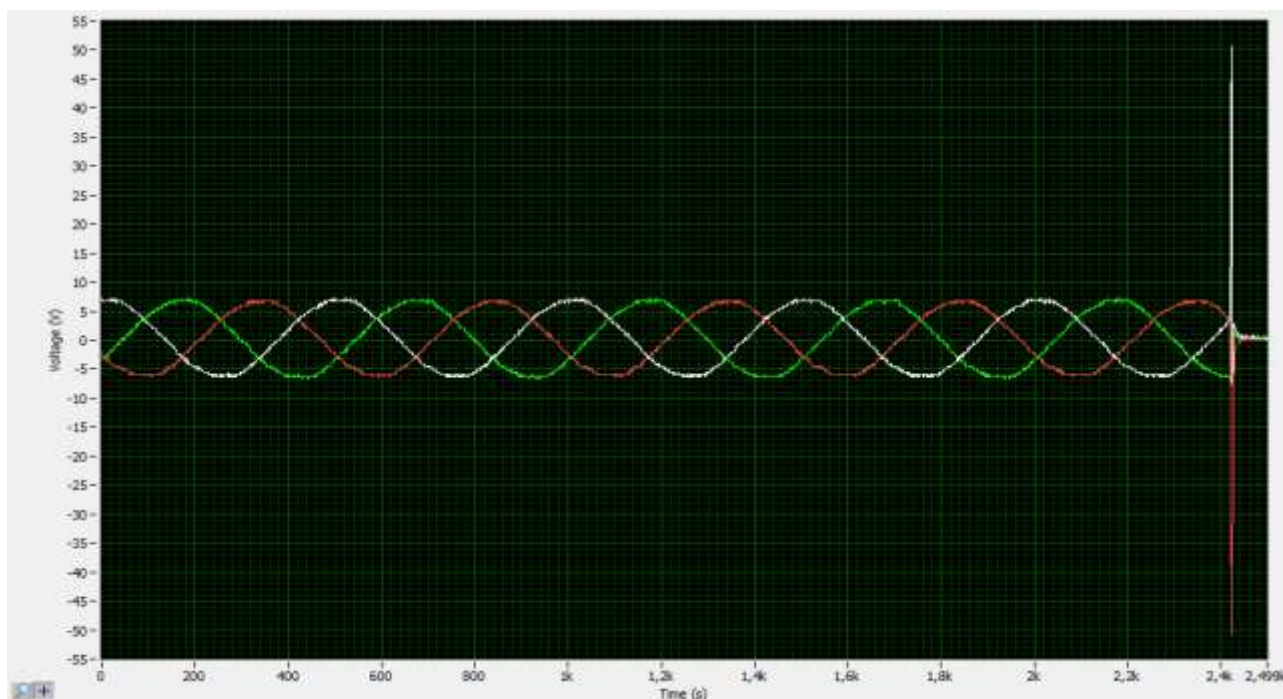


Рис. 7. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, без защиты от коммутационных перенапряжений. Кратность коммутационных перенапряжений составляет 5,97

Fig. 7. Oscillogram of switching overvoltages arising when the 630 kW electric motor is disconnected without protection against switching overvoltages. The multiplicity of switching overvoltages is 5.97

