

УДК 621.316.71

А.Н. Егоров¹, А.С. Семёнов², О.В. Федоров³**ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ
POWER FLEX 7000 В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

АК «АЛРОСА» (ПАО), СТ «Алмазавтоматика», г. Мирный, Республика Саха (Якутия)¹,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Политехнический институт (филиал) в г. Мирном, г. Мирный, Республика Саха (Якутия)²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Данная статья посвящена вопросам особенности применения высоковольтных преобразователей частоты в системах электроприводов горных предприятий. Произведен обзор современной преобразовательной техники, выявлены лидеры в производстве высоковольтных преобразователей. Выполнен анализ влияния высоковольтных преобразователей частоты на качество электрической энергии питающей сети. Детально рассмотрены режимы работы высоковольтного преобразователя PowerFlex 7000. Представлены схемы его силовой части. Произведен контроль параметров электрической энергии вентилятора главного проветривания, в системе электропривода которого установлен преобразователь. Представлены результаты и сделаны выводы о соответствии контролируемых параметров нормам.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, электрический привод, преобразователь частоты, электрическая энергия, питающая сеть, контроль качества электроэнергии, напряжение, ток, гармоники.

Высоковольтные системы электропривода на горнодобывающих предприятиях находят применение на главных вентиляторных установках (ГВУ), шахтных подъемных установках (ШПУ) и насосных установках. При этом капитальные и эксплуатационные затраты при использовании высоковольтного электрооборудования значительно выше по сравнению с вариантом применения низковольтного электрооборудования. Кроме того, эксплуатация высоковольтного электрооборудования связана с повышенной опасностью. Вследствие необходимости применения проводников большого сечения для передачи большой мощности на низком напряжении высоковольтные системы электропривода находят применение в промышленных установках мощностью более 1 МВт [1].

Наряду с необходимостью обеспечения требуемых параметров работы приводимой в движение установки, ключевой задачей является оптимизация энергопотребления, поэтому предпочтение отдается частотно-регулируемому электроприводу. Следует отметить что, прямой пуск высоковольтных электродвигателей переменного тока сопровождается бросками пускового тока, достигающими 8-кратного значения по отношению к номинальному току двигателя, которые вызывают большие электромагнитные и механические ударные нагрузки на двигатели и на приводимые ими исполнительные механизмы [2, 3].

Развитие силовой полупроводниковой электроники привело к разработке нескольких видов высоковольтных преобразователей частоты, которые позволили значительно повысить эффективность систем высоковольтного электропривода. Сегодня на рынке высоковольтных преобразователей ряд отечественных и зарубежных предприятий заняты разработкой и производством преобразователей частоты. К лидерам рынка по праву можно отнести ABB, Siemens и Rockwell Automation, так как они производят несколько линеек преобразователей, которые имеют принципиальные отличия в схемотехнике.

Кроме того, следует отметить уникальные преобразователи этих производителей, такие как ACS2000, ACS5000, PowerFlex 7000, Sinamics SM120CM и др., которые выполнены на мощных высоковольтных полупроводниках. Большинство остальных предприятий производят каскадные преобразователи частоты, которые строятся на базе H-мостовых низковольтных ячеек с применением специального многообмоточного входного трансформатора [4, 5].

В зависимости от конструктивных особенностей и функциональных возможностей суммарные затраты на внедрение и эксплуатацию в течение жизненного цикла преобразователя частоты могут различаться в несколько раз, а иногда и на порядок, поэтому при выборе преобразователя частоты следует учитывать множество факторов. Нередки случаи, когда на предприятии внедряется оборудование с избыточными свойствами для данной конкретной установки и затраты на внедрение и эксплуатацию сводят на нет все усилия по обеспечению энергоэффективности. Так, на простейших насосных установках не имеет смысла применение преобразователя с векторным управлением, будет достаточным, если преобразователь обеспечивает скалярное управление. Кроме того, следует учитывать, что высоковольтные полупроводники на сегодняшний день очень дорого стоят, поэтому запасные части к преобразователям прямого и многоуровневого преобразования будут стоить гораздо дороже, чем к каскадным преобразователям.

