

# Электроэнергетика

## Electric power engineering

Научная статья

УДК 621.316

DOI: 10.14529/power220201

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБОСНОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**А.С. Семёнов**<sup>1</sup>, *sash-alex@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>

**Ю.В. Бебихов**<sup>1</sup>, *bebikhov.yura@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>

**А.Н. Егоров**<sup>2</sup>, *delistarmus@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-0429-001X>

**А.С. Сарваров**<sup>3</sup>, *anvar@magtu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-1489-2172>

**О.В. Федоров**<sup>4</sup>, *fov52@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5268-6399>

<sup>1</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Мирный, Россия

<sup>2</sup> Акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

<sup>3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>4</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В работе применены методы математического моделирования и инструментального контроля, способные обосновать внедрение энергосберегающих мероприятий и технических решений в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий. Оценка внедрения методов энергосбережения в системах электропривода и электроснабжения на горнодобывающих предприятиях показала возможность получения мультипликативного экономического эффекта при правильном подходе к внедрению и последующей эксплуатации энергосберегающих технологий. Был показан потенциал энергосбережения в промышленности в целом и на горнодобывающих предприятиях в частности. В качестве примера на отдельных участках предприятий были рассмотрены такие мероприятия, как компенсация реактивной мощности, внедрение систем автоматизированного электропривода, разработка и опытная эксплуатация систем контроля качества электроэнергии с непрерывной фиксацией показателей. Метод математического моделирования реализовывался при помощи пакета программ MatLab, хорошо зарекомендовавшего себя в инженерных расчетах по всему миру. Инструментальный контроль и оценка показателей качества электроэнергии проводились согласно требованиям ГОСТ РФ 32144–2013. В результате потенциальной оптимизации отдельных систем электроснабжения получен расчетный суммарный экономический эффект за счет экономии электроэнергии, приближающийся к 28 млн руб. в год, что в среднем составляет 20 % от затрат на электропотребление рассмотренных участков горнодобывающих предприятий.

**Ключевые слова:** энергосбережение, энергоэффективность, горнодобывающее предприятие, система электроснабжения, система электропривода, показатели качества электроэнергии, математическое моделирование, инструментальный контроль, оптимизация

**Для цитирования:** Применение методов обоснования мероприятий по энергосбережению в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.С. Семёнов, Ю.В. Бебихов, А.Н. Егоров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 5–17. DOI: 10.14529/power220201

## APPLICATION OF METHODS FOR THE JUSTIFICATION OF ENERGY SAVING MEASURES IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF MINING ENTERPRISES

**A.S. Semenov<sup>1</sup>**, *sash-alex@yandex.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>  
**Yu.V. Bebikhov<sup>1</sup>**, *bebikhov.yura@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>  
**A.N. Egorov<sup>2</sup>**, *delistarmus@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-0429-001X>  
**A.S. Sarvarov<sup>3</sup>**, *anvar@magtu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-1489-2172>  
**O.V. Fedorov<sup>4</sup>**, *fov52@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5268-6399>

<sup>1</sup> Polytechnic Institute (branch) Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, Mirny, Russia

<sup>2</sup> PJSC ALROSA, Mirny, Russia

<sup>3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>4</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The paper uses the methods of mathematical modeling and instrumental control to justify the introduction of energy-saving measures and technical solutions in the power supply systems of mining enterprises. An assessment of the implementation of energy saving methods in electric drive and power supply systems at mining enterprises demonstrated the possibility of achieving a multiplier economic effect with the right approach to the implementation and subsequent operation of energy-saving technologies. The energy saving potential was shown in the industry in general, and in mining enterprises in particular. For example, in some areas of enterprises, such measures as reactive power compensation, the introduction of automated electric drive systems, the development and pilot operation of power quality control systems with continuous recording of indicators were considered. The mathematical modeling method was implemented using the MatLab software package which has proven itself in engineering calculations around the world. Instrumental control and evaluation of power quality indicators were carried out in accordance with the requirements of GOST RF 32144–2013. As a result of the potential optimization of individual power supply systems, the estimated total economic effect due to energy savings was obtained. The figure approached 28 million rubles per year, which is on average 20% of the cost of electricity consumption of the considered sites of mining enterprises.

**Keywords:** energy saving, energy efficiency, mining enterprise, power supply system, electric drive system, power quality indicators, mathematical modeling, instrumental control, optimization

**For citation:** Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Egorov A.N., Sarvarov A.S., Fedorov O.V. Application of methods for the justification of energy saving measures in the power supply systems of mining enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):5–17. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220201

### Введение

В настоящее время одним из основных направлений как технологического, так и научного развития всех промышленных стран стало энергосбережение. Несмотря на снижение энергоёмкости развитых стран, к 2030 г. прогнозируется рост мирового спроса на электроэнергию на 30 % по отношению к 2014 г. Это связано с тем, что устойчивое развитие экономики любой страны требует увеличения производства и, как следствие, потребления топливно-энергетических ресурсов [1]. Страны Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) значительно сократили темпы роста спроса на энергию за счет реализованных мероприятий по энергоэффективности и энергосбережению, прежде всего домохозяйствами и промышленностью, а также благодаря развитию бережливого природопользования. Эти страны также заменили значительную долю угля природным газом [2].

Достаточное обилие ископаемых энергетических ресурсов России (2-е место по совокупным доказанным запасам угля и природного газа, 6-е место по сырой нефти) обеспечивает краткосрочную экономическую и энергетическую безопасность страны [3]. Однако при выборе источников энергии должны приниматься во внимание не только экономические аспекты, но и влияние на долгосрочную энергетическую безопасность. В связи с этим мероприятия по энергоэффективности и энергосбережению должны стать приоритетными при управлении энергоёмким производством горнодобывающей промышленности [4, 5].

Эффективность внедрения методов энергосбережения оценим на примере Северо-Востока России и мировой алмазодобывающей компании АЛРОСА. В статье [6] показан опыт по добыче алмазосодержащего сырья предприятиями АЛРОСА, который может быть интересен и полезен другим зарубежным компаниям. В настоящее время в России

АЛРОСА сосредоточила свою деятельность в Республике Саха (Якутия) и Архангельской области. В свою очередь крупнейшими месторождениями компании остаются кимберлитовые трубки «Мир», «Юбилейная», «Удачная» и «Интернациональная», которые расположены на территории Западной Якутии. На трубках «Интернациональная» и «Удачная» добыча полезных ископаемых идет подземным способом при помощи рудников, что является очень энергоемким процессом.

