ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(11):159-181
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.311 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_159

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УНИВЕРСАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Ю.А. Сычев[1], М.Е. Аладьин[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: m.aladyin@gmail.com

Аннотация: Обоснована актуальность проблемы повышения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой для обеспечения энергетической эффективности производственных процессов. Показана необходимость наличия многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями в комбинированных системах электроснабжения, характеризующихся вариацией показателей качества электрической энергии, при изменении параметров питающей сети и подключенной нагрузки. Выявлены основные конфигурации универсальных регуляторов качества электрической энергии, которые также относятся к классу многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с несколькими активными преобразователями. Показана перспективность применения универсальных регуляторов качества электрической энергии с распределенной конфигурацией в системах комбинированного электроснабжения с точки зрения эффективности управления. Обоснована необходимость анализа взаимного влияния активных преобразователей в составе универсального регулятора с распределенной структурой при повышении качества электрической энергии при различных путях формирования несинусоидальных режимов. Разработана математическая и имитационная модели универсального регулятора качества электрической энергии с распределенной структурой в системе электроснабжения с нелинейной и линейной нагрузками. Проведен комплексный анализ результатов моделирования в части оценки эффективности повышения качества электрической энергии по заданному набору показателей универсальным регулятором при различной последовательности включения активных преобразователей и условиях формирования несинусоидальных режимов со стороны источника и нагрузки. Дана оценка влияния универсального регулятора качества электрической энергии с распределенной структурой на составляющие коэффициента мощности при сложных несинусоидальных режимах.

Ключевые слова: качество, гармоники, фильтры, энергетическая, эффективность, регулятор, универсальный, комбинированный, активный, преобразователь, гибридный, нелинейный.

Для цитирования: *Сычев Ю. А., Аладьин М. Е.* Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 159–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_159.

© Ю.А. Сычев, М.Е. Аладьин. 2023.

Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines

Y.A. Sychev[1], M.E. Aladin[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: m.aladyin@gmail.com

Abstract: The urgent nature of the power quality improvement in the nonlinearly loaded industrial power lines in order to ensure production efficiency is substantiated. The necessity of multi-functional compensation and filtering devices with active converters in hybrid power lines is demonstrated. The CFD feature variation of power qualities in case of change in parameters of a power line or connected load. The main configurations of the general-purpose power quality controls which also are the multi-functional compensation and filtering devices with a few active converters are determined. The prospects for the general-purpose power quality controls with distributed configuration in hybrid power lines from the viewpoint of the control efficiency are shown. The need for the analysis of the cross-feed of active converters in a general-purpose distributed-structure control in the power quality improvement in different cases of anharmonicity is substantiated. The mathematical and simulation models are constructed for the general-purpose power quality control with the distributed structure in the nonlinearly and linearly loaded power lines. The integrated analysis of the modeling results is carried out to assess the efficiency of the power quality improvement by the general-purpose control by the preset quality determinants at different sequences of the active converters under conditions of anharmonicities of the source and load. The influence of the general-purpose power quality control with the distributed structure on the components the power factor under complex anharmonicity is estimated.

Key words: quality, harmonics, filters, power, efficiency, control, universal, composite, active, converter, hybrid, nonlinear.

For citation: Sychev Y. A., Aladin M. E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):159-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_159.

Введение

В современных экономических условиях для промышленности России затраты на энергетические ресурсы составляют весомую долю в итоговой себестоимости производимой продукции, особенно для предприятий минерально-сырьевого комплекса [1, 2]. В частности, для угольной промышленности такие затраты составляют 15 — 20%, горнорудной — 20 — 30%, цементной — 30 — 45% [1, 2], нефтегазодобывающей — до 40%, при транспортировке нефти и газа — 70 — 80%, для цветной металлургии — 25 — 40%. При этом одним из наиболее эффективных, гибких и функциональных средств снижения энергетической составляющей при промышленном производстве являются технологии повышения качества электрической энергии.

Проблема повышения качества электрической энергии в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой остается актуальной на протяжении последних 30 — 40 лет в связи с интенсивным внедрением электротех-

нических комплексов с преобразователями частоты систем регулируемого электропривода технологических установок [3 — 5]. Известны многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых, включая И.В. Жежеленко, А.К. Шидловского, Б.Н. Абрамовича, Ю.Г. Шакаряна, Ю.К. Розанова, А.В. Ляхомского, Л.А. Плащанского, А.Е. Козярука, С.И. Гамазина, М.С. Ершова [6], М.В. Агунова, Д.С. Осипова, А.И. Чивенкова, В.Н. Мещерякова, В.И. Зацепиной, В.П. Довгуна [7], Е.Н. Сосниной [8], М.В. Пронина, Р.Т. Шрейнера, А.А. Ефимова, С.Г. Германа-Галкина [9], D. Arrilaga, D. Bredly, M. Bollen, P. Salmeron, S. P. Litran, L. Czarnecki, H. Akagi, P. Tenti, P. Mattavelli и других [10, 11], где научно обосновывается непосредственное и косвенное влияние показателей качества электрической энергии на уровень энергетической эффективности систем электроснабжения, устойчивости и надежности работы электротехнического и электромеханического оборудования, электромагнитной и электромеханической совместимости электрооборудования [11].