В то же время всегда нужно помнить, что одни преобразователи будут обладать преимуществом особой надежности, другие – широкой функциональной возможности, а третьи – низкой стоимости и выбор преобразователя должен основываться на ключевых технологических особенностях промышленной установки, для которой разрабатывается система электропривода. Например, основной особенностью главных вентиляторных установок подземных горнодобывающих предприятий следует обозначить очень высокие требования к надежности, так как они являются основой системы подачи свежей струи воздуха, иными словами от работы этих вентиляторов зависит надежность системы жизнеобеспечения.

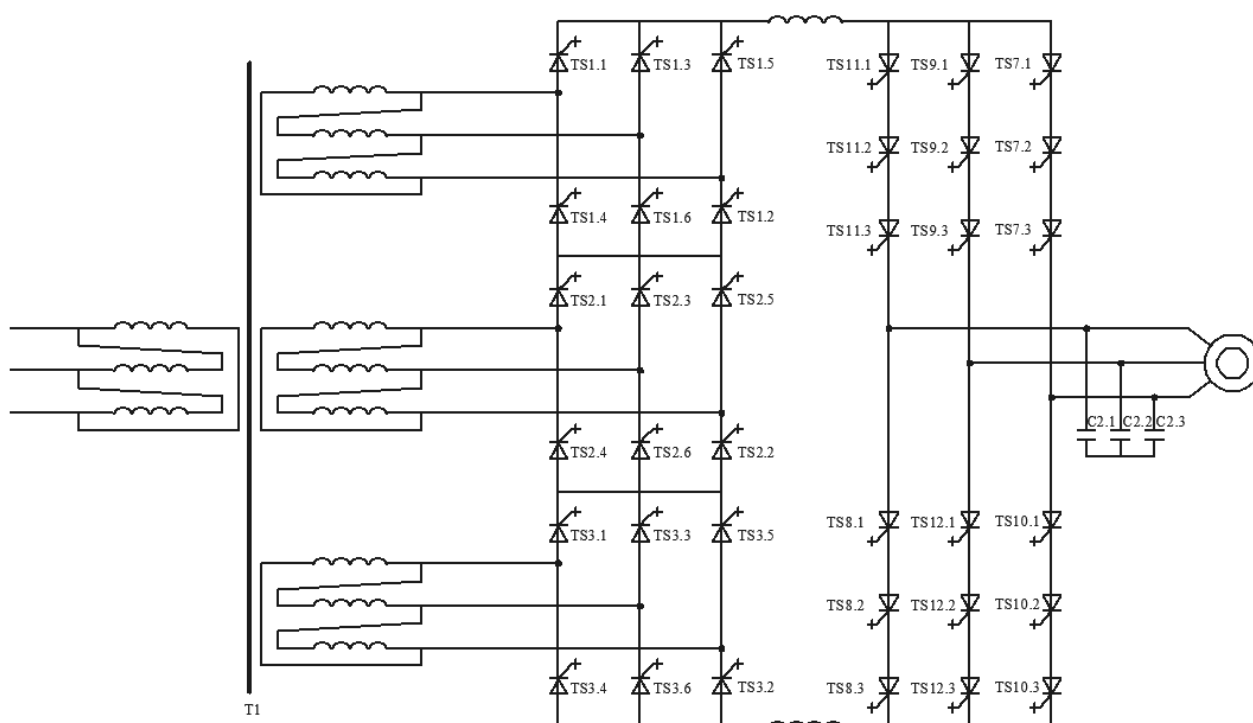


Рис. 1. Схема силовой части преобразователя частоты

В системах электроприводов вентиляторов главного проветривания рудников АК «АЛРОСА» (ПАО) применяется преобразователь частоты PowerFlex 7000 с 18-пульсным выпрямителем (рис. 1), так как он зарекомендовал себя как весьма надежный продукт. Этот преобразователь, построенный на высоковольтных SGCT-тиристорах, относится к преобразователям прямого преобразования и отличается высокой надежностью элементов силовой части. Последнее подтверждается тем, что за время эксплуатации на вентиляторах главного проветривания рудника «Мир» Мирнинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) с 2007 года не зафиксировано не единого случая выхода из строя элементов силовой цепи. Высокая надеж-