В работах [7, 8] приведены исследования технического состояния электрических сетей региона и систем электроснабжения (СЭС) горнодобывающих предприятий, рассчитан и показан потенциал энергосбережения в промышленности в целом и на горнодобывающих предприятиях в частности. В [9] показано, что в структуре потребления электрической энергии (ЭЭ) основная её доля расходуется на добычу полезных ископаемых и достигает 40 %. Там же были проанализированы: динамика потерь электроэнергии в сетях общего пользования, удельное электропотребление на освещение и бытовые нужды, удельный расход электроэнергии на подъем и подачу воды, а также на очистку сточных вод. Суммарный потенциал энергосбережения в рассмотренных направлениях оценивается примерно в 350 млн кВт·ч/год.

В работах [10–12] проведена оценка показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на алмазодобывающем руднике и обогатительной фабрике. В результате инструментального контроля их внутренних СЭС было выявлено полное соответствие ПКЭ требуемым нормам на обогатительной фабрике и несоответствие по отдельным ПКЭ на подземном руднике. В качестве причин такого несоответствия были определены потребители с большой номинальной мощностью (более 1 МВт), имеющие в составе системы электропривода (ЭП) преобразователи частоты (ПЧ) с разной пульсностью выпрямления. На руднике к таким потребителям относятся главная вентиляторная установка, шахтные подъемные установки, насосные установки.

В работе [13] были проанализированы наиболее распространенные системы электропривода, применяемые на предприятиях АЛРОСА для приведения в движение технологических установок горного производства. В [14] проанализированы результаты измерений показателей электромагнитной совместимости (ЭМС) с питающей сетью ПЧ Power Flex 7000 и ACS5000. Установлено влияние систем частотно-регулируемых приводов на качество электрической энергии.

Учитывая все проведенные ранее исследования, в том числе и авторами настоящей работы, можно говорить, что применение методов энергосбережения на горнодобывающих предприятиях, реализуемых с использованием математического моделирования и инструментального контроля,

является актуальной задачей и может дать мультипликативный экономический эффект при правильном подходе к внедрению и последующей эксплуатации в технологических процессах горнодобывающих предприятий.

### **Цель, задачи, объекты и методы исследования**

Цель настоящего исследования заключается в оценке потенциала внедрения энергосберегающих технологий на объектах горнодобывающих предприятий на примере компании АЛРОСА для оптимизации электроэнергетических систем. Для достижения поставленной цели будут рассмотрены мероприятия по энергосбережению в СЭС, системах контроля и учета ЭЭ, системах ЭП горнодобывающих предприятий.

Объектами исследования являются алмазодобывающий рудник и обогатительная фабрика по переработке кимберлитового сырья, расположенные на территории Республики Саха (Якутия). На обозначенных предприятиях ведется целенаправленная планомерная работа по повышению энергоэффективности.

К основным методам исследования в области энергосбережения отнесем математическое моделирование и инструментальный контроль в системах электроснабжения и электропривода.

Математическое моделирование реализовано при помощи пакета программ MatLab, хорошо зарекомендовавшего себя в инженерных расчетах по всему миру. В его состав входит библиотека Simulink, имеющая подкаталог SimPowerSystems, который содержит необходимый набор силовых блоков для разработки электроэнергетических и электромеханических моделей.

Современная методика инструментального контроля ПКЭ реализована в соответствии с ГОСТ РФ 32144–2013, согласно которому определяется соответствие или несоответствие определенных показателей. Основным показателем для оценки в настоящей работе выбран суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, обуславливающий несинусоидальность, т. е. искажение формы кривой напряжения, которое возникает при работе высоковольтных ПЧ.

### **Результаты и обсуждения**

Мероприятия по оптимизации электроэнергетических систем (ЭЭС) на горнодобывающих предприятиях условно разделим на несколько направлений: СЭС, системы ЭП, системы контроля и учета ЭЭ.

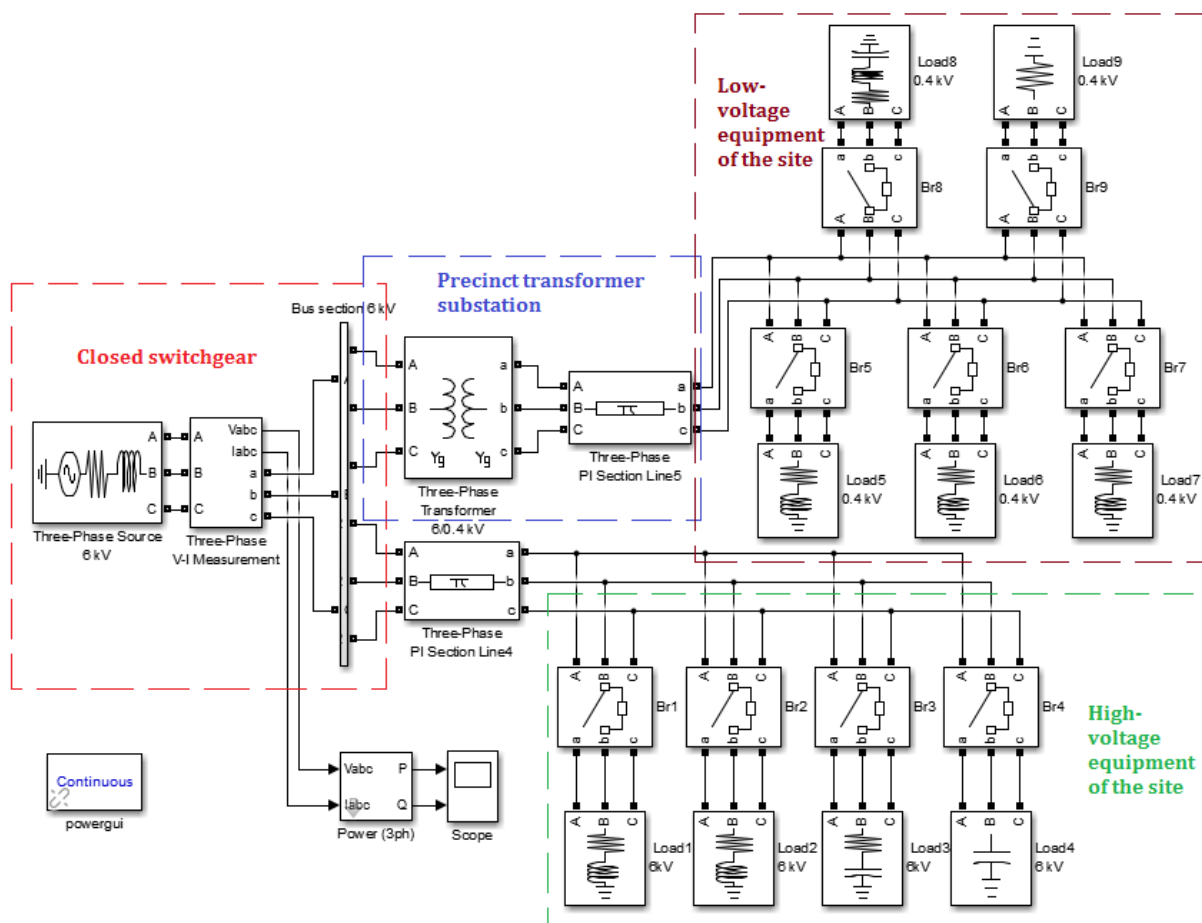
#### **Системы электроснабжения**

С помощью универсальной математической модели СЭС, разработанной и описанной в работе [15], произвели оценку такого энергосберегающего мероприятия, как компенсация реактивной мощности.

