

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ
НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОБЪЕКТАХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

О.В. ФЕДОРОВ*, А.С. СЕМЁНОВ, А.Н. ЕГОРОВ*****, В.М. ХУБИЕВА*******

***НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород**

****Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Мирный**

*****АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный**

******Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва**

В работе произведен технико-экономический расчет и представлено обоснование, подтверждающее целесообразность внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах подземного рудника. Система непрерывного мониторинга была внедрена на участке скипового подъема и участке дробления технологического закладочного комплекса рудника «Мир» АК «АЛРОСА» (ПАО) и за год собранных измерений выявила ряд проблем, связанных с неэффективным расходом электроэнергии. Предложены меры по уменьшению этих расходов, вычислен экономический эффект от внедрения системы.

Ключевые слова: горное предприятие, рудник, электроэнергия, показатели качества, система мониторинга, потери, трансформатор, технико-экономические показатели.

Введение

В настоящее время важной задачей для решения вопросов эффективного использования электроэнергии является создание системы управления качеством электрической энергии. Результаты работы такой системы будут в значительной степени влиять на инвестиционные программы компаний [1]. При контроле качества определяется соответствие значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) установленным нормам [2]. Контроль является первым этапом управления качеством, на котором определяется текущее техническое состояние, выявляются имеющиеся проблемы.

Анализ качества электроэнергии проводится с целью определения причин и выявления источников ухудшения качества и является необходимым этапом управления качеством при несоответствии значений ПКЭ нормам качества. На каждом предприятии необходимо определить параметры электроэнергетических величин, которые целесообразно контролировать для наиболее эффективного управления качеством электроэнергии [3]. Для этого необходимо выполнить следующие задачи: определить места установки средств измерения (СИ) ПКЭ, организовать непрерывный мониторинг показателей качества электроэнергии, проводить постоянный анализ полученных данных по результатам мониторинга.

Система непрерывного мониторинга ПКЭ

Примером выполнения указанных задач стало создание экспериментальной системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на двух объектах рудника по добыче алмазосодержащих пород: участке скипового подъема и участке дробления технологического закладочного комплекса [4]. Разработка и внедрение системы проходило при совместной работе специалистов энергетических

служб Мирнинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) и научно-исследовательского коллектива кафедры электрификации и автоматизации горного производства [5].

В состав такой системы мониторинга входят следующие компоненты: измерительные трансформаторы напряжения, измерительные трансформаторы тока, измерители показателей качества электроэнергии, информационно-вычислительные комплексы, связующие компоненты, предназначенные для передачи данных в диспетчерский пункт. Структурная схема экспериментальной системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии объектов рудника изображена на рис. 1.