ность силовой части обеспечивается за счет применения SGCT (SymmetricalGate Commutate Thyristor) тиристоры с заявленной производителем частотой отказов 100 на 1 миллиард часов. Данная разновидность силовых полупроводниковых ключей представляет собой симметричный коммутационный тиристор с интегрированным управлением и является расширением серии тиристоры IGCT с более высокой частотой модуляции. Так, тиристоры IGCT обладают частотой модуляции лежащей в пределах до 200 Гц, а тиристоры SGCT обладают частотой модуляции лежащей в пределах от 400 до 1000 Гц [6]. SGCT-тиристоры рассчитаны на номинальное напряжение 6500 вольт, что значительно снижает количество полупроводников силовой части, а это, в свою очередь, положительно влияет на надежность преобразователя частоты.

Преобразователи PowerFlex 7000 в зависимости от типа выпрямителя выпускаются в трех конфигурациях: с активным выпрямителем непосредственного подключения к сети; с активным выпрямителем, подключенным к сети через отдельный изолирующий трансформатор; с 18-пульсным выпрямителем. Для обеспечения запаса пикового обратного напряжения в зависимости от уровня питающего напряжения в каждом плече выпрямителя и инвертора изменяется количество, подключенных последовательно тиристоры, так для напряжения 6 кВ последовательно включены три SGCT-тиристора.

Преобразователь частоты PowerFlex 7000 построен на основе автономного инвертора тока, то есть входная цепь инвертора тока обеспечивает режим источника тока. Этот режим достигается за счет установки в промежуточном звене большой индуктивности применения контура стабилизации тока. При этом функция тиристоры инвертора сводится к периодическому переключению направления этого тока в выходной цепи инвертора и тем самым на выходе инвертора формируется переменный ток.

Следует отметить что, нагрузкой инвертора тока должна быть цепь со свойствами, близкими к источнику напряжения, то есть с близким к нулевому внутренним динамическим сопротивлением, допускающим протекание через него скачкообразно меняющегося тока. Практически это обеспечивается включением на выход вентиляционного коммутатора конденсатора, что позволит уже подключить после него любую реальную нагрузку с индуктивностью, не допускающей скачков тока [7].

Подробный анализ работы инверторов представлен в [8], приведем лишь основные свойства автономных инверторов тока:

- сильная зависимость величины и формы выходного напряжения от величины и характера нагрузки в классическом варианте инвертора. Ограничение на минимум нагрузки диктуется допустимой степенью возрастания напряжения на выходе инвертора. Ограничения на максимум нагрузки обусловлены требованием восстановления управляющих свойств тиристоры. Влияние изменения частоты выходного напряжения на его величину такое же, как влияние изменения нагрузки;
- большая величина индуктивности реактора в звене постоянного тока для реализации режима источника тока, что ухудшает массогабаритные показатели преобразователя;
- большая инерционность регулирования из-за большой электромагнитной постоянной времени реактора в звене постоянного тока;
- возможность уменьшения пределов изменения напряжения на внешней характеристике инвертора модифицированной схемы инвертора путем применения или выпрямителя обратного тока, или тиристорно-индуктивного регулятора; возможность снижения величины (а значит, и массогабаритных показателей) коммутирующей емкости за счет применения отсекающих вентилялей;
- возможность улучшения гармонического состава выходного напряжения инвертора, особенно при низких частотах, методом широтно-импульсного формирования токов вентилялей;
- благоприятный с позиций электромагнитной совместимости режим нагрузки источника входного напряжения постоянным током со входа инвертора тока.