Универсальная математическая модель была разработана с учетом особенностей ЭС горнодобывающих предприятий. Было проведено: описание основных силовых блоков модели, представлены их технические параметры; определение исходных данных для моделирования; получение результатов моделирования при нормальной работе СЭС. Для дальнейшего исследования модель была адаптирована под СЭС конкретного участка, а именно компрессорной станции алмазодобывающего рудника (рис. 1).

Электропитание на основное высоковольтное оборудование (компрессоры) поступает от закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 6 кВ. Также от ЗРУ запитана участковая трансформаторная подстанция, которая обеспечивает электропитание низковольтного оборудования участка. Перечень и основные технические характеристики электрооборудования компрессорной станции представлены в табл. 1.

Поскольку система электроснабжения компрессорной станции – это неотъемлемая часть об-



**Рис. 1. Математическая модель системы электроснабжения компрессорной станции**  
**Fig. 1. Mathematical model of the power supply system of the compressor station**

**Таблица 1**

**Перечень и основные технические характеристики электропотребителей**

**Table 1**

**List and main technical characteristics of electrical consumers**

№	Потребитель	Позиция на рис. 1	Кол-во	$U$ , кВ	$P$ , кВт	$Q$ , кВАр
1	Компрессор	Load1-4	4	6	750	562
2	Вентилятор	Load5	4	0,4	20	15
3	Электронагреватель	Load6	4	0,4	6,5	4,8
4	Насос	Load7	4	0,4	6,5	4,8
5	Мостовой кран	Load8	2	0,4	10,5	7,8
6	Освещение	Load9	20	0,4	0,5	–

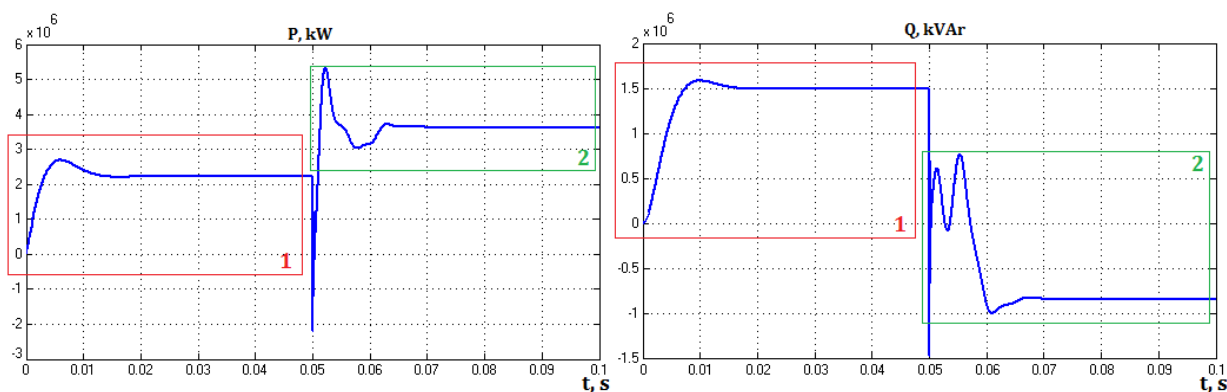


Рис. 2. График активной и реактивной мощности до и после компенсации  
Fig. 2. Graph of active and reactive power before and after compensation

щей системы электроснабжения рудника, электрооборудование других участков также вносит вклад в распределение мощностей.

На математической модели провели исследование по внедрению энергосберегающих мероприятий путем компенсации реактивной мощности, которая увеличивает затраты на холостой ход и не совершает полезной работы [16].

Компенсировать реактивную мощность, как известно, можно двумя основными способами: установкой статических компенсаторов на основе конденсаторных батарей либо использованием синхронного двигателя в качестве компенсатора. В нашем случае более подходит второй вариант, так как в составе электропривода компрессоров используются синхронные двигатели. Этот способ практически не потребует дополнительных финансовых затрат.

Графики активной и реактивной мощности до (зона 1) и после (зона 2) компенсации показаны на рис. 2. Из графиков видно, что реактивная мощность с 1,495 МВАр снижается до уровня 0,849 МВАр. Это происходит за счёт включения в работу без нагрузки одного из синхронных двигателей компрессора, находящегося в резерве.

Полная мощность в системе электроснабжения компрессорной станции определяется по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1)$$

где  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная мощности соответственно.

Коэффициент мощности для двух вариантов определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (2)$$

В результате моделирования получили снижение реактивной мощности на 43 %, и тем самым достигнуто повышение коэффициента мощности на 14 % (с 0,83 до 0,97 о. е.).

Расчет экономического эффекта от использования компенсации реактивной мощности проведен следующим образом. Как уже отмечалось ранее, капитальные вложения при использовании СД

в качестве компенсатора отсутствуют. В расчетах были учтены только дополнительные затраты на техобслуживание и ремонт двигателя.

Стоимость годовой потребляемой электроэнергии для компрессорной станции до и после компенсации реактивной мощности рассчитана по формуле

$$W_{C1} = S \cdot \frac{1}{\cos \varphi_i} \cdot T \cdot w, \quad (3)$$

где  $S$  – полная мощность всего установленного оборудования, кВА;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;  $T$  – время работы за год в часах (при непрерывной работе компрессорной станции  $T = 8760$  ч/год);  $w$  – стоимость одного кВт·ч электроэнергии (по тарифу ЗЭС ПАО «Якутскэнерго» для рудника «Интернациональный» в 2020 г.  $w = 4,95$  руб.).

Экономический эффект от внедрения компенсации реактивной мощности с учетом затрат на ежегодное техобслуживание и ремонт на одной только компрессорной станции подземного рудника составил, тыс. руб.:

$$W = W_{C1} - W_{C2} - W_{rep} = 165\,771,7 - 141\,845,9 - 4801,3 = 19\,124,5, \quad (4)$$

где  $W_{C1}$  – стоимость потребляемой электроэнергии до компенсации;  $W_{C2}$  – стоимость потребляемой электроэнергии после компенсации;  $W_{rep}$  – стоимость годового технического обслуживания и ремонта, всё в тыс. руб.

