
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_4

Л.И. Коверникова^{1,2}, Н.Х. Буй²**ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМБИНАТА
СОРТИРОВКИ УГЛЯ ОДНОГО ИЗ УГОЛЬНЫХ
КАРЬЕРОВ ВЬЕТНАМА**¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН² Иркутский национальный исследовательский технический университет

Анализируется качество электрической энергии в узле присоединения к питающей сети комбината сортировки угля на вьетнамском угольном карьере. Представлены схема системы электроснабжения сортировочного комбината, график его работы, состав технологического и электрического оборудования. Приведены требования нормативных документов к качеству электрической энергии, информация о приборе, использовавшемся для измерения показателей качества электрической энергии и параметров режима. Представлены графики активных и реактивных мощностей, потребляемых сортировочным комбинатом, статистические оценки реактивных мощностей и коэффициентов мощности. Величина коэффициента мощности одной из фаз меньше нормативного значения. Приведены графики коэффициентов отклонения напряжений и суммарных коэффициентов гармоник напряжений трех фаз. Отклонения напряжений не превышают норму, а суммарные коэффициенты гармоник – превышают более, чем в 2,5 раза. Статистические оценки коэффициента гармонических составляющих напряжения одной из фаз показывают, что нормативное значение для некоторых гармоник превышено. Осциллограммы фазных токов сильно искажены, хотя коэффициенты гармонических составляющих тока не превышают норму. Для улучшения качества электрической энергии предложено использовать активный фильтр гармоник. Получены оценки величин реактивной мощности, которую фильтр должен генерировать для повышения коэффициента мощности нагрузки сортировочного комбината, и полной мощности гармоник для $n > 1$ для устранения гармоник.

Ключевые слова: активный фильтр, гармоники, измерения, качество электрической энергии, коэффициент мощности.

1. Введение

Добыча угля во Вьетнаме является важнейшей отраслью экономики страны, а угольные шахты и карьеры – центрами промышленных районов. Их системы электроснабжения имеют сложную топологию, много уровней напряжений, нагрузки различных типов и мощностей. В шахтах и карьерах, а также на относящихся к ним комбинатах сортировки угля, новое технологическое и электрооборудование работает параллельно с физически и технологически устаревшим. Часть электрооборудования, в том числе, большой мощности, имеет нелинейные вольтамперные характеристики, потребляется несинусоидальный ток, что становится причиной низкого качества электрической энергии.

На комбинатах сортировки угля основным электрооборудованием являются асинхронные двигатели, приводящие технологическое оборудование в работу. Большую часть из них представляют асинхронные двигатели с частотным регулированием, являющиеся источниками гармоник. Гармоники напряжений и токов, создавая дополнительные потери активной мощности (энергии), вызывают ускоренное старение изоляции электрооборудования, магнитной системы и, как результат, сокращение срока его службы. Увеличение суммарного коэффициента гармоник напряжения до 10-15 % вызывает снижение коэффициента мощности и вращающего момента на валу асинхронных двигателей [1]. Активная энергия гармоник рассеивается в электрооборудовании и элементах сети, вызывая потери электрической энергии, как следствие, дополнительные финансовые расходы за потребленную электроэнергию [2]. Также потребители вынуждены платить штрафы, если коэффициент мощности нагрузки меньше установленного нормативного значения [3]. Обе проблемы могут быть решены при использовании активного фильтра гармоник [4-7]. Активный фильтр способен генерировать реактивную мощность для повышения коэффициента мощности и токи гармоник для снижения искажения кривых токов и напряжений.

В статье представлены результаты измерений показателей качества электроэнергии и параметров режима в узле присоединения системы электроснабжения сортировочного комбината к питающей сети. Объектом исследования является угольный карьер с комбинатом сортировки угля компании «Kua Ong-Vinakomin». Выполнены оценки величин реактивной мощности и полной мощности гармоник, которые должен генерировать активный фильтр, что улучшает качество электрической энергии, и, следовательно, уменьшает финансовые потери компании «Kua Ong-Vinakomin».