Улучшение формы выходного тока инвертора в преобразователе частоты PowerFlex 7000 достигается за счет применения метода широтно-импульсного формирования токов вентиляей, то есть каждый полупериод тока формируется в виде последовательности импульсов тока, длительность которых изменяется по трапецеидальному закону.

Результат применения этого метода представлен на рис. 2. На верхней части рисунка представлены осциллограммы тока по фазам А и С, а на нижней – осциллограммы напряжений по трем фазам, которые снимались с контрольных точек платы нормализации аналоговых сигналов преобразователя частоты PowerFlex 7000 главной вентиляторной установки рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА» (ПАО). Как видно из осциллограмм формы кривых входных токов и напряжений, преобразователь частоты PowerFlex 7000 формирует на выходе ток и напряжение, близкие к идеальной синусоиде. Последнее способствует повышению надежности электродвигателя за счет снижения интенсивности старения изоляции от действия высших гармоник. Кроме того, при обеспечении синусоидальности кривых тока и напряжения снижаются дополнительные потери от действия высших гармоник.

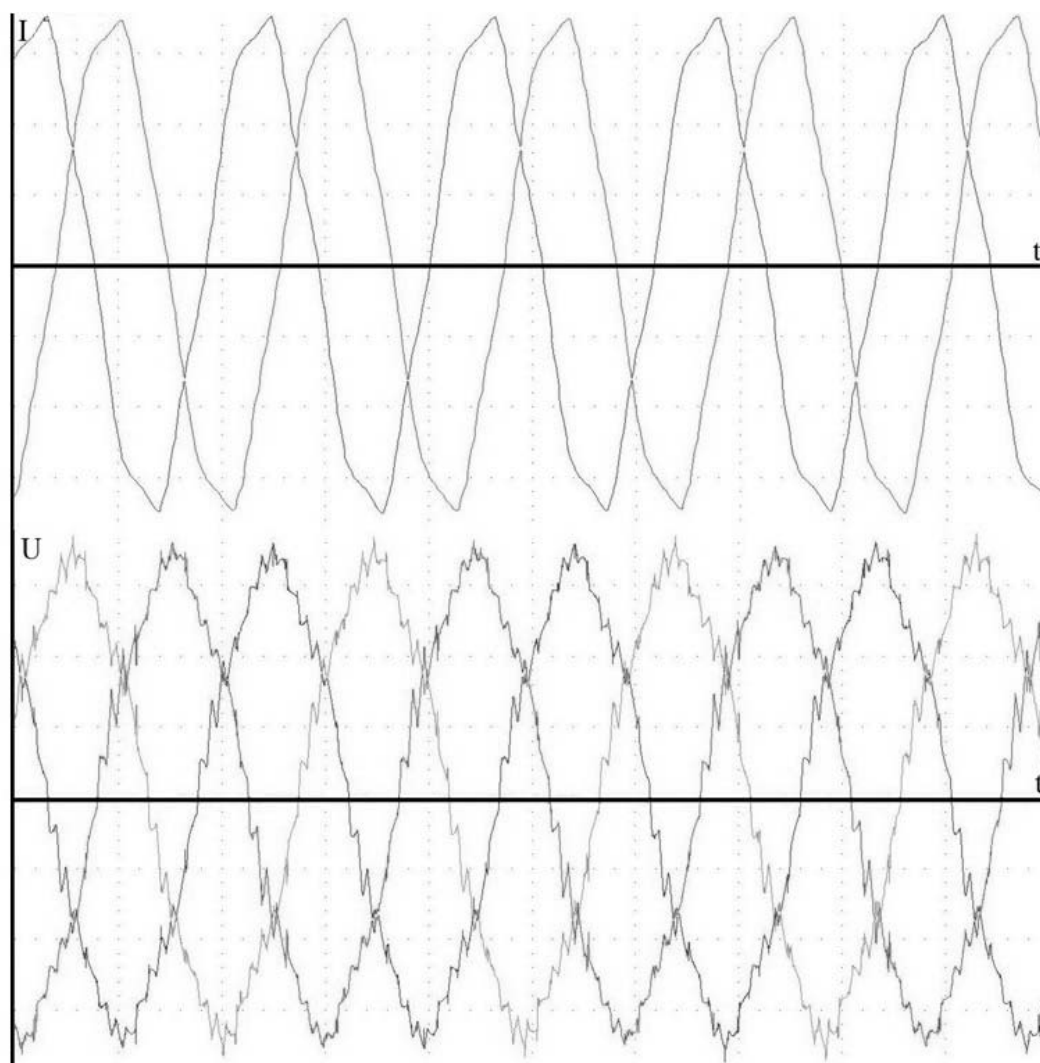


Рис. 2. Осциллограммы выходных токов и напряжений