Таким образом, на примере математической модели было проведено внедрение энергосберегающего мероприятия (компенсация реактивной мощности), ожидаемый экономический эффект от которого составил более 19 млн руб. в год за счет экономии электроэнергии.

#### Системы контроля и учета электроэнергии

В работе [17] авторами была разработана система контроля качества ЭЭ с непрерывной фиксацией ПКЭ, которая была апробирована на алмазодобывающем руднике (рис. 3). Разработанная система была внедрена в состав двух участковых СЭС рудника: участок шахтного подъема (подъемная установка) и участок закладочного комплекса (ша-

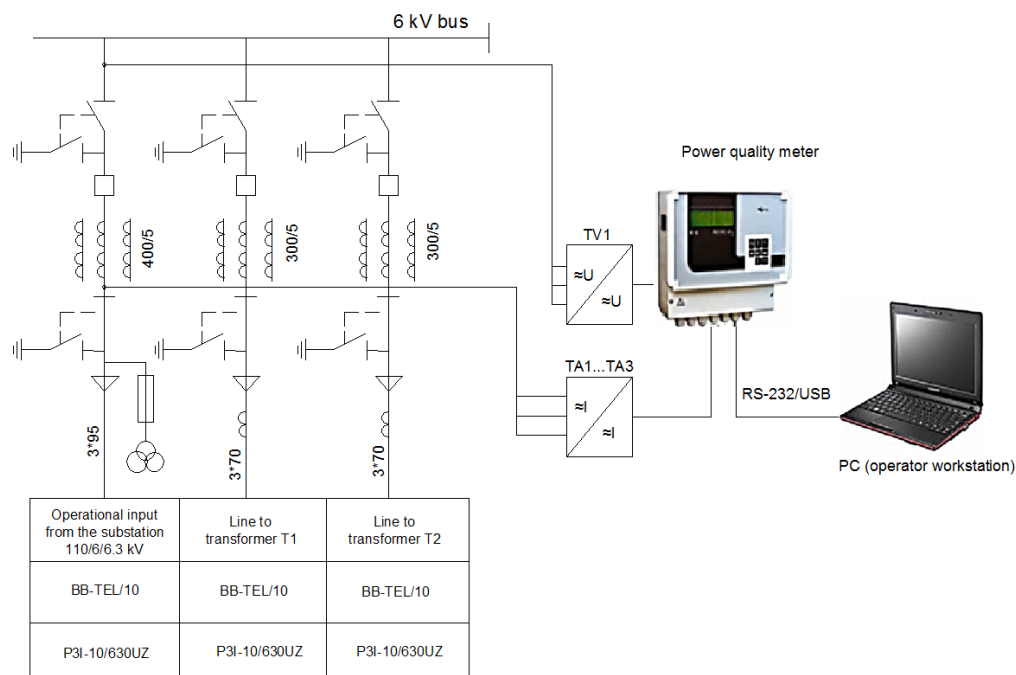


Рис. 3. Фрагмент структуры системы непрерывного мониторинга ПКЭ  
Fig. 3. Fragment of the structure of the system for continuous monitoring of the power quality indicators

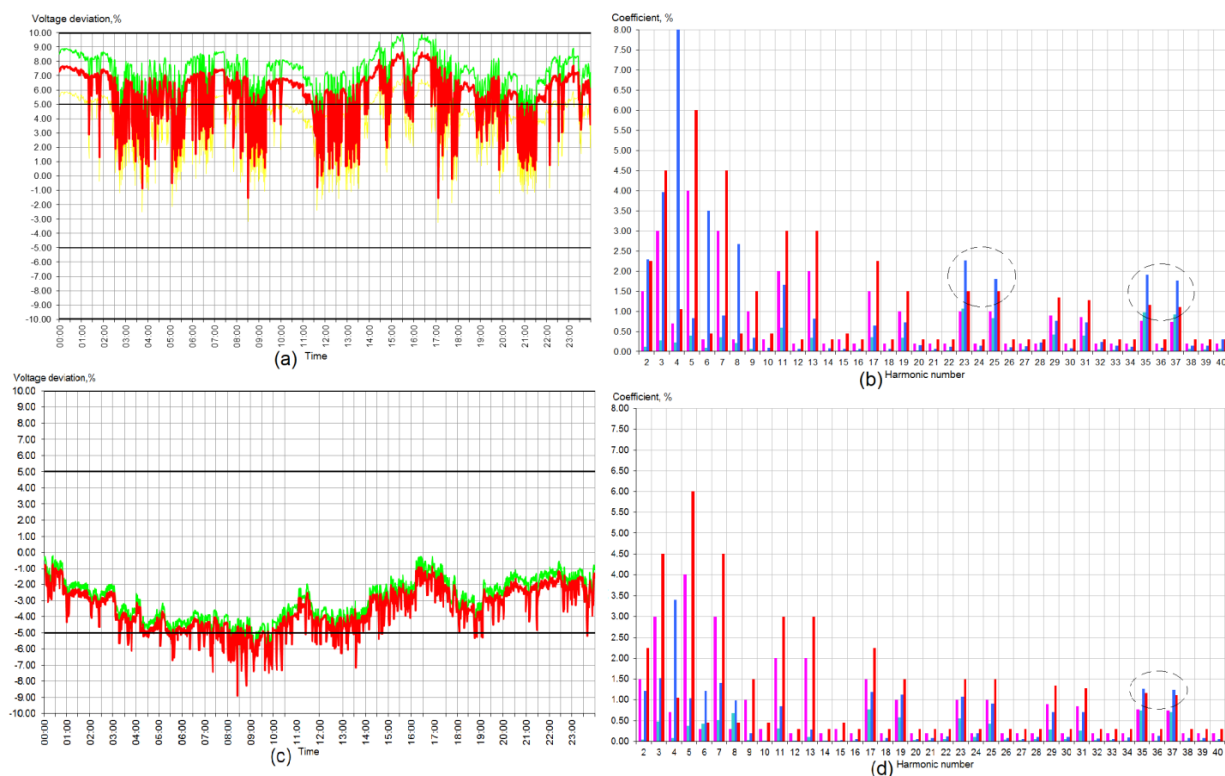


Рис. 4. Графики медленных изменений и гармонических составляющих напряжения  
Fig. 4. Graphs of slow changes and voltage harmonics

ровая мельница). Анализ измеренных и обработанных показателей качества электроэнергии проведен в [18]. Ниже описаны только показатели, не соответствующие нормам.

На участке шахтного подъема величина положительного отклонения напряжения в точке пе-

редачи ЭЭ превышает допустимое значение 10 % от номинального в течение 100 % времени интервала измерений (рис. 4а); по коэффициентам нечетных высших гармонических составляющих напряжения, не кратных трем (23, 25, 35 и 37), суммарное превышение достигает 7,8 % (рис. 4б).