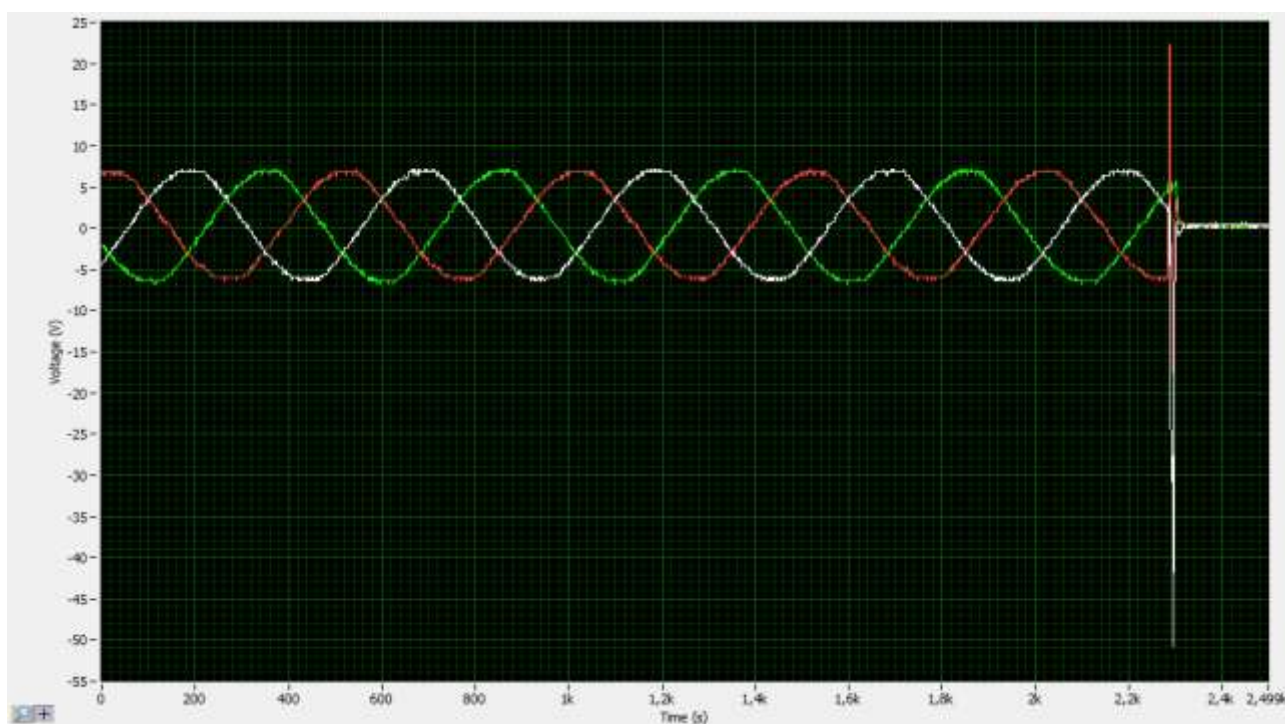


Рис. 8. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, при использовании ограничителя перенапряжений нелинейного. Кратность коммутационных перенапряжений составляет 5,97

Fig. 8. Oscillogram of switching overvoltages arising when the 630 kW electric motor is disconnected and the surge arrester is used. The multiplicity of switching overvoltages is 5.97

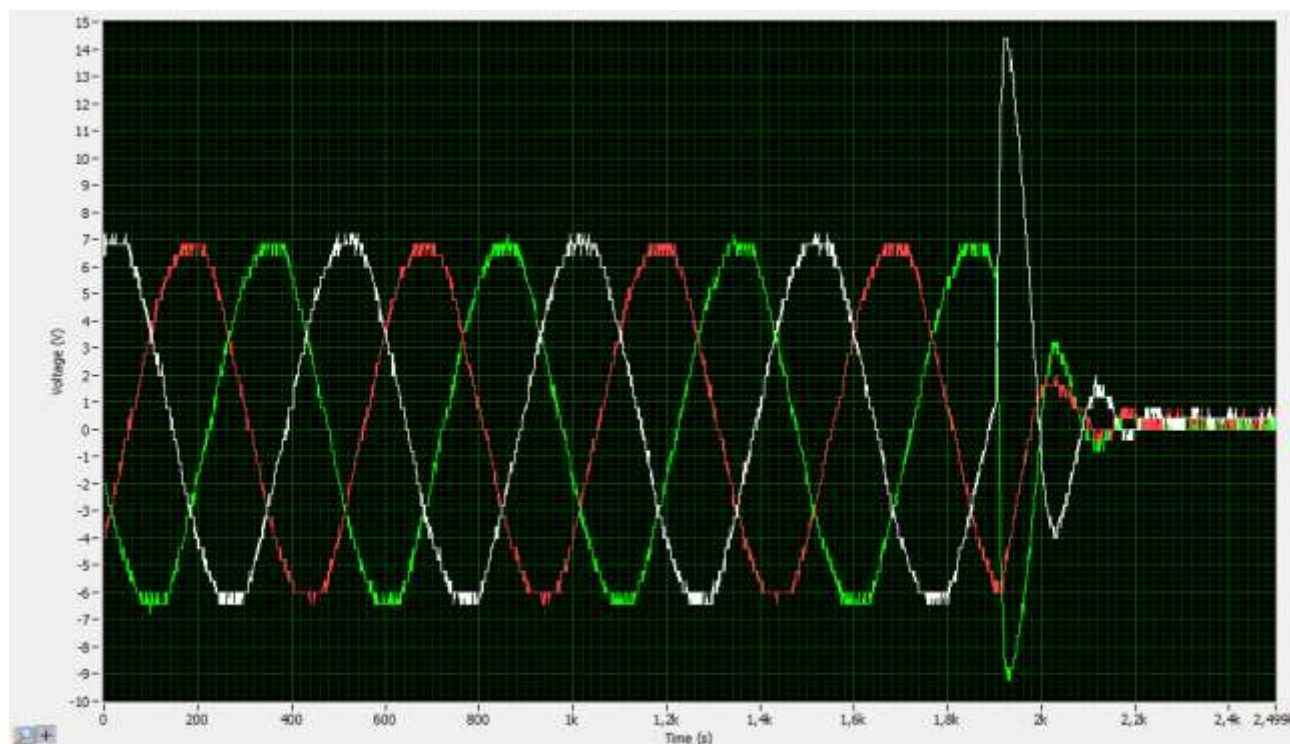


Рис. 9. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, при использовании RC-гасителя.