Искажения напряжения являются следствием коммутации вентиляльных преобразователей. Преобразователь во время коммутации вентиляей производит подключение нагрузки к соответствующим фазам без разрыва тока, поступающего из предыдущей фазы, что приводит к периодическим междуфазным коротким замыканиям в питающей сети. В кривой на-

пряжения в процессе коммутации появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зависят от схемы выпрямления, количества фаз выпрямления, мощности преобразователей, параметров питающей сети, угла управления вентилями преобразователя. На рис. 3 представлены формы кривых входных токов и напряжений преобразователя частоты PowerFlex 7000 главной вентиляторной установки рудника «Интернациональный». Измерения проводились на вводном высоковольтном выключателе анализатором качества электрической энергии типа PowerQ4 MI2592 в режиме снимка формы сигналов.

На осциллограммах входных и выходных токов и напряжений видно, что формы кривых очень близки к идеальной синусоиде, но все же искажения имеются. Разумеется, эти искажения не сопоставимы с искажениями формы кривых напряжений и токов от коммутации тиристоров в простейших 6-пульсных выпрямителях с системой импульсно-фазового управления, которые применялись в первых высоковольтных преобразователях частоты отечественного производства, но, тем не менее, эти искажения свидетельствуют о генерации высших гармонических составляющих тока и напряжения.