II. Характеристика системы электроснабжения комбината сортировки угля

Схема системы электроснабжения комбината приведена на рис. 1.

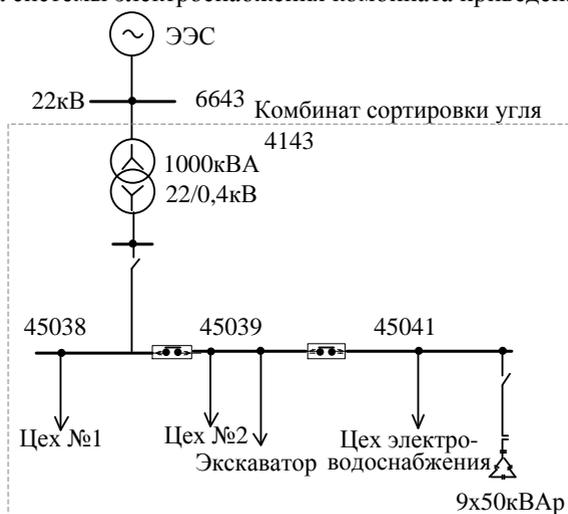


Рис. 1. Схема системы электроснабжения сортировочного комбината

Электроснабжение комбината сортировки угля осуществляется от двухтрансформаторной подстанции 110 кВ, получающей электрическую энергию по двум линиям электропередачи 110 кВ от двух независимых источников. Один из трансформаторов является резервным. От шин 22 кВ подстанции по двум линиям электропередачи 22 кВ электрическая энергия поставляется непосредственно в схему электроснабжения комбината в узле 6643. На рис. 1 данное оборудование входит в состав электроэнергетической системы (ЭЭС). Понижающий трансформатор 22/0,4 кВ мощностью 1 000 кВА принадлежит системе электроснабжения комбината сортировки угля. От шин 0,4 кВ трансформатора электрическую энергию получают два цеха сортировки угля (№ 1 и № 2) и цех электро-водоснабжения. Уголь в карьере добывается открытым способом и автотранспортом доставляется на склад комбината. На складе он загружается экскаватором на конвейер (рис. 1), с помощью которого доставляется на сортировочный комбинат. В сортировочных цехах куски угля сортируются по величине. Сортировочные цеха имеют различное технологическое оборудование – вибраторы, сита с отверстиями различных размеров, дробилки, насосы, конвейеры и другое оборудование. Технологическое оборудование сортировочного цеха № 1 приводится в действие 17 асинхронными двигателями мощностью от 4 до 50 кВт. Переработка угля продолжается в цехе № 2. При

осуществлении технологического процесса здесь используются 18 асинхронных двигателей мощностью от 4 до 185 кВт. Цех электроводоснабжения осуществляет освещение сортировочного комбината, подачу воды, транспортировку угля на склад после сортировки. Для этого в цехе используются 23 асинхронных двигателя мощностью от 4 до 160 кВт. Большинство асинхронных двигателей имеют частотное регулирование скорости. Схема асинхронного двигателя с частотным регулированием приведена на рис. 2 [8]. Они потребляют несинусоидальный ток и являются источниками гармоник и интергармоник тока.

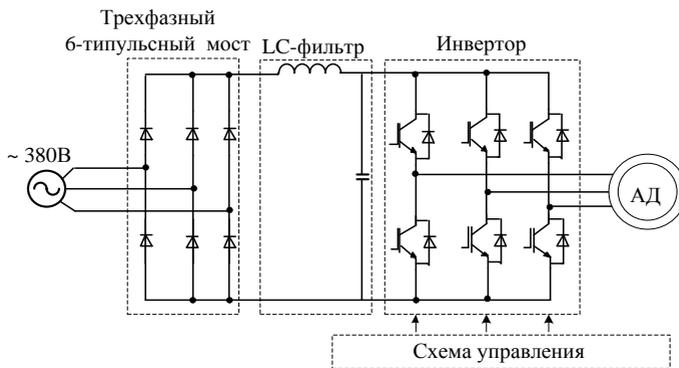


Рис. 2. Схема асинхронного двигателя с частотным регулированием

Основной производственный процесс сортировки угля осуществляется с 7 часов утра до 17 часов вечера. После этого до 7 часов следующего утра основное технологическое оборудование не работает. В это время в работе находится лишь небольшая часть оборудования цеха № 2, выполняющего специальный технологический процесс, и электрооборудование цеха электро-водоснабжения.