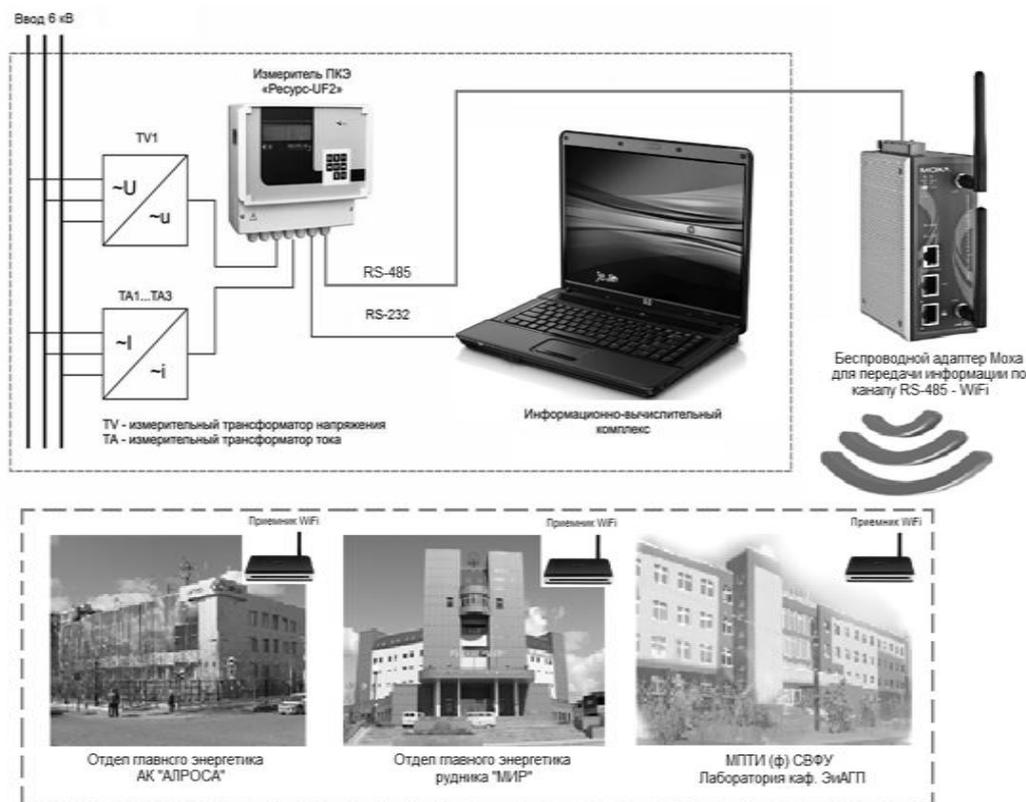


Рис. 1. Структурная схема системы непрерывного мониторинга ПКЭ объектов подземного рудника Мирнинского ГОКа

Пример работы и подробный анализ данных, полученных после одного года функционирования системы мониторинга, дан в работе [6].

Представленная система непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах рудника Мирнинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) непосредственно позволила определить оборудование и участки сети с неэффективным использованием электроэнергии посредством качественного сбора и обработки информации с устройств основного потребления мощностей, передачи и трансформации электроэнергии. На основании результатов анализа этих данных разработано технико-экономическое обоснование и предложены к внедрению мероприятия по повышению эффективной работы как участков, так и всей энергосистемы рудника в целом.

Технико-экономический расчет и обоснование

Анализ результатов измерений за один год на объектах потребления мощности (скиповая подъемная установка скипового ствола и шаровая мельница участка технологического закладочного комплекса) рудника позволил определить один из таких участков энергосистемы [7]. Синхронный двигатель шаровой мельницы мощностью 350 кВт питается от трансформатора ТМ-1000. В соответствии с ГОСТ данную линию питания обеспечивают два трансформатора. Расчет по данным внедренной системы мониторинга показал низкий коэффициент загрузки трансформатора и, следовательно, значительные потери электроэнергии на холостой ход трансформатора [8].

Потери активной мощности в трансформаторе определяют по выражению

$$\Delta P_T = \Delta P_X + \Delta P_K k_H^2,$$

где ΔP_X – активные потери холостого хода при номинальном напряжении, кВт; ΔP_K – активные нагрузочные потери при номинальной нагрузке, кВт; $k_H = S_\Phi / S_{T,ном}$ – коэффициент загрузки трансформатора; S_Φ – фактическая нагрузка трансформатора, кВА; $S_{T,ном}$ – его номинальная мощность, кВА.

Потери электроэнергии в трансформаторе равны, кВтч,

$$\Delta W = \Delta P_X T_n + \Delta P_K k_H^2 T_{раб},$$

где T_n – годовое количество часов работы трансформатора равно 8760 ч; $T_{раб}$ – годовое количество часов работы трансформатора с нагрузкой равной или близкой к номинальной: при одной смене $T_{раб} = 2400$ ч, при двух – $T_{раб} = 5400$ ч; при трех – $T_{раб} = 8400$ ч.

Отключение трансформаторов в режимах малых нагрузок определяется минимумом потерь электроэнергии в этих трансформаторах при условии

$$S_\Phi \leq S_{ном} \sqrt{\frac{n(n-1)\Delta P_X}{\Delta P_K}},$$

где n – число однотипных трансформаторов.

Основными потребителями реактивной мощности на руднике являются: асинхронные двигатели (АД) – 45–60 % от общей реактивной мощности предприятия; трансформаторы всех ступеней трансформации (15–25 %); электротехнологические установки (8–12 %); люминесцентные лампы (5–8 %).

При передаче от источника электроэнергии к приемнику в системе электроснабжения имеются потери активной мощности:

$$\Delta P = 3I^2 R,$$

где I – ток в фазе линии; R – сопротивление фазы линии.

Полная мощность, передаваемая по сети, равна:

$$S = UI \text{ или } S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \times R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_A + \Delta P_P,$$

где $\Delta P_A = \frac{P^2}{U^2} R$, Вт – потери активной мощности при передаче активной мощности;

$\Delta P_p = \frac{Q^2}{U^2} R$ – потери активной мощности при передаче реактивной мощности.

Таким образом, от передачи реактивной мощности в линии электроснабжения имеются потери активной мощности, от реактивного тока, которые пропорциональны квадрату передаваемой реактивной мощности.

Реактивная мощность потребителей с компенсирующими устройствами (КУ) определяется по уравнению

$$Q = Q_{\text{ДК}} - Q_{\text{КУ}},$$

где $Q_{\text{ДК}}$ – реактивная мощность нагрузки до компенсации, ВАр; $Q_{\text{КУ}}$ – реактивная мощность КУ, ВАр.