На участке закладочного комплекса отклонение напряжения не выявлено, но наблюдается большое отрицательное снижение от номинала (рис. 4с); коэффициенты нечетных высших гармонических составляющих напряжения, не кратных трем (35 и 37), превышают предельно допустимые значения на 1,25 % (рис. 4д).

В результате анализа ПКЭ на объектах алмазодобывающего рудника удалось определить «проблемный» участок СЭС, а именно работу СД шаровой мельницы мощностью 350 кВт от трансформаторной подстанции (ТП) с двумя трансформаторами ТМ-1000. Расчет по полученным данным от системы контроля качества ЭЭ с непрерывной фиксацией ПКЭ показал низкий коэффициент загрузки ТП и, как следствие, большие потери ЭЭ на холостой ход, которые определяются из выражения

$$\Delta P_{id} = \Delta P_{n.v} + \Delta P_{n.l} \cdot k_{lf}^2, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{n.v}$  – активные потери на холостой ход при номинальном напряжении, кВт;  $\Delta P_{n.l}$  – активные нагрузочные потери при номинальной нагрузке, кВт;  $k_{lf} = P_n/S_n$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $P_n$  – фактическая мощность нагрузки, кВт;  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Для выявленного «проблемного» участка определили потери на холостой ход трансформаторов и построили их зависимость от коэффициента загрузки (рис. 5).

Исходя из того, что с увеличением коэффициента загрузки трансформатора потери на холостой ход уменьшаются, было принято решение о планомерном увеличении количества и мощности потребителей, подключенных к данной ТП. Взяв за основу показатели электропотребления 2020 г., подсчитали будущую экономию по оплате электроэнергии с горизонтом планирования на 5 лет (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что в результате оптимизации работы СЭС на выявленном «проблемном» участке закладочного комплекса алмазодобывающего рудника будущая экономия по оплате ЭЭ за 5 лет достигнет значения 2419,6 тыс. руб.

Таким образом, в результате внедрения системы контроля качества ЭЭ с непрерывной фиксацией ПКЭ на участках алмазодобывающего рудника была определена необходимость оптимизации работы их СЭС, которая в результате её реализации за первый год дала экономический эффект более 1 млн руб., что в 3 раза превышает средства, затраченные на внедрение такой системы [19, 20].

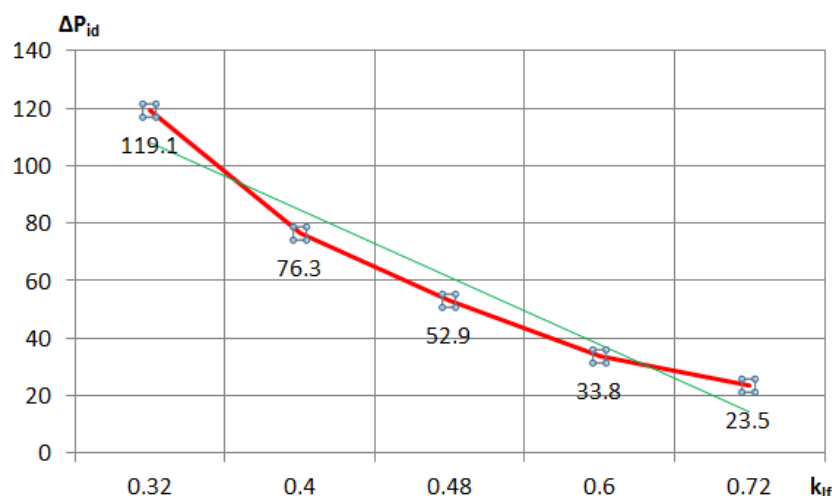


Рис. 5. Зависимость потерь на холостой ход от коэффициента загрузки трансформаторов  
Fig. 5. Dependence of no-load losses on the load factor of transformers

Таблица 2

Расчет ежегодной экономии на оплату электроэнергии

Table 2

Calculation of annual savings on electricity bills

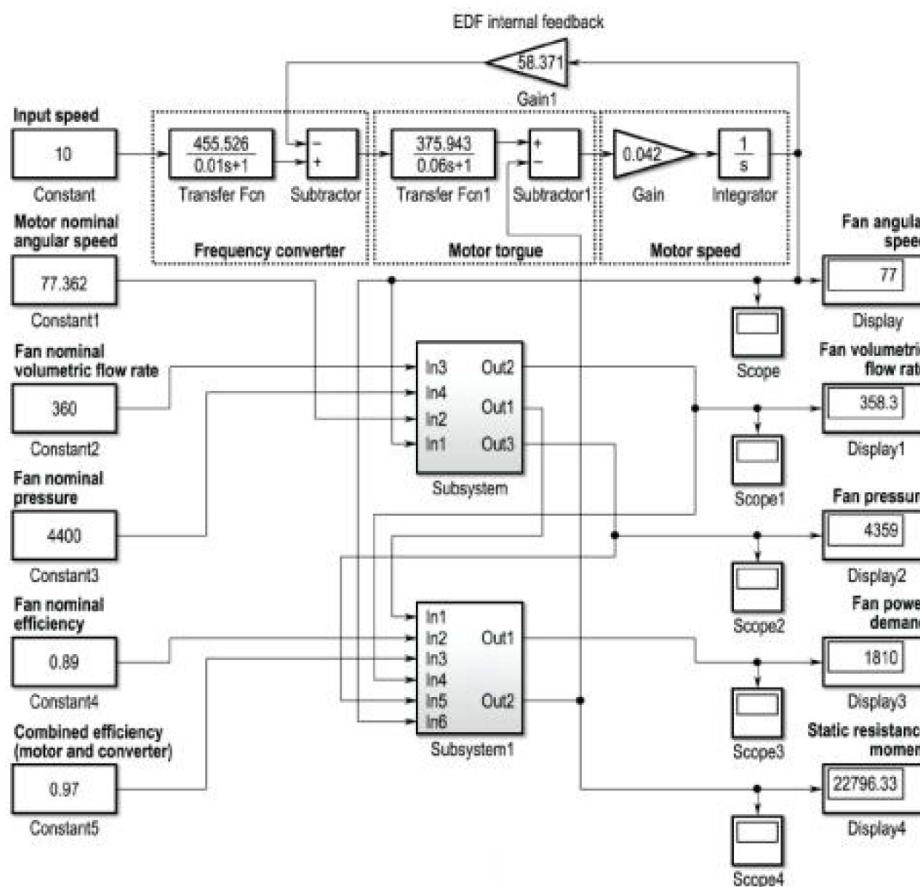
Параметр	Горизонт планирования, годы				
	2020	2021	2022	2023	2024
$S_n$ , кВА	2000	2000	2000	2000	2000
$P_n$ , кВт	640	800	960	1200	1440
$k_{lf}$	0,32	0,4	0,48	0,6	0,72
$T$ , ч	5400	5400	5400	5400	5400
$\Delta P_{id}$ , кВт	119,1	76,3	52,9	33,8	23,5
$w$ , руб./кВт·ч	4,95	5,20	5,45	5,73	6,02
$W$ , тыс. руб.	3183,5	2142,5	1556,8	1045,8	763,9

