УДК 621.314

СОПОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

¹Харитонов Я.С., ²Бebikhov Ю.В., ¹Егоров А.Н.¹*Специализированный трест «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный,
e-mail: delistarmus@mail.ru, kharitonovys@alrosa.ru;*²*Мирнинский политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального
университета им. М.К. Аммосова, Мирный, e-mail: bebikhov.yura@mail.ru*

Статья посвящена исследованиям контроля качества электрической энергии в системах электро-снабжения горных предприятий при использовании систем частотно-регулируемого электропривода на технологических установках. Описаны основные проблемы электромагнитной совместимости электро-приёмников с питающей сетью на горных предприятиях. Перечислены источники искажения качества элек-трической энергии. Приведены показатели качества электрической энергии, нормируемые в соответствии с ГОСТ 32144-2013. Выбраны основные участки подземного рудника и обогатительной фабрики, имеющие в своем перечне электрооборудования мощный высоковольтный частотно-регулируемый электропривод: скиповая подъемная установка, вентилятор главного проветривания, пульпонасосная установка, шаровая мельница. Выбрана методика исследования, заключающаяся в инструментальном контроле показателей качества электроэнергии с помощью современных анализаторов. Показаны требования к погрешностям измерений качества электроэнергии анализаторами, включенными в реестр средств измерений РФ. Пред-ставлены результаты измерения показателей качества электроэнергии по всем объектам, которые подтверж-дают вклад частотно-регулируемого привода в ухудшение электромагнитной совместимости. Выделен ряд уникальных в своем роде линеек преобразователей частоты, позволяющих свести к минимуму искажения показателей качества электроэнергии. Вместе с тем упомянуто о положительном экономическом эффекте от внедрения систем частотно-регулируемого электропривода, заключающихся в экономии электроэнергии и снижении износа оборудования. Сделаны заключения о целесообразности разработки методических ре-комендаций по выбору, превентивной диагностике и ремонту высоковольтных преобразователей частоты.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, система электроснабжения, частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, подземный рудник, обогатительная фабрика

ANALYSIS OF QUALITY CONTROL IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF MINING ENTERPRISES

¹Kharitonov Ya.S., ²Bebikhov Yu.V., ¹Egorov A.N.¹*Specialized Center «Almazavtomatika» PJSC «ALROSA», Mirny,
e-mail: delistarmus@mail.ru, kharitonovys@alrosa.ru;*²*Mirny Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov,
Mirny, e-mail: bebikhov.yura@mail.ru*

The article is devoted to the research of quality control of electric energy in the systems of power supply of mining enterprises when using systems of frequency-controlled electric drive on technological installations. The main problems of electromagnetic compatibility of power consumers with the power supply network at mining enterprises are described. Lists the sources of distortion of the quality of electrical energy. The indicators of the quality of electrical energy, normalized in accordance with GOST 32144-2013, are given. The main areas of the underground mine and concentration plant were selected, having in their list of electrical equipment a powerful high-voltage variable-frequency electric drive: skip lifting installation, main ventilation fan, pulp pump installation, ball mill. A research methodology was selected, consisting in instrumental monitoring of power quality indicators using modern analyzers. Requirements for errors in measuring the quality of electricity by analyzers included in the register of measuring instruments of the Russian Federation are shown. The results of measuring the quality of electricity in all objects are presented, which confirm the contribution of the frequency-controlled drive to the deterioration of electromagnetic compatibility. A number of unique frequency converters of their kind have been identified that minimize the distortion of power quality indicators. At the same time, the positive economic effect from the introduction of the frequency-controlled electric drive systems, which conserve energy and reduce equipment wear, has been mentioned. Conclusions about the feasibility of developing guidelines for the selection, preventive diagnostics and repair of high-voltage frequency converters.

Keywords: electromagnetic compatibility, power quality, power supply system, variable frequency drive, frequency converter, underground mine, concentration plant

Качество электрической энергии ха-рактеризуют термином «электромагнитная совместимость», под которым понимают способность электрического приёмника нормально функционировать в его электро-

магнитной среде (в электрической сети, к которой он присоединен), не создавая не-допустимых электромагнитных помех для других электрических приёмников, функ-ционирующих в той же среде [1, 2].