III. Требования нормативных документов Вьетнама к качеству электрической энергии

Во Вьетнаме требования к качеству электрической энергии регламентируются нормативными документами [3, 9]. Они характеризуют искажение как напряжения, так и тока. В табл. 1 приведены нормативные значения для следующих показателей: δU – отклонение величины напряжения от номинального значения; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения; $K_{U(n)}$ – коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения; $K_{I(n)}$ – коэффициент n -ой гармонической составляющей тока.

Таблица 1.
Нормативные значения показателей

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$\delta U, \%$	$K_U, \%$	$K_{U(n)}, \%$	$K_{I(n)}, \%$
110	$\leq \pm 5,0$	$\leq 3,0$	$\leq 1,5$	$\leq 12,0$
0,1–35	$\leq \pm 5,0$	$\leq 6,5$	$\leq 3,0$	$\leq 12,0$

Также установлено требование, касающееся величины коэффициента мощности нагрузки ($\cos\varphi$) в узле присоединения потребителя электрической энергии к питающей сети. Величина $\cos\varphi$ должна соответствовать нормативному значению, установленному в техническом регламенте [3], т.е., $\cos\varphi \geq 0,85$.

IV. Результаты измерений показателей качества электрической энергии и параметров режима

Измерения, для которых использовался прибор PQ-Vox150 [10], проводились на стороне низкого напряжения понижающего трансформатора 22/0,4 кВ в узле 4 143 в течение 24 часов с интервалом измерений показателей качества электрической энергии и параметров режима 1 с. За 24 часа измерений было выполнено 86 964 замера.

На рис. 3 и 4 приведены графики активных и реактивных мощностей, потребляемых сортировочным комбинатом в течение 24 часов. Отмечено время перерыва в работе, все остальное время оборудование комбината находится в действующем состоянии. В табл. 2 приведены статистические оценки измеренных величин реактивных мощностей и коэффициентов мощности трех фаз. Макс и Мин – максимальное и минимальное значения, МО – математическое ожидание. Из таблицы следует, что в фазе В среднее значение коэффициента мощности равно 0,82, минимальное – 0,73, что меньше нормативного значения 0,85, установленного в [9]. Из анализа измеренных значений $\cos\varphi$ за 24 часа также следует, что 58 % всех измеренных значений коэффициента мощности в фазе В имеют величины меньше нормативного значения. По этой причине каждый месяц компания, владеющая карьером и комбинатом, вынуждена платить штраф.

Таблица 2.

Статистические оценки величин реактивных мощностей и $\cos\varphi$

Значение	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_A$	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_B$	$Q, \text{квар}$	$\cos\varphi_C$
Макс	127,1	0,98	173,0	0,93	136,2	1,00
Мин	15,0	0,90	43,7	0,73	0,0	0,91
МО	60,0	0,94	97,4	0,82	57,1	0,96
Норма		$\geq 0,85$		$\geq 0,85$		$\geq 0,85$