Системы электропривода

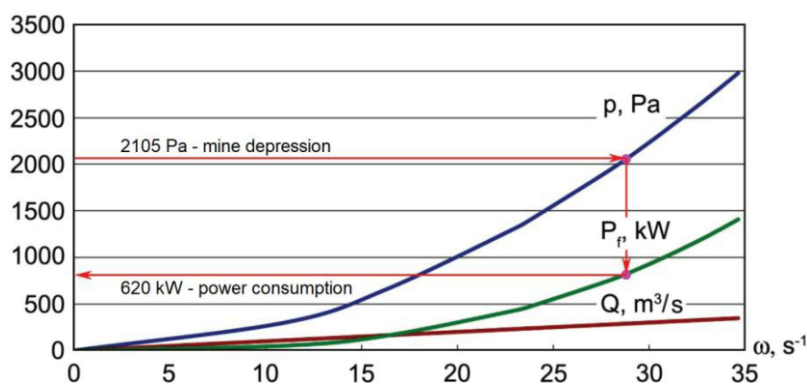
Ранее в работе [21] был произведен анализ энергоэффективности замены вентиляторной установки главного проветривания алмазодобывающего рудника в связи с её неудовлетворительным техническим состоянием. Ещё годом ранее в работе [22] авторы рассмотрели положительный опыт практической эксплуатации ПЧ Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности, которые хорошо зарекомендовали себя, несмотря на вызываемые ими ухудшения показателей электромагнитной совместимости питающей сети, подтвержденные авторами в работах [23–25]. В работах [26, 27] проведена оценка резуль-

татов математического моделирования системы ЭП главной вентиляторной установки (ГВУ), в результате которой был определен экономический эффект от внедрения современных ПЧ.

Разработанная модель, которая изображена на рис. 6а, позволяет получить параметры ГВУ при разных скоростях вращения двигателя и построить графические зависимости основных характеристик от угловой скорости [28, 29]. К этим характеристикам относятся давление, подача и мощность ГВУ. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 6б и методически связаны с исследованиями, описанными в [30].



a)



b)

Рис. 6. Математическая модель (а) и результаты моделирования (б) главной вентиляторной установки  
Fig. 6. Mathematical model (a) and simulation results (b) of the main fan unit



При оценке экономической эффективности были рассмотрены старая система ГВУ с вентилятором ВОД-50; новая систему ГВУ с вентилятором TAF-36/21,5-1 и ПЧ Power Flex 7000. Базовая величина потребляемой мощности для рассматриваемых систем определялась по формуле

$$P_b = \frac{Q_n \cdot P_n}{1000 \cdot \eta_{fan} \cdot \eta_m \cdot \eta_{fc}}, \quad (6)$$

где  $Q_n$  и  $P_n$  – номинальные подача и давление вентилятора соответственно;  $\eta_{fan, m, fc}$  – коэффициент полезного действия (КПД) вентилятора, двигателя и преобразователя частоты соответственно.

Из рис. 6б видно, что для обеспечения требуемого статического давления 2105 Па потребляемая мощность новой системы с вентилятором TAF-36/21,5-1 составляет 620 кВт, что на 23 % меньше, чем для старой системы с вентилятором ВОД-50. Учитывая, что время работы вентиляторной установки составляет 8760 ч/год, ориентировочное годовое потребление электроэнергии по обоим вентиляторам определили по формулам, кВт·ч/год:

$$W_{vod} = P_{vod} \cdot T = 800 \cdot 8760 = 7\,008\,000; \quad (7)$$

$$W_{taf} = P_{taf} \cdot T = 620 \cdot 8760 = 5\,431\,200. \quad (8)$$

Экономия электроэнергии при применении вентилятора TAF-36/21,5-1 с ЧРП составила 1 576 800 кВт·ч/год. При переводе в денежный эквивалент, учитывая текущую стоимость тарифа на электроэнергию, получена расчетная экономия от сделанных внедрений в объеме, тыс. руб./год:

$$W = \Delta W \cdot w = 1576,8 \cdot 4,95 = 7805,1, \quad (9)$$

где  $w = 4,95$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии по тарифу ЗЭС ПАО «Якутскэнерго» для рудника «Интернациональный» на 2020 г., руб.

Таким образом, в результате математического моделирования двух рассмотренных систем ГВУ установлена ожидаемая экономическая эффективность внедрения новой системы ЧРП на базе ПЧ Power Flex 7000 в размере 7,8 млн руб. в год по сравнению со старой системой на базе ВОД-50.

### Заключение

Отметим, что для внедрения энергосберегающих мероприятий и технологий в электрических сетях горнодобывающих предприятий Северо-Восточного региона России был определен потенциал энергосбережения, который составил примерно 350 млн кВт·ч/год.

В результате мероприятий по оптимизации электроэнергетических систем на горнодобывающих предприятиях получили следующее.

1. Компенсация реактивной мощности, выполненная с помощью математического моделирования в пакете программ MatLab, на компрессорной станции алмазодобывающего рудника дала ожидаемый экономический эффект за счет экономии электроэнергии в размере более 19 млн руб. в год.

2. В результате инструментального контроля ПКЭ в электрических сетях подземного рудника выявлены серьезные несоответствия требованиям ГОСТ РФ 32144–2013. Разработана и апробирована система контроля качества электроэнергии с непрерывной фиксацией показателей, которая за первый год работы дала экономический эффект более 1 млн руб., что в 3 раза превышает средства, затраченные на её внедрение.

3. Проанализированы результаты измерений показателей ЭМС с питающей сетью высоковольтных ПЧ, а также разработаны соответствующие математические модели. Проведена оценка и подсчитан экономический эффект от внедрения новой взамен старой морально устаревшей системы ЧРП на базе ПЧ Power Flex 7000 на вентиляторную установку главного проветривания алмазодобывающего рудника, который в денежном эквиваленте составил 7,8 млн руб. в год.

Таким образом, суммарный мультипликативный экономический эффект при правильном подходе к внедрению и последующей эксплуатации энергосберегающих мероприятий на горном производстве только при точечных исследованиях приближается к 28 млн руб. в год.