Проблема электромагнитной совместимости электроприёмников с питающей сетью на промышленных предприятиях остро возникла в связи с широким использованием мощных преобразователей частоты, дуговых сталеплавильных печей, сварочных установок, энергосберегающих ламп освещения, которые при всей своей экономичности и технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на качество электроэнергии [3, 4].

Показатели и нормы качества электрической энергии (КЭ) в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц устанавливает ГОСТ 32144-2013 [5]. Согласно ему нормируются следующие показатели КЭ:

- отклонение частоты;
- медленные изменения напряжения;
- колебания напряжения и фликер;
- несинусоидальность напряжения;
- несимметрия напряжений в трехфазных системах;
- напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям;
- прерывания напряжения;
- провалы напряжения и перенапряжения;
- импульсные напряжения.

Величины допустимых отклонений вышеуказанных параметров приведены в табл. 1.

Для анализа результатов контроля качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий при использовании частотно-регулируемого привода (ЧРП) выберем ряд основных участков подземного рудника и обогатительной фабрики, сопоставим и проанализируем измеренные показатели качества электроэнергии с 2013 по 2017 г. Объектами исследования станут системы частотно-регулируемого электропривода скиповой подъемной установки и вентилятора главного проветривания рудника, пульпо-насосной установки обогатительной фабрики и шаровой мельницы закладочного комплекса.

Материалы и методы исследования

Основные методы исследования заключаются в снятии показаний с внедренных ранее на объекты систем автоматизированного мониторинга показателей качества электроэнергии [6, 7], а также в инструментальном контроле показателей качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 в течение 7 суток с 10-минутным интервалом [8]. Контроль проводился с помощью анализатора качества электрической энергии типа PowerQ4 M12592 на вводных ячейках. Требования, предъявляемые к анализаторам КЭ, представлены в табл. 2.

Таблица 1

Допустимые отклонения показателей качества электроэнергии

№ п/п	Показатель	Максимально допустимое отклонение в течение времени		Продолжительность измерения
		95 %	100 %	
1	Отклонения частоты	$\pm 0,2$ Гц	$\pm 0,4$ Гц	1 неделя (интервал времени 10 с)
2	Медленные изменения напряжения	–	$\pm 10\%$ от номинального	1 неделя (интервал времени 10 мин)
3	Кратковременная доза фликера	–	1,38	1 неделя (интервал времени 10 мин)
4	Длительная доза фликера	–	1,0	1 неделя (интервал времени 2 ч)
5	Гармонические составляющие напряжения (значения суммарных коэффициентов при напряжении 6 кВ)	5,0%	8,0%	1 неделя (интервал времени 10 мин)
6	Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям	2%	4%	1 неделя (интервал времени 10 мин)
7	Кратковременные и длительные прерывания напряжения	–	< 3 мин и > 3 мин соответственно	1 неделя (интервал времени 10 мин)
8	Провалы напряжения и перенапряжения	–	Прил. А, табл. А1–А4 [21]	1 неделя (интервал времени 10 мин)
9	Импульсные напряжения	–	Прил. Б, табл. Б1–Б2 [21]	1 неделя (интервал времени 10 мин)

Таблица 2

Требования к погрешностям измерений анализаторов

№ п/п	Наименование показателя	Неопределенность измерений	
		Класс А	Класс S
1	Отклонение частоты	$\pm 0,01$ Гц	$\pm 0,05$ Гц
2	Медленные изменения напряжения	$\pm 0,2\%$ (приведенная к $U_{\text{ном}}$)	$\pm 0,5\%$ (приведенная к $U_{\text{ном}}$)
3	Кратковременная доза фликера	$\pm 5\%$ (относительная)	$\pm 10\%$ (относительная)
4	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения	$\pm 0,05\%$ (абс.) $\pm 5,0\%$ (отн.)	$\pm 0,15\%$ (абс.) при $K_U < 3$ $\pm 5,0\%$ (отн.) при $K_U > 3$
5	Коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям	$\pm 0,15\%$ (абсолютная)	$\pm 0,3\%$ (абсолютная)
6	Длительность провала напряжения и перенапряжения	± 20 мс	± 40 мс
7	Глубина провала напряжения	$\pm 0,2\%$ (приведенная к $U_{\text{ном}}$)	$\pm 1,0\%$ (приведенная к $U_{\text{ном}}$)

Анализатор PowerQ4 MI2592 производится фирмой METREL (Словения) и работает в соответствии со стандартом МЭК 61000-4-30, класс S. Анализатор утвержден в качестве средства измерения в реестре федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ за номером 44343-10.