Расчетные значения полной мощности трансформатора $S_{\text{ДК}}$, тока в линии между трансформатором и нагрузкой $I_{\text{ДК}}$, потери активной мощности в сети $\Delta P_{\text{ДК}}$ равны:

$$S_{\text{ДК}} = \sqrt{P^2 + Q_{\text{ДК}}^2};$$

$$I_{\text{ДК}} = \frac{S_{\text{ДК}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{\text{ДК}}^2}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}};$$

$$\Delta P_{\text{ДК}} = 3I_{\text{ДК}}^2 R = \frac{S_{\text{ДК}}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \times R = \frac{P^2 + Q_{\text{ДК}}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \times R.$$

Те же параметры после компенсации реактивной мощности равны:

$$S_{\text{ПК}} = \sqrt{P^2 + (Q_{\text{ДК}} - Q_{\text{КУ}})^2};$$

$$I_{\text{ПК}} = \frac{\sqrt{P^2 + (Q_{\text{ДК}} - Q_{\text{КУ}})^2}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}};$$

$$\Delta P_{\text{ПК}} = \frac{P^2 + (Q_{\text{ДК}} - Q_{\text{КУ}})^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \times R.$$

Следовательно, применение компенсирующих устройств позволяет: уменьшить полную мощность источника питания – трансформаторов; снизить ток в элементах сети между источником питания и приемником; уменьшить активные потери мощности в сети.

Выбор КУ для конкретной сети электроснабжения осуществляется путем технико-экономического анализа, в результате которого сопоставляются снижение стоимости потерь электроэнергии и затрат на установку КУ. Наибольший экономический эффект достигается при размещении КУ в непосредственной близости от приемника. Индивидуальная компенсация наиболее эффективна у мощных электроприемников [9].

Для двух трансформаторов ТМ-1000 были определены потери холостого хода в зависимости от коэффициента загрузки трансформатора согласно приведенным выше формулам. Каждый год установленную мощность будем увеличивать на 20–25 %. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчет потерь холостого хода при использовании двух трансформаторов

Год	2016	2017	2018	2019	2020
Параметр					
S , кВА	2000	2000	2000	2000	2000
P , кВт	640	800	960	1200	1440
k_3	0,32	0,4	0,48	0,6	0,72
T , час	5400	5400	5400	5400	5400
ΔP_x , кВт	119,1	76,3	52,9	33,8	23,5

Построим график зависимости потерь холостого хода от коэффициента загрузки трансформаторов (рис. 2).

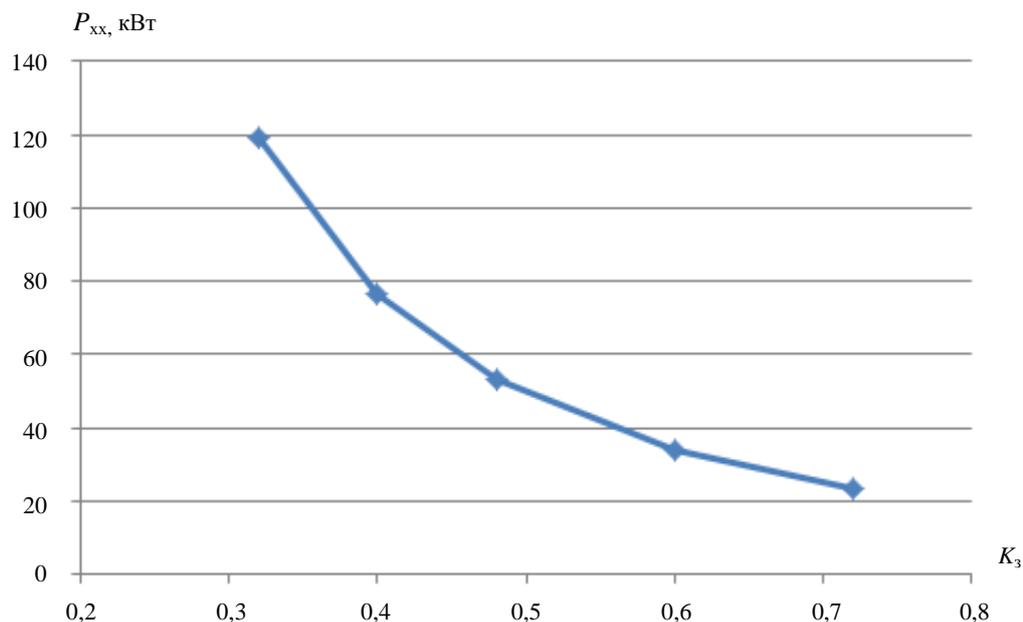


Рис. 2. График зависимости потерь холостого хода от коэффициента загрузки трансформатора (при использовании двух трансформаторов ТМ-1000)

Для уменьшения потерь холостого хода и увеличения коэффициента загрузки на участках рудника можно использовать следующие решения: уменьшение мощности трансформаторов, питающих оборудование участка; увеличение количества или мощности потребителей, присоединенных к данному трансформатору того или иного участка [10]. Таким образом, можно подсчитать экономию средств на оплату электроэнергии за счет уменьшения потерь холостого хода в трансформаторе при увеличении коэффициента его загрузки, необходимость которого была выявлена при проведении мониторинга показателей качества электроэнергии с помощью внедренной системы.