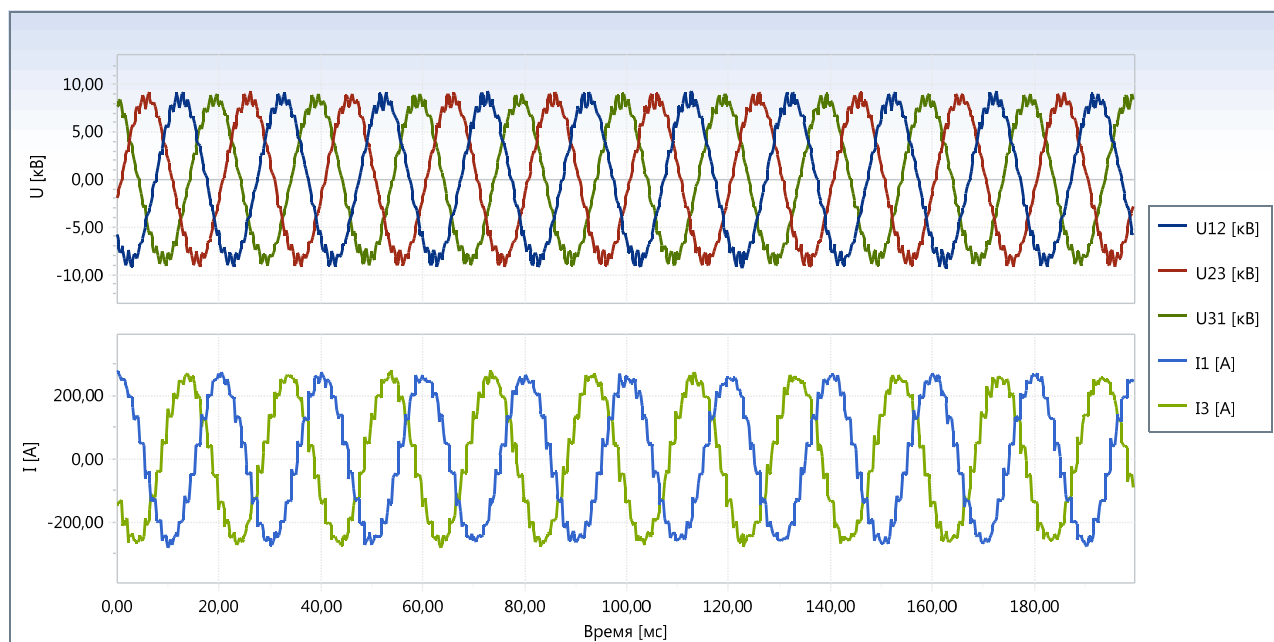


Рис. 3. Осциллограммы входных напряжений и токов

С целью получения данных для оценки влияния преобразователей частоты PowerFlex 7000 на качество электроэнергии питающей сети был проведен инструментальный контроль параметров электрической энергии [9, 10]. Контроль параметров электрической энергии производился в соответствии с ГОСТ-32144 [11] в течение 7 суток с 10-минутным интервалом. Результаты инструментального контроля представлены на рис. 4, из которых видно, что коэффициент искажения кривой напряжения достигает значения 42 %, что не соответствует требованиям ГОСТ-32144, в то же время коэффициент искажения кривой тока не превышает 5 %, что соответствует техническим характеристикам заявляемым производителем.

На рис. 5 представлен график изменения тока фазы А при запуске главной вентиляторной установки, одновременно с этим велся контроль коэффициентов искажения кривых напряжения и тока. Графики показывают, что напряжение начинает искажаться в момент запуска главной вентиляторной установки, что свидетельствует о влиянии преобразователя PowerFlex 7000 на качество электроэнергии питающей сети.