Кратность коммутационных перенапряжений составляет 1,69

Fig. 9. Oscillogram of switching overvoltages arising when the 630 kW electric motor is disconnected and the RC snubber is used. The multiplicity of switching overvoltages is 1.69

Анализ представленных осциллограмм показывает, что использование ОПН для защиты электродвигателя практически не приводит к ограничению коммутационных перенапряжений. В свою очередь, использование RC-гасителей позволило снизить возникновение коммутационного перенапряжения до кратностей, не превышающих значение 1,7. Очевидно, что подобная кратность коммутационных перенапряжений не представляет опасности для изоляции обмоток электродвигателя, так как амплитудное значение напряжения составляет 14,2 кВ при номинальном действующем значении 10 кВ.

Приведенные осциллограммы были получены при условии, что данные средства защиты подключались к зажимам электродвигателя.

Следует также отметить, что ОПН практически не влияет на крутизну коммутационно-

го импульса, то есть на скорость нарастания напряжения, тогда как RC-гаситель ограничивает не только амплитуду коммутационного импульса, но и существенно снижает скорость нарастания напряжения коммутационного импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксплуатация преобразователей частоты и тиристорных преобразователей с коэффициентом загрузки 0,8 и более, переход от системы «фильтр – преобразователь – электроприемник» на систему «трансформатор – преобразователь – электроприемник» и эффективное ограничение коммутационных перенапряжений с помощью RC-гасителей будут способствовать повышению качества электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России.

Список литературы

1. Кугушева Н.Н., Семёнов А.С., Якушев И.А., Павлова С.Н. Техничко-экономические особенности выбора ча-

стотно-регулируемых электроприводов для технологических установок алмазодобывающих предприятий



// Инновации и инвестиции. 2021. № 1. С. 145–149.

2. Брыкалов С.М., Балыбердин А.С., Трифонов В.Ю., Засухин Р.В. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 5. С. 10–18. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>

3. Семёнов А.С., Егоров А.Н., Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Якушев И.А., Федоров А.В. Анализ работы систем частотно-регулируемого электропривода при влиянии высших гармоник // Электротехнические системы и комплексы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 22–25 октября 2019 г.). Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 178–184.

4. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 4. С. 86–93.

5. Клундук Г.А. Влияние преобразователя частоты на энергосбережение насосного агрегата и электромагнитная совместимость оборудования // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.). Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2020. С. 153–157.

6. Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Матул Г.А., Семёнов А.С., Харитонов Я.С. Поиск путей повышения эффективности применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в условиях горного производства // Естественные и технические науки. 2018. № 8. С. 228–234.

7. Shevryev Y.V., Shevryeva N.Y. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry // Gornyi Zhurnal. 2019. Iss. 1. P. 66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>

8. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 2. <https://doi.org/10.3390/app11020538>

9. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives // Materials Process and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 2. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>

10. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor // Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8

11. Скакунов Д.А. Влияние силовой электроники на качество электрической энергии и методы фильтрации высших гармоник // сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн.

конф. (г. Новокузнецк, 2004 г.). Новокузнецк, 2004. С. 253–257.

12. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 12. P. 2128–2141.

13. Кузьмин С.В. Использование силовых трансформаторов для локализации высших гармоник в системах электроснабжения 0,4–10 кВ // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 2009 г.). Красноярск, 2009. С. 268–270.

14. Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А., Кузьмин С.В., Куликовский В.С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 116–132. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>

15. Кузьмин С.В., Майнагашев Р.А., Гаврилова Е.В., Немков С.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 4. С. 53–54.

16. Kuzmin S.V., Umetskaia E.V., Zavalov A.A. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>

17. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem // International Journal of GEOMATE. 2020. Vol. 19. Iss. 72. P. 180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>

18. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 122. P. 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>

19. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells // 21st European Conference on Power Electronics and Applications. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>

20. De Paula dos Santos D., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters // IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>

21. Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6–10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 2. С. 41–44.