### Список литературы

1. Харитоновна Н.А., Харитоновна Е.Н., Пуляева В.Н. Углеродный след России: реалии и перспективы экономического развития // Экономика промышленности. 2021. № 1 (14). С. 50–62.
2. Tsao Y.-C., Thanh V.-V., Lu J.-C. Efficiency of resilient three-part tariff pricing schemes in residential power markets // Energy. 2022. Vol. 239. P. 122329. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122329
3. Building an ANFIS-Based Decision Support System for Regional Growth: The Case of European Regions / F. Pipitone, S. Achiche, F.P. Appio, A. Martini // IEEE Transactions on Engineering Management. 2021. Vol. 68, iss. 3. P. 838–852. DOI: 10.1109/TEM.2019.2913854
4. Исследование сущности интеллектуально-инновационного потенциала горного инженера / С.А. Прокopenko, Т.И. Грицкевич, Н.Н. Равочкин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 7. С. 155–177.
5. Zadeh Z.K., Ouf M.M. Optimizing occupant-centric building controls given stochastic occupant behaviour // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2069. P. 012140. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012140
6. Общий подход к определению параметров нерабочих бортов сверхглубоких карьеров алмазородных месторождений / И.В. Зырянов, А.Н. Акишев, И.Б. Бокий и др. // Горный журнал. 2021. № 2. С. 48–53.
7. Savvinov G.N., Velichenko V.V. Fuel and energy complex of Yakutia: Environmental aspects // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 808. P. 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/808/1/012062

8. Перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России / Н.С. Волотковская, А.С. Семёнов, Ю.В. Бебихов и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 58–69.
9. Соломонов М.П., Пахомов А.А. Потенциал энергосбережения в отпущенной тепловой энергии и в отоплении зданий Северного региона // Теоретическая и прикладная экономика. 2020. № 1. С. 35–48.
10. Petrov V.L., Sadridinov A.B., Pichuev A.V. Mathematical Simulation of Electrotechnology Characteristics of Mining Complexes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1031. P. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/1031/1/012045
11. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Расчет удельных норм электропотребления для выемочных участков угольных шахт // Горный журнал. 2020. № 4. С. 66–68.
12. Практическое применение статистической модели определения ресурса электрооборудования / А.С. Карандаев, И.М. Ячиков, Е.А. Храмшина и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61, № 3. С. 43–52.
13. Choosing variable-frequency drive systems for the mining process units / N. Kugusheva, A. Semenov, I. Yakushev, S. Pavlova et al. // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 09011. DOI: 10.1051/e3sconf/202124409011
14. Khubieva V.M., Kugusheva N.N., Semenova M.N. The Results of Electromagnetic and Thermal Measurements in the Framework of the Energy Audit of the Educational and Laboratory Building // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, ed. by D.B. Solovev. New York: Curran Associates, 2020. P. 9271117. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271117
15. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. Development of Universal Mathematical Model of Electrical Power Supply System of Area of Industrial Enterprise // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference. New York: Curran Associates, 2019. P. 8867704. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704
16. Частотно-регулируемый электропривод с электропитанием от двух независимых вводов / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Электротехника. 2015. № 4. С. 41–48.
17. Pană A., Băloi A., Molnar-Matei F. New method for calculating the susceptances of a balancing capacitive compensator for a three-phase four-wire distribution network // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2020. Vol. 115. P. 105414. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105414
18. Calculation and Construction of Load Diagrams and Static Characteristics of Multi-Motor Electric Drive System Using Methods of Equivalent Forces and Reduced Moments / M.N. Semenova, I.A. Yakushev, S.A. Zagolilo et al. // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 220. P. 01033. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001033
19. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MATLAB // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 1. С. 120–130.
20. The impact of higher voltage and current harmonics on the operation of electrical systems / A.N. Egorov, Y.S. Kharitonov, V.M. Khubieva et al. // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124. P. 05067. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405067
21. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant // Proceedings of IEEE International Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation. New York: Curran Associates, 2020. P. 9398320. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320
22. Musaev T., Shageev S., Fedorov O. Intelligent Measuring System's Data Usage in Electricity Rate Pricing Process // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. Vol. 729 LNEE. P. 933–941. DOI: 10.1007/978-3-030-71119-1\_90
23. Повышение качества электроснабжения современного ГОКа / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, Ю.Н. Кондрашова и др. // Горный журнал. 2020. № 12. С. 82–86.
24. Postcompensation of Nonlinear Distortions of 64-QAM Signals in a Semiconductor-Based Wavelength Converter / B. Fillion, A.T. Nguyen, L.A. Rusch, S. LaRochelle // Journal of Lightwave Technology. 2016. Vol. 34, iss. 9. P. 2127–2138. DOI: 10.1109/JLT.2016.2523680
25. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н. Проблемы исследования эквивалентного сопротивления электрических цеховых сетей низкого напряжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 3 (43). С. 37–46.
26. Кузнецов Н.М., Минин В.А., Селиванов В.Н. Развитие Кольской энергосистемы в интересах горнопромышленного комплекса Мурманской области // Горный журнал. 2020. № 9. С. 96–100.
27. Development of customized simulation models for high voltage generators / I. Kirillov, N. Kuznetsov, I. Morozov et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 141. P. 190–196. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4\_21
28. Electromagnetic force and vibration study on axial flux permanent magnet synchronous machines with dual three-phase windings / Y. Lu, J. Li, R. Qu et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. Vol. 67, iss. 1. P. 115–125. DOI: 10.1109/TIE.2018.2890494

29. Fault-tolerant predictive torque control design for induction motor drives based on discrete space vector modulation / Z. Li, J. Xia, Y. Guo, X. Zhang // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. Vol. 9, iss. 5. P. 5441–5451. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3064979

30. Вечеркин М.В., Сарваров А.С. Исследование способов регулирования производительности вентиляторной станции ЛПЦ-10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2006. № 4. С. 50–54.

### References

1. Kharitonova N.A., Kharitonova E.N., Pulyaeva V.N. [Russia's carbon footprint: realities and prospects for economic development]. *Ekonomika promyshlennosti* [Economics of industry]. 2021;14(1):50–62. (In Russ.)

2. Tsao Y.-C., Thanh V.-V., Lu J.-C. Efficiency of resilient three-part tariff pricing schemes in residential power markets. *Energy*. 2022;239:122329. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122329

3. Pipitone F., Achiche S., Appio F.P., Martini A. Building an ANFIS-Based Decision Support System for Regional Growth: The Case of European Regions. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021;68(3):838–852. DOI: 10.1109/TEM.2019.2913854

4. Prokopenko S.A., Gritskevich T.I., Ravochkin N.N., Dyagileva A.V. [Study of the essence of the intellectual and innovative potential of a mining engineer]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(7):155–177. (In Russ.)