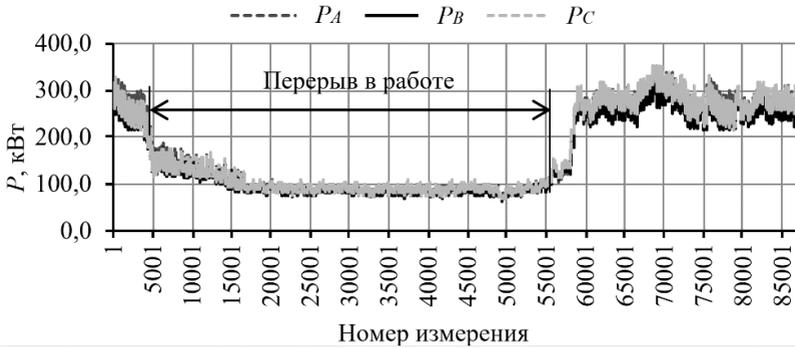


Рис. 3. Графики активных мощностей в трех фазах

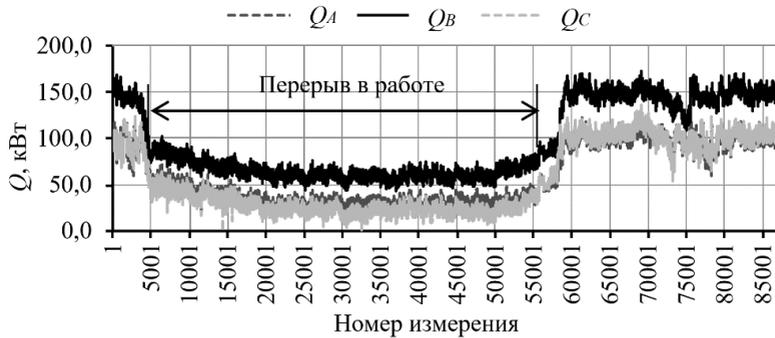


Рис. 4. Графики реактивных мощностей в трех фазах

Графики изменения величин напряжений в трех фазах в течение времени измерений показаны на рис. 5. Величины напряжений во всех фазах увеличиваются во время перерыва в работе комбината.

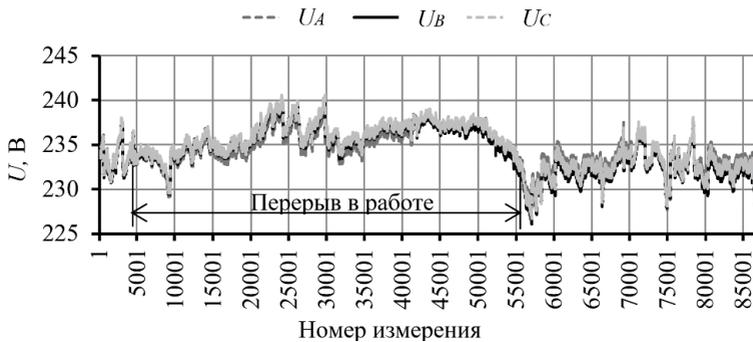


Рис. 5. Графики изменения величин напряжений в трех фазах

На рис. 6 приведены графики изменения δU в трех фазах. Несмотря на увеличение фазных напряжений во время перерыва в работе, величины показателя δU во всех фазах не выходят за нормативные значения $\pm 5\%$.

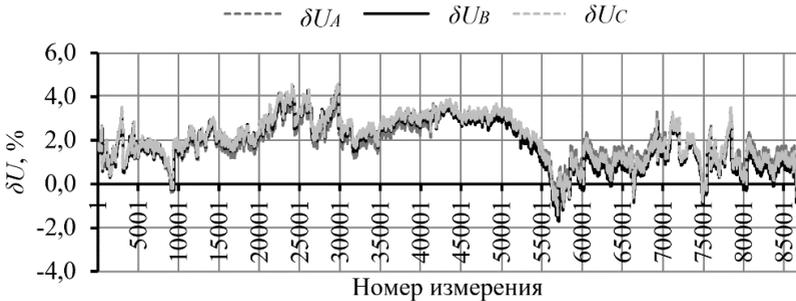


Рис. 6. Графики изменения показателя δU в трех фазах

На рис. 7 приведен график измеренных величин суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в фазе А. Нормативное значение коэффициента равно $6,5\%$ [9]. Из графика следует, что большую часть времени измерений показатель превышает нормативное значение. Во время перерыва в работе нормативное значение превышено более, чем в 2,5 раза.