Помимо мониторинга и инструментального контроля для анализа показателей качества электроэнергии стали чаще применять методы математического моделирования систем электроснабжения, которые обеспечивают большую точность измерений при разработке имитационных моделей [9–11]. Но в нашей работе этот метод не применяется, так как имеется возможность доступа на объекты горных предприятий и снятие реальных показателей.

Результаты исследования и их обсуждение

Скиповая подъемная установка (СПУ) рудника обеспечивает доставку груза и людей в/из шахты под землю и на поверхность, приводится в движение двигателем постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 1250 кВт под управлением тиристорного выпрямителя DCS600 и относится к электропотребителям первой категории по бесперебойности электроснабжения. Измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на СПУ проводились на протяжении 2013 г. с помощью разработанной и внедренной на руднике системы непрерывного мониторинга ПКЭ. В результате накопления и анализа данных было выявлено систематическое превышение допустимой величины искажения формы кривой напряжения (не синусоидальность), а также превышение допустимых значений коэффициентов 23, 25, 35, 37 гармонических составляющих (рис. 1).

Шаровая мельница технологического закладочного комплекса используется для измельчения (подготовки) материала для за-

кладки выработанного пространства на добычных участках рудника. Мельница оснащена синхронным двигателем мощностью 1000 кВт и (с недавних пор) преобразователем частоты ACS2000. До внедрения в систему электропривода шаровой мельницы высоковольтного преобразователя частоты (измерения 2014–2015 гг.) при её запуске наблюдались не просто превышения пускового тока и провалы напряжения, а это приводило к отключению питающих ячеек и вывода из работы другого основного оборудования (рис. 2), что вызывало простои оборудования и необоснованные затраты.

Главная вентиляционная установка (ГВУ) рудника обеспечивает подземную его часть свежим воздухом и является одним из самых мощных единичных потребителей электроэнергии на руднике, её мощность составляет 2000 кВт. Она приводится в движение асинхронным двигателем, управляемым высоковольтным преобразователем частоты (ВПЧ) Power Flex 7000. До замены на новые агрегаты, которая произошла в 2016 г., ГВУ приводилась в движение синхронным двигателем и управлялась преобразователем частоты ПЧВС, которые к этому времени морально устарели. В конце 2016 г. после окончания внедрения новой системы электропривода ГВУ результаты замеров потребляемой мощности, конечно же, показали существенную экономию электроэнергии за счет использования более современной системы автоматического регулирования. В это же время результаты контроля качества электроэнергии показали, что коэффициент искажения кривой напряжения при работе ВПЧ практически достигает значения 42 %, что не соответствует требованиям ГОСТ-32144 (рис. 3) [12, 13].

Рис. 1. Коэффициенты гармонических составляющих межфазных напряжений

Рис. 2. Запуск шаровой мельницы при работающих подъемных установках и клинкерной мельнице

Рис. 3. Графики суммарных коэффициентов искажения кривых напряжения и токов на входе преобразователя частоты Power Flex 7000

Рис. 4. Графики изменения потребляемого тока и суммарного коэффициента искажения формы кривой напряжения

Пульпонасосная установка (ПНУ) обогатительной фабрики служит для оборотного водоснабжения водно-шламового хозяйства и состоит из насоса, преобразователя частоты ACS5000 и асинхронного двигателя мощностью 1600 кВт [14]. Преобразователь частоты ACS5000 серийно выпускается широко известной корпорацией ABB и является уникальным продуктом на рынке высоковольтных преобразователей частоты, так как он сочетает в себе ряд инновационных технических решений. С целью анализа влияния ВПЧ на питающую сеть на вводной высоковольтной ячейке проводился инструментальный контроль показателей качества электроэнергии. Контроль параметров электрической энергии производился в соответствии с ГОСТ-32144 в течение 7 суток с 10-минутным интервалом в конце 2017 г. Анализ результатов (рис. 4) показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих варьируется от 2,4% до 6,6%, то есть 100% измерений не выходят за пределы значения 8%, что соответствует требованиям ГОСТ-32144, но 21,5% измерений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения превышают значение 5%, что говорит о несоответствии требованиям ГОСТ-32144.