5. Zadeh Z.K., Ouf M.M. Optimizing occupant-centric building controls given stochastic occupant behaviour. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2069:012140. DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012140

6. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bokiy I.B., Sherstyuk N.M. [General approach to determining the parameters of non-working edges of superdeep open pit diamond deposits]. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(2):48–53. (In Russ.)

7. Savvinov G.N., Velichenko V.V. Fuel and energy complex of Yakutia: Environmental aspects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;808:012062. DOI: 10.1088/1755-1315/808/1/012062

8. Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Shevchuk V.A., Fedorov O.V. [Prospects for the development of the energy complex of the North-East of Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Energy problems]. 2021;23(3):58–69. (In Russ.)

9. Solomonov M.P., Pakhomov A.A. [Energy saving potential in the supplied thermal energy and in the heating of buildings in the Northern region]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekonomika* [Theoretical and applied economics]. 2020;(1):35–48. (In Russ.)

10. Petrov V.L., Sadridinov A.B., Pichuev A.V. Mathematical Simulation of Electrotechnology Characteristics of Mining Complexes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1031:012045. DOI: 10.1088/1757-899X/1031/1/012045

11. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. [Calculation of specific norms of power consumption for mining areas of coal mines]. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(4):66–68. (In Russ.)

12. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshina E.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A. [Practical application of the statistical model for determining the resource of electrical equipment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2018;61(3):43–52. (In Russ.)

13. Kugusheva N., Semenov A., Yakushev I., Pavlova S., Egorov A., Fedorov O. Choosing variable-frequency drive systems for the mining process units. *E3S Web of Conferences*. 2021;244:09011. DOI: 10.1051/e3sconf/202124409011

14. Khubieva V.M., Kugusheva N.N., Semenova M.N. The Results of Electromagnetic and Thermal Measurements in the Framework of the Energy Audit of the Educational and Laboratory Building. In: *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*, ed. by D.B. Solovev. New York: Curran Associates; 2020. P. 9271117. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271117

15. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. Development of Universal Mathematical Model of Electrical Power Supply System of Area of Industrial Enterprise. *Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference*. New York: Curran Associates; 2019. P. 8867704. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704

16. Karandaev A.S., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Khramshin V.R. [Frequency-controlled electric drive with power supply from two independent inputs]. *Russian Electrical Engineering*. 2015;(4):41–48. (In Russ.)

17. Pană A., Băloi A., Molnar-Matei F. New method for calculating the susceptances of a balancing capacitive compensator for a three-phase four-wire distribution network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020;115:105414. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105414

18. Semenova M.N., Yakushev I.A., Zagolilo S.A., Kharitonov Y.S., Shevchuk V.A., Ivshin I.V. Calculation and Construction of Load Diagrams and Static Characteristics of Multi-Motor Electric Drive System Using Methods of Equivalent Forces and Reduced Moments. *E3S Web of Conferences*. 2020;220:01033. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001033

19. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. [Simulation modeling of the modes of technological equipment of a complex-mechanized face of a high-performance coal mine in the MATLAB program]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and information complexes and systems]. 2021;17(1):120–130. (In Russ.)
20. Egorov A.N., Kharitonov Y.S., Khubieva V.M., Yakushev I.A., Golubtsov N.V., Shakurova Z.M. The impact of higher voltage and current harmonics on the operation of electrical systems. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:05067. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405067
21. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation*. New York: Curran Associates; 2020. P. 9398320. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320
22. Musaev T., Shageev S., Fedorov O. Intelligent Measuring System's Data Usage in Electricity Rate Pricing Process. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2021;729 LNEE:933–941. DOI: 10.1007/978-3-030-71119-1\_90
23. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kondrashova Yu.N., Odintsov K.E. [Improving the quality of power supply of modern GOK]. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(12):82–86. (In Russ.)
24. Filion B., Nguyen A.T., Rusch L.A., LaRoche S. Postcompensation of Nonlinear Distortions of 64-QAM Signals in a Semiconductor-Based Wavelength Converter. *Journal of Lightwave Technology*. 2016;34(9): 2127–2138. DOI: 10.1109/JLT.2016.2523680
25. Gracheva E.I., Naumov O.V., Gorlov A.N. [Problems of studying the equivalent resistance of low-voltage electrical workshop networks]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Power Engineering University]. 2019;11(3(43)):37–46. (In Russ.)
26. Kuznetsov N.M., Minin V.A., Selivanov V.N. [Development of the Kola energy system in the interests of the mining complex of the Murmansk region]. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):96–100. (In Russ.)
27. Kirillov I., Kuznetsov N., Morozov I., Federov O., Dolomanyuk L. Development of customized simulation models for high voltage generators. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;141:190–196. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4\_21
28. Lu Y., Li J., Qu R., Ye D., Lu H. Electromagnetic force and vibration study on axial flux permanent magnet synchronous machines with dual three-phase windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020;67(1):115–125. DOI: 10.1109/TIE.2018.2890494
29. Li Z., Xia J., Guo Y., Zhang X. Fault-tolerant predictive torque control design for induction motor drives based on discrete space vector modulation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021;9(5):5441–5451. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3064979
30. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S. [Study of ways to control the performance of the fan station LPTs-10 of OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2006;(4):50–54. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Семёнов Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, доц., директор, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Мирный, Россия; sash-alex@yandex.ru.

**Бebихов Юрий Владимирович**, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства», Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Мирный, Россия; bebikhov.yura@mail.ru.

**Егоров Айаал Николаевич**, начальник управления связи, Специализированный трест «Алмазавтоматика», Акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия; delistarmus@mail.ru.

**Сарваров Анвар Сабулханович**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; anvar@magtu.ru.

**Федоров Олег Васильевич**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Управление инновационной деятельностью», Факультет экономики, менеджмента и инноваций, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия; fov52@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Alexander S. Semenov**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Director, Polytechnic Institute (branch) Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, Mirny, Russia; sash-alex@yandex.ru.

**Yuriy V. Bebikhov**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof. of the Department of Electric Power Industry and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch) Ammosov North-Eastern Federal University in Mirny, Mirny, Russia; bebikhov.yura@mail.ru.

**Ayaal N. Egorov**, Head of Communications Department, Almazavtomatika Specialized Trust, PJSC ALROSA, Mirny, Russia; delistarmus@mail.ru.

**Anvar S. Sarvarov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Institute of Power Engineering and Automated Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; anvar@magtu.ru.

**Oleg V. Fedorov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Management of Innovation Activities, Faculty of Economics, Management and Innovation, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia; fov52@mail.ru.

*Статья поступила в редакцию 10.01.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2022; принята к публикации 31.01.2022.*

*The article was submitted 10.01.2022; approved after reviewing 31.01.2022; accepted for publication 31.01.2022.*