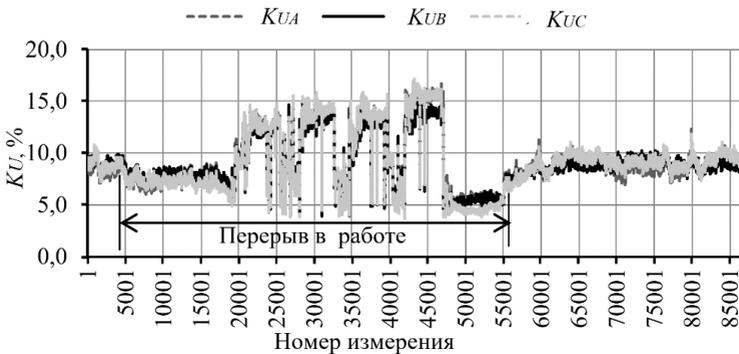


Рис. 7. Графики изменения показателя K_U в трех фазах

В табл. 3 приведены статистические оценки показателя $K_{U(m)}$ в фазе А для гармоник, на которых наиболее часто превышаются нормативные значения. В таблице обозначено: р – рабочее время, п – время перерыва в работе. Величины показателя, превышающие нормы, выделены жирным шрифтом.

Таблица 3.
Статистические оценки $K_{U(n)}$ в фазе А

Значение, %	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
Макс (р)	2,5	6,2	11	1,9	3,0	2,1	3,3	1,6	2,9	1,9
Мин (р)	0,6	1,1	3,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
МО (р)	1,5	3,4	7,1	1,0	0,6	0,7	1,4	0,5	0,9	0,6
Макс (п)	2,1	12,7	12,8	1,6	4,6	1,9	1,5	1,5	3,1	1,8
Мин (п)	0,5	0,1	1,4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
МО (п)	1,2	5,4	6,9	0,8	1,8	0,5	0,7	0,4	0,8	0,4
Норма	≤ 3									

Из таблицы видно, что превышения имеют место на канонических гармониках для трехфазной 6-типульсной схемы выпрямления, которая применяется в асинхронных двигателях с частотным регулированием, а именно, на 5, 7, 11, 23-й. Превышение имеет место также на 17-й гармонике. На рис. 8 приведен скриншот экрана прибора, проводившего измерения, на котором представлены осциллограммы токов трех фаз. Осциллограммы показывают, что формы кривых токов несинусоидальные. Действующие значения токов в фазах равны 60,4 А; 57,4 А; 53,5 А.

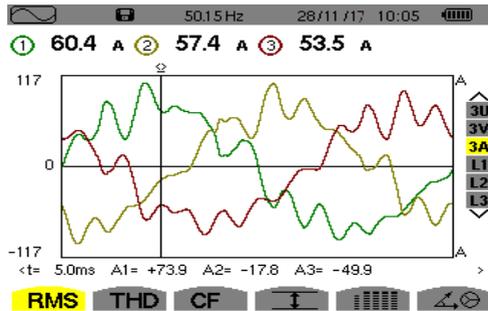


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов

В табл. 4 приведены статистические оценки коэффициентов n -х гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$ для гармоник, на которых чаще всего нарушаются нормативные значения. Но из данных, приведенных в таблице, следует, что измеренные величины $K_{I(n)}$ не превышают норматив-

ное значение 12 %, установленное в [3]. Наибольшие значения коэффициента имеет на 3, 5, 7-й гармониках (выделены жирным шрифтом) во время перерыва в работе.

Таблица 4.
Статистические оценки $K_{I(n)}$ в фазе А

Значение, %	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
Макс (р)	5,6	6,0	3,4	2,2	1,2	1,5	1,9	1,3	2,7	1,1
Мин (р)	1,6	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
МО (р)	3,3	3,6	1,4	1,0	0,3	0,6	0,7	0,3	0,5	0,3
Макс (п)	7,1	6,8	6,7	2,9	3,9	1,9	2,3	1,9	2,5	2,4
Мин (п)	1,7	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0
МО (п)	4,0	2,0	2,8	1,6	1,3	0,7	1,0	0,5	1,0	0,5
Норма	≤ 12									

Результаты анализа данных показывают, что в узле присоединения системы электроснабжения сортировочного комбината к питающей сети имеются проблемы с синусоидальностью напряжения и коэффициентом мощности нагрузки. Для улучшения качества электрической энергии в узле 4143 может быть установлен активный фильтр гармоник.