Расчет экономии средств за счет применения таких технических мероприятий представлен в табл. 2.

Таблица 2

Расчет экономии на оплату за электроэнергию при уменьшении потерь холостого хода и при увеличении коэффициента загрузки трансформатора

Год	2016	2017	2018	2019	2020
Параметр					
S , кВА	2000	2000	2000	2000	2000
P , кВт	640	800	960	1200	1440
k_3	0,32	0,4	0,48	0,6	0,72
T , час	5400	5400	5400	5400	5400
ΔP_x , кВт	119,1	76,3	52,9	33,8	23,5
w , руб./кВтч	4	4,5	5	5,5	6
Сэ, тыс. руб.	2572,6	1854,1	1428,3	1003,9	761,4

Исходя из вышеприведенных расчетов и представленной таблицы, внедрение системы мониторинга показателей качества электроэнергии на двух объектах рудника «Мир» Мирнинского ГОКа (скиповом подъеме скипового ствола и шаровой мельницы участка технологического складочного комплекса) позволит сэкономить 1811,2 тыс. руб. за 5 лет за счет уменьшения потерь холостого хода и увеличения коэффициента загрузки трансформаторов, установленных на соответствующих участках.

Заклучение

Таким образом, внедрение системы мониторинга показателей качества электроэнергии на других объектах горных предприятий позволит обнаруживать проблемные участки с неэффективными затратами электроэнергии и на основании этих данных выдвигать технико-экономически обоснованные рекомендации и предлагать мероприятия для их реализации [11]. Следовательно, намечается процесс перехода от платежей за необоснованные потери электроэнергии к их предупреждению как посредством изменения схемы электроснабжения объекта, так и закупкой и установкой оборудования для уменьшения потерь при передаче, использовании и трансформации электроэнергии, что может повлиять на инвестиционную политику предприятий в области энергоемких производств и технологий.

Summary

The technical and economic calculations are made in the article. Also the substantiation is presented which confirms a feasibility of the system of continuous monitoring of electric power quality parameters in the underground mine. The system of continuous monitoring was implemented in the site of skip lifting and in the crushing site of technological stowing complex of the underground mine «Mir» of «ALROSA» Company (PJS). In a year of collected measurements this system revealed a number of problems which were connected with an inefficient energy consumption. The measures were offered for reducing these consumptions, the economic effect of the introduction of this system was calculated.

Keywords: *mining enterprise, underground mine, electric power, quality parameters, monitoring system, losses of electric power, transformer, technical and economic calculations.*

Литература

1. Федоров О.В., Кузнецов Н.М. Инвестиции в электроснабжение предприятий: учебное пособие. Новосибирск: Наука, 2010. 120 с.
2. Дед А.В., Паршукова А.В. // Омский научный вестник. 2015. № 137. С. 148–150.

3. Кузнецов Н.М., Клюкин А.М., Трибуналов С.Н. // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 2 (25). С. 97–102.
4. 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.
5. Кузнецов Н.М., Семенов А.С., Бебихов Ю.В., Рыбников А.В. // Горный журнал. 2014. № 1. С. 23–26.
6. Семенов А.С., Кузнецов Н.М. // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 31–34.
7. Козярук А.Е., Кузнецов Н.М., Федоров О.В., Свириденко А.О. // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 6. С. 30–35.
8. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1–2. С. 53–63.
9. Грачева Е.И., Шагидуллин А.В. // Главный энергетик. 2016. № 6. С. 35–41.
10. Грачёва Е.И., Гарганеев А.Г. // Электрика. 2015. № 5. С. 10–15.
11. Тульский В.Н., Карташев И.И., Симуткин М.Г., Назиров Х.Б., Кузнецов Н.М. // Горный журнал. 2012. № 12. С. 52–55.

Поступила в редакцию

26 октября 2016 г.

Федоров Олег Васильевич – докт. техн. наук, профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью» Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева (НГТУ). E-mail: fov52@mail.ru. Тел: 8(910)1391031.

Семёнов Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. E-mail: sash-alex@yandex.ru. Тел: 8(914)2950425.

Егоров Айаал Николаевич – начальник монтажно-наладочного центра СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО). E-mail: egorovan@alrosa.ru. Тел: 8(914)2692027.

Хубиева Виктория Махматовна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. E-mail: lilacrose@mail.ru. Тел: 8(914)2520975.