References

1. Kugusheva NN, Semenov AS, Yakushev IA, Pavlova SN. Technical and economic features of choice of frequency-controlled electric drives for technological units of diamond mining enterprises. *Innovatsii i investitsii = Innovation & Investment*. 2021;1:145–149. (In Russ.)
2. Brykalov SM, Balyberdin AS, Trifonov VYu, Zasukhin RV. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;5:10–18. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>
3. Semenov AS, Egorov AN, Kharitonov YaS, Bebikhov YuV, Yakushev IA, Fedorov AV. Analysis of the operation of variable-frequency electric drive systems under the influence of high harmonics. In: *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Electro-technical systems and complexes: collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 22–25 October 2019, Ufa. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019, vol. 1, p. 178–184. (In Russ.)
4. Egorov AN, Semenov AS, Fedorov OV. The practical experience of the application of the frequency converter power flex 7000 in the mining industry. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*. 2017;4:86–93. (In Russ.)
5. Klunduk GA. Influence of a frequency converter on the power saving of a pump unit and electromagnetic compatibility of equipment. In: *Nauka i obrazovanie. Opyt, problemy, perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Science and Education. Experience, problems, development prospects: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 21–23 April 2020, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2020, vol. 1, p. 153–157. (In Russ.)
6. Bebikhov YuV, Egorov AN, Matul GA, Semenov AS, Kharitonov YaS. Search of ways to improve the efficiency of application of high-voltage frequency-regulated electric drive in conditions of mining production. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228–234. (In Russ.)
7. Shevyrev YV, Shevyreva NY. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>
8. Ashraf N, Abbas G, Abbassi R, Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(2). <https://doi.org/10.3390/app11020538>
9. Dutta N, Kaliannan P, Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;937(2):012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>
10. Jyothi R, Sumitgupta, Rao KU, Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. In: *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021, vol. 59, p. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8
11. Skakunov DA. Influence of power electronics on electric power quality and methods of higher harmonics filtering. In: *Trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2004, Novokuznetsk. Novokuznetsk; 2004, vol. 1, p. 253–257. (In Russ.)
12. Akagi H Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128 – 2141.
13. Kuz'min SV Use of power transformers for localization of higher harmonics in 0.4 – 10 kV power supply systems. In: *Energoeffektivnost' sistem zhizneobespecheniya goroda: Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Energy efficiency of city life support systems: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2009, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2009, vol. 1, p. 268–270. (In Russ.)
14. Kuzmin RS, Kuzmin IS, Menshikov VA, Kuzmin SV, Kulikovskii VS. Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;5:116–132. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>
15. Kuzmin SV, Mainagashev RA, Gavrilova EV, Nemkov SV. The experience of operating the protection means against the commutation overvoltage in the systems of supplying mining companies with 6 kV electric power. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2011;4:53–54. (In Russ.)
16. Kuzmin SV, Umetskaia EV, Zavalov AA. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>
17. Sowa P, Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem. *International Journal of GEOMATE*. 2020;19(72):180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>
18. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;122:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>
19. Fritz N, Engelmann G, De Doncker RW. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells. In: *21st European Conference on Power Electronics and Applications*. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>
20. De Paula dos Santos D, Sartori CAF. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters. In: *IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>



21. Kuzmin SV, Gavrilova EV, Baryshnikov DV. The influence of the arc extinction process in high-voltage switches on the communication overvoltage value appearing in the

6–10 kV circuits of mining enterprises. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electro-mechanics*. 2009;2:41–44. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пантелеев Василий Иванович,
профессор, доктор технических наук,
заведующий кафедрой электроэнергетики,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26,
Россия;
e-mail: pvi0808@rambler.ru

Кузьмин Илья Сергеевич,
генеральный директор,
ООО ГК «Рутас»,
660064, г. Красноярск, ул. Вавилова, 2/ж, Россия;
e-mail: info@rutas.group

Завалов Артем Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия;
✉ e-mail: zavalovartem@mail.ru

Тихонов Алексей Валерьевич,
инженер,
ООО «НПП «Рутас»,
660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, Россия;
e-mail: rutas2004@list.ru

Умецкая Екатерина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электрификации
горно-металлургического производства,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия;
e-mail: rutas2004@list.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 19.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasily I. Panteleev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Electric Power,
Siberian Federal University,
26, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk 660074,
Russia;
e-mail: pvi0808@rambler.ru

Ilya S. Kuzmin,
Chief Executive Officer,
Rutas Group Limited Liability Company,
2/ж, Vavilov St., Krasnoyarsk 660064, Russia;
e-mail: info@rutas.group

Artem A. Zavalov,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia;
✉ e-mail: zavalovartem@mail.ru

Aleksey V. Tikhonov,
Engineer,
Research and production enterprise Rutas Limited
Liability Company,
72, Vavilov St., Krasnoyarsk 660025, Russia;
e-mail: rutas2004@list.ru

Ekaterina V. Umetskaia,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Electrification
of Mining and Metallurgy Industry,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia;
e-mail: rutas2004@list.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 19.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.