V. Оценка величины реактивной мощности, которую должен генерировать активный фильтр

Выше было отмечено, что в соответствии с [3] сортировочный комбинат должен иметь коэффициент мощности нагрузки равный или больше 0,85. В приказе компании [11], владеющей карьером и сортировочным комбинатом, указывается на необходимость иметь коэффициент мощности равным или больше 0,95. По результатам измерений в фазе В значение $\cos\varphi$ составляет лишь 0,73. Для обеспечения требуемого $\cos\varphi$ нужно компенсировать недостаток реактивной мощности, что может быть выполнено активным фильтром гармоник. Реактивная мощность, которую должен дополнительно генерировать активный фильтр, определяется как

$$Q_{\text{ком}} = P \cdot (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ком}}$ – недостающая реактивная мощность; P – активная мощность нагрузки; φ_1 – фазовый угол между напряжением и током до компенсации реактивной мощности; φ_2 – фазовый угол между напряжением и током

после компенсации реактивной мощности, соответствующий $\cos\varphi = 0,95$. Вычисленные значения реактивных мощностей для каждой из трех фаз А, В, С оказались равными: 32,2 квар, 134,0 квар, 39,4 квар. Таким образом, активный фильтр в каждой фазе должен иметь возможность генерировать реактивную мощность величиной не менее 134,0 квар.

VI. Оценка величины полной мощности гармоник, которую должен генерировать активный фильтр

Полная мощность всех гармоник для $n > 1$ вычисляется в соответствии с [12]:

$$S_{n\phi\Sigma} = \sum_{n=2}^{40} U_{n\phi} \cdot I_{n\phi}, \quad (2)$$

где $U_{n\phi}$ – фазное действующее значение напряжения n -ой гармоники, $I_{n\phi}$ – фазное действующее значение тока n -й гармоники.

Как указывалось ранее, за 24 часа было выполнено 86 964 замеров. Для каждой фазы каждого из них по формуле (2) была вычислена мощность $S_{n\phi\Sigma}$. Затем для каждой фазы были выбраны максимальные значения полной мощности гармоник. Максимальные значения вычисленных полных мощностей гармоник по фазам А, В и С оказались следующими: 14,4 кВА; 12,3 кВА и 16,8 кВА. Таким образом, активный фильтр для устранения токов гармоник в каждой фазе должен иметь мощность не менее 17 кВА.

VII. Выводы

По результатам измерений показатели качества электрической энергии $K_{U(n)}$ и K_U превышают нормативные значения, установленные нормативными документами Вьетнама. Коэффициент мощности нагрузки меньше установленного нормативного значения. Для повышения качества электрической энергии на шинах трансформатора 22/0,4 кВ, питающего сортировочный комбинат, требуется установка активного фильтра гармоник, который должен в каждой фазе иметь возможность генерировать реактивную мощность не менее 134 квар и полную мощность не менее 17 кВА.

© Коверникова Л.И., 2020

© Буй Н.Х., 2020

Библиографический список

- [1] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
- [2] Czarnacki L.S. Working, reflected and detrimental active powers // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6. Is. 3. Pp. 233-239.
- [3] National Technical Regulation on Electric Power. Vietnam, 2015.
- [4] Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999. Vol. 46. No. 5. Pp. 960-971.
- [5] El-Habrouk M., Darwish M.K, Mehta P. Active power filter: A review // IEEE Proceedings – Electric Power Applications. 2000. Vol. 147. No. 5. Pp. 403-413.
- [6] Orts S., Gimeno-Sales F.J., Abellan A., Segui-Chilet S., Alcaniz M. Achieving maximum efficiency in three-phase systems with a shunt active power compensator based on IEEE Std. 1459 // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 23. Is. 2. Pp. 812-822.
- [7] Husen S.S, Patel P.J. A literature review and industrial survey on active power filter // International Journal of Engineering Development and Research. 2014. Vol. 2. Is. 1. Pp. 118-125.
- [8] Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электрика. 2008. № 10. С. 3-11.
- [9] Circular No. 39/2015/TT-BCT of 11/18/2015 of the Ministry of Industry and Trade of Vietnam for the distribution of electrical energy.
- [10] Operating Manual Network Analyzer PQ-Box 150. Power-Quality Evaluation Software [Электронный ресурс]. URL: <http://www.a-eberle.de> (дата обращения 01.02.2020).
- [11] Order No. 25 of 10/22/2018 of the «Kua Ong-Vinakomin» Company of Vietnam for the modernization of the electrical system.
- [12] Emanuel A.E. Power definitions and physical mechanism of power flow. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. – 280 p.