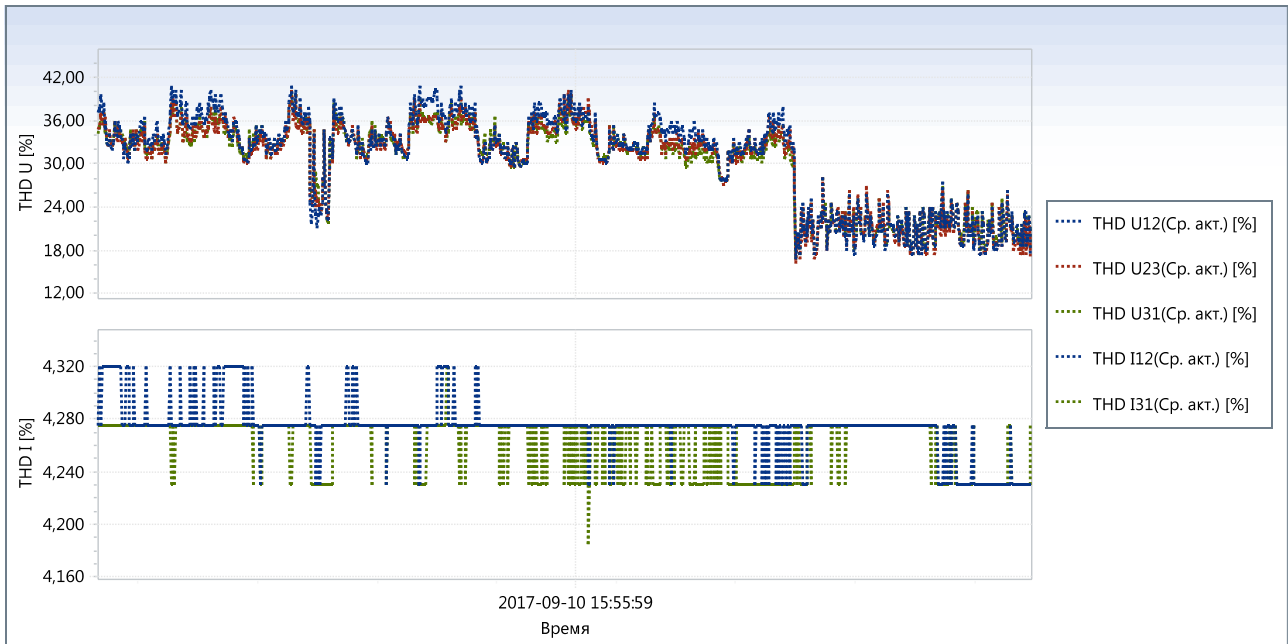


Рис. 4. Графики суммарных коэффициентов искажения кривых напряжения и токов на входе преобразователя частоты PowerFlex 7000

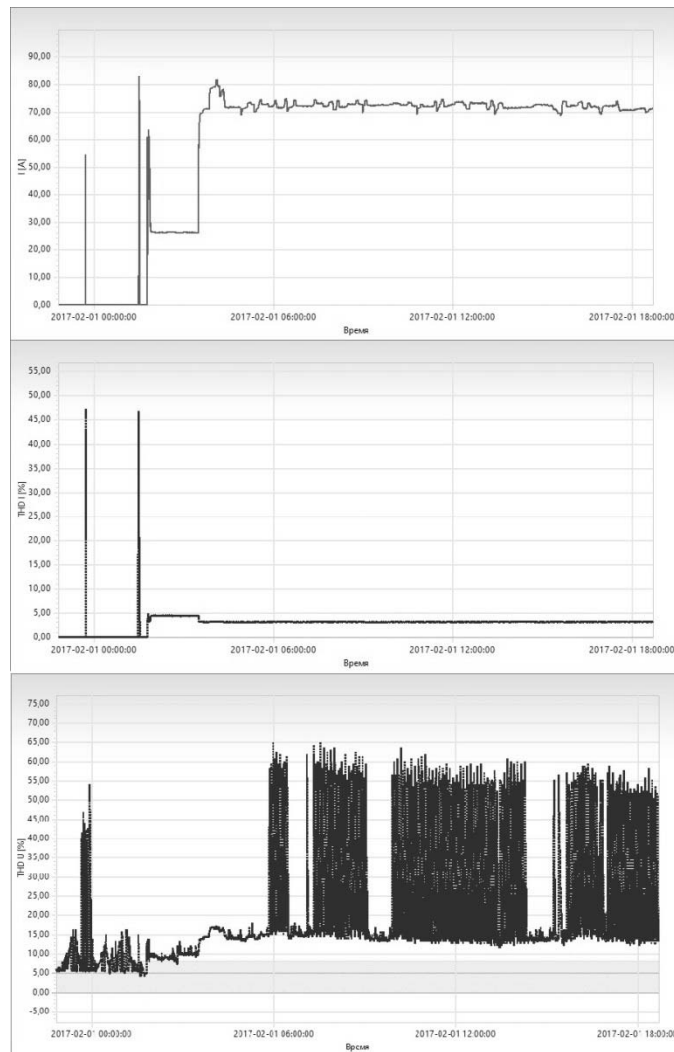


Рис. 5. Результаты измерений показателей качества электроэнергии при запуске главной вентиляторной установки

Следует отметить, что при малых значениях выходной частоты преобразователя коэффициент искажения кривой напряжения увеличивается. При этом анализ гармонических составляющих напряжения показал, что генерируются нечетные гармоники, некратные трем. Так, 17-я гармоническая составляющая превышает 30 % (рис. 6), что не соответствует требованиям ГОСТ-32144.