Однако если сопоставить график изменения потребляемого системой электропривода тока с графиком изменения суммарного коэффициента гармонических

составляющих напряжения можно заметить, что уже до начала работы электропривода питающее напряжение искажено. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения достигает значения 4%. Последнее говорит о том, что вклад в искажение кривой напряжения питающей сети преобразователя частоты ACS5000 сравнительно незначительный, что подтверждает оправданность применения сложной схемы преобразования.

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы об использовании частотно-регулируемого привода на установках промышленных предприятий:

1. В результате внедрения ЧРП получаем положительный экономический эффект за счет снижения затрат на обслуживание и ремонт электрооборудования и экономию электроэнергии [15].

2. В ходе эксплуатации таких систем наблюдаем ухудшение ПКЭ питающей сети, вызванное искажением формы кривой напряжения, появление несинусоидальности кривой напряжения и тока, отклонение коэффициентов гармонических составляющих от требуемых норм.

В заключение стоит отметить, что не все преобразователи частоты вносят значительный вклад в ухудшение электромагнитной совместимости, но при этом такие модели будут иметь более высокую стоимость.

В связи с этим на крупных промышленных предприятиях имеется необходимость разработки собственных методических рекомендаций по выбору, превентивной диагностике и ремонту мощных высоковольтных преобразователей частоты, которые позволят обоснованно выбирать системы ЧРП для конкретных технологических установок [16, 17].

Список литературы

1. Карташев И.И., Тульский В.Н., Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография. М.: Издательство «Перо», 2013. 142 с.
2. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4–2. С. 295–299.
3. Семёнов А.С., Матул Г.А., Хазиев Р.Р., Шевчук В.А., Черенков Н.С. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трёхфазного источника питания // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9–6. С. 1210–1215.
4. Семёнов А.С., Кузнецов Н.М. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 31–34.
5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ГОСТ 32144-2013 (EN 50160: 2010, NEQ). М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 19 с.
6. Feng D., Lu M., Lan J., Sun L. Research on switching operation transient electromagnetic environment of substations in a coal mine. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016. Т. 10. № 13. P. 3322–3329. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0292.
7. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine. *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 57. № 4. P. 417–420. DOI: 10.1007/s11018-014-0470-8.
8. Mikheev G.M., Ivanova T.G., Konstantinov D.I., Turdiev A.K. Diagnostics and an on-load operation algorithm of high-speed voltage regulators. *Russian Electrical Engineering*. 2017. Vol. 88 (7). P. 423–429. DOI: 10.3103/S1068371217070112.
9. Semenov A.S., Khubieva V.M., Kharitonov Ya.S. Mathematical Modeling of Static and Dynamic Modes DC Motors in Software Package MATLAB. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/RusAutoCon.2018.8501666.
10. Семёнов А.С., Егоров А.Н. Особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий // *Каротажник*. 2018. № 11 (293). С. 85–99.
11. Семёнов А.С. Исследование режимов работы однофазного трансформатора путем математического моделирования // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 5–3. С. 391–395.
12. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В., Харитонов Я.С. Анализ энергоэффективности главной вентиляторной установки рудника по добыче алмазосодержащих пород // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2018. № 2 (38). С. 60–72.
13. Семёнов А.С., Бондарев В.А. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от преобразователя частоты // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 4–1. С. 112–117.
14. Semenov A.S., Egorov A.N., Fedorov O.V. The Analysis of the Practice of Using of High-Voltage Frequency Converters ACS5000. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602676.
15. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Федоров О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей Республики Саха (Якутия) // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 46–55.
16. Семёнов А.С. Определение нелинейных нагрузок в системе электроснабжения подземного рудника // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 9–3. С. 445–451.
17. Семёнов А.С., Самсонов А.В., Матул Г.А., Черенков Н.С., Загоило С.А., Мартынова А.Б. Исследование качества электроэнергии при проведении энергоаудита учебного корпуса // *Естественные и технические науки*. 2015. № 10 (88). С. 331–334.