L.I. Kovernikova^{1,2}, N.H. Bui²
**PROBLEMS OF POWER QUALITY IN ELECTRICAL
SUPPLY SYSTEM OF COAL SORTING PLANT
IN ONE COAL QUARRY OF VIETNAM**

¹ Melentiev Energy Systems Institute
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Irkutsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

Abstract. Coal mining is the most important economic sector in Vietnam. Coal mined in mines and quarries. Their power supply systems have a complex topology, many voltage levels and loads of various types. New technological and electrical equipment works in parallel with the outdated one. Coal mines and quarries have electrical equipment with non-linear current-voltage characteristics. It consumes a non-sinusoidal current, impairing the power quality. Therefore, there is the low power quality in industrial areas with coal mining. The article is devoted to the analysis of the power quality in the node of connection to the supply network of the coal sorting plant of one of the coal quarries. The scheme of the power supply system of the sorting plant, its work schedule, the composition of technological and electrical equipment are presented. The requirements of regulatory documents for the power quality, information about the device used to measure indexes of the power quality and mode parameters are given. The graphs of active and reactive power consumed by the sorting plant, statistical estimates of reactive capacities and power factors for three phases are presented. Oscillograms of phase currents are strongly distorted, although the n -th harmonic factors of the current do not exceed the normative value. It is proposed to use an active filter to improve the power quality. Estimates of the values of the reactive power of the fundamental frequency, which the active filter must generate to increase the power factor, and the apparent power of the not fundamental frequency to eliminate harmonics are given.

Keywords: active filter, harmonics, measurements, power factor, power quality.

References

- [1] I.V. Zhezhenko, *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 2010 (in Russian).
- [2] L.S. Czarniecki, «Working, reflected and detrimental active powers», *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, is. 3, pp. 233-239, March 2012.
- [3] National Technical Regulation on Electric Power. Vietnam. 2015.
- [4] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, «A review of active filters for power quality improvement», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct. 1999.

- [5] M.El. Habrouk, M.K. Darwish, P. Mehta, «Active power filter: A review», *IEEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 147, no. 5, pp. 403-413, Sept. 2000.
- [6] S. Orts, F.J. Gimeno-Sales, A. Abellan, S. Segui-Chilet and M. Alcaniz, «Achieving maximum efficiency in three-phase systems with a shunt active power compensator based on IEEE Std. 1459», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, is. 2, pp. 812-822, Apr. 2008.
- [7] S.S. Husen and P.J. Patel, «A literature review and industrial survey on active power filter», *International journal of engineering development and research*, vol. 2, no. 1, pp. 118-125, 2014.
- [8] I.V. Zhezhelenko, «Electromagnetic compatibility in systems for power supply of industrial enterprises», *Elektrika*, no. 10, pp. 3-11, 2008.
- [9] Circular No. 39/2015/TT-BCT of 11/18/2015 of the Ministry of Industry and Trade of Vietnam for the distribution of electrical energy.
- [10] Operating Manual Network Analyzer PQ-Box 150. Power-Quality Evaluation Software. [Online]. Available at: <http://www.a-eberle.de>.
- [11] Order No. 25 of 10/22/2018 of the «Kua Ong-Vinakomin» Company of Vietnam for the modernization of the electrical system.
- [12] A.E. Emanuel, *Power definitions and physical mechanism of power flow*. John Wiley & Sons Ltd, 2010.