Рис. 6. График изменения семнадцатой гармонической составляющей напряжения

В заключении следует отметить, что преобразователи частоты PowerFlex 7000 отличаются очень высоким запасом прочности элементов силовой цепи, что позволяет их применение в установках требующих развития высокого пускового электромагнитного момента на валу электродвигателя. Однако при этом данные преобразователи оказывают влияние на качество электроэнергии питающей сети, которое выходит за рамки допустимых значений ГОСТ-32144.

Библиографический список

1. **Кузнецов Н.М.** Рациональное электропотребление на горных предприятиях // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 4. – С. 128-135.
2. **Ляхомский, А.В.** Концептуальное проектирование и инжиниринг повышения энергоэффективности / А.В. Ляхомский, А.Б. Петроченков, Е.Н. Перфильева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. – № 9. – С. 360-364.
3. **Кузнецов, Н.М.** Особенности электропотребления и пути его оптимизации при подземной разработке кимберлитов / Н.М. Кузнецов, А.Н. Егоров, Н.В. Егоров // Горный журнал, 2010. – № 7. – С. 87-89.
4. Power electronics handbook / ed. by M.H. Rashid. San Diego: Academic Press, 2001. – 895 p.
5. The power electronics handbook / ed. by T.L. Skvarenina. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002. – 664 p.
6. **Решетняк, С.Н.** Особенности применения высоковольтных преобразователей частоты для питания синхронных двигателей используемых в качестве приводов подъемных установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 10. – С. 66-71.
7. **Гельман, М.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

8. **Зиновьев, Г.С.** Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
9. **Кузнецов, Н.М.** Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника / Н.М. Кузнецов, А.С. Семенов, Ю.В. Бебихов, А.В. Рыбников // Горный журнал. – 2014. – № 1. – С. 23-26.
10. **Семенов, А.С.** Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике / А.С. Семенов, Н.М. Кузнецов // Измерительная техника. – 2014. – № 4. – С. 31-34.
11. ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 16 с.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

A.N. Egorov¹, A.S. Semenov², O.V. Fedorov³

THE PRACTICAL EXPERIENCE OF THE APPLICATION OF THE FREQUENCY CONVERTER POWER FLEX 7000 IN THE MINING INDUSTRY

ST «Almazavtomatika» PJSC «ALROSA», Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)¹,
Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University n. a.r M.K. Ammosov in Mirny,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)²,
The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev³

Purpose: The purpose of this study is to study high-voltage frequency converters of the Power Flex 7000 series to assess the impact of their operation on the quality of the electricity supply network of the mining enterprise.

Methodology: The methods of analysis include theoretical studies of technical documentation of frequency converters and instrumental monitoring of the parameters of the quality of electrical energy for compliance with the requirements of GOST 32144-2013 (EN 50160: 2010, NEQ).

Results: As a result of the study, distortions of the shape of the curves of input and output currents and voltages were revealed. Although these curves are very close to an ideal sinusoid, the presence of distortions indicates the generation of higher harmonic current and voltage components. Also, when carrying out instrumental monitoring of the electrical energy parameters, it was found that the distortion factor of the voltage curve reaches 42%, which does not meet the requirements of GOST-32144, while the distortion of the current curve does not exceed 5%, which corresponds to the specifications of the manufacturer. At the same time, the analysis of the harmonic voltage components showed that odd harmonics are generated that are not divisible by three. So, for example, the seventeenth harmonic component exceeds 30%, which also does not meet the requirements of GOST. These data can help in justifying the choice of the frequency converters of the Power Flex 7000 series for the electrical drive systems of particular equipment in mining plants.

Conclusions: The Power Flex 7000 frequency inverters have a negative impact on the quality of the electricity supply network, which is beyond the permitted values of GOST-32144. However, it should be noted that these converters are characterized by a very high margin of strength of the power circuit elements, which makes their use in installations requiring a high starting electromagnetic moment on the motor shaft to be very reasonable.

Key words: mining enterprise, electric drive, frequency converter, electric power, supply network, power quality control, voltage, current, harmonics.