Также с развитием технологий силовой электроники и преобразовательной техники за последние 20 — 30 лет появился ряд принципиально новых устройств повышения качества электроэнергии, среди которых в первую очередь необходимо выделить фильтрокомпенсирующие устройства с управляемыми активными преобразователями [11, 12]. Появление нового класса устройств позволило, с одной стороны, повышать уровень качества электроэнергии более эффективно, с другой — потребовало развития теории, методов и средств структурного и параметрического синтеза подобных устройств и их применения в системах электроснабжения различной конфигурации [13, 14]. В частности, анализ применения активных фильтрокомпенсирующих устройств, включая параллельные и последовательные активные фильтры, показал их ограниченные возможности в части коррекции показателей качества электроэнергии при вариации параметров питающей сети и подключенной нагрузки [14, 15].

С учетом относительной дороговизны подобных устройств их применение для повышения качества электроэнергии в каждом случае при заданных условиях требует подробного технико-экономического обоснования [16, 17]. Вместе с тем технологии гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, сочетающих в себе достоинства активных и пассивных фильтров, позволяют осуществлять повышение качества электрической энергии одновременно по нескольким показателям, а также реализовывать ряд дополнительных функций, включая компенсацию реактивной мощности, провалов и прерываний напряжения, обеспечение бесперебойного электроснабжения, синхронизацию параллельной работы разнотипных источников на общую нагрузку [18, 19]. Также необходимо учитывать развитие технологий многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на основе нескольких активных преобразователей, включая универсальные регуляторы качества электрической энергии [20, 21].

На протяжении последних 10 — 20 лет технологии и принципы распределенной генерации в отечественных и зарубежных научных публикациях рассматривались в качестве недалекой и единственной альтернативы традиционным централизованным энергосистемам с учетом развития альтернативных и возобновляемых источников, а также мировых трендов по снижению углеводородного следа [22, 23]. Однако в течение последних 5 лет, особенно в условиях промышленности России, стало понятно, что распределенная энергетика не сможет

стать полной альтернативой централизованным энергосистемам в ближайшем будущем [24, 25], а лишь обоснованным дополнением и резервом при наличии особо ответственной технологической нагрузки, не допускающей даже малейшего (до 0,15 с) перерыва электроснабжения [26, 27]. В подобном случае образуются системы комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников, работающих на общую нагрузку, где уровень качества электрической энергии является переменным и определяется параметрами питающей сети и подключенной нагрузки [28, 29]. В нормальном режиме электроприемники подключены к централизованной сети, а в случае отказов в ней электроснабжение наиболее ответственной нагрузки осуществляется от автономных источников для безаварийного отключения и завершения технологического процесса, или же для продолжения работы на время восстановления централизованной сети в зависимости от располагаемой мощности со стороны распределенной генерации [12, 13, 15].

В данных условиях требуется многофункциональное фильтрокомпенсирующее устройство с гибкой структурой и адаптивным алгоритмическим обеспечением для эффективного повышения качества электрической энергии [30, 31].

Таким образом, с учетом развития технологий комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников на общую ответственную технологическую нагрузку, в которой в разном соотношении присутствуют как линейные, так и нелинейные потребители, развитие теоретических и практических положений по структурному и параметрическому синтезу многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на основе активных преобразователей, в том числе и универсальных регуляторов качества электрической энергии, является актуальным [32, 33].

Постановка проблемы

Универсальные регуляторы качества электрической энергии или универсальные компенсаторы достаточно подробно описаны в отечественных и зарубежных научных трудах [34, 35]. Данные устройства состоят из двух активных преобразователей, один из которых последовательного типа (последовательный активный фильтр — ПСАФ), другой — параллельного типа (параллельный активный фильтр — ПАФ) [36, 37]. В некоторых случаях в зависимости от поставленных целей и задач роль последовательного компенсатора выполняет устройство динамической компенсации искажений напряжения (ДКИН), а роль параллельного компенсатора — устройство статической компенсации реактивной мощности (СТАТКОМ). Указанные преобразователи могут иметь общее звено постоянного тока или раздельные накопительные элементы [38, 39]. В первом случае универсальные регуляторы будут иметь сосредоточенную структуру, во втором — распределенную конфигурацию.

Также структура регулятора определяется порядком включения активных преобразователей последовательного и параллельного типа. Наибольшее распространение получила структура, в которой последовательный преобразователь (ПСАФ) включается ближе к источнику электроснабжения или со стороны питающей сети, а параллельный преобразователь (ПАФ) — ближе к узлу нагрузки [40, 41].

Большинство отечественных и зарубежных исследований посвящено универсальным регуляторам с общим звеном постоянного тока, при этом не в полной мере рассматриваются вопросы взаим-

ного влияния активных компенсаторов последовательного и параллельного типа друг на друга, что является важным при выборе алгоритмов управления и основных параметров преобразователей в условиях вариации характеристик питающей сети и подключенной нагрузки. Также при выходе из строя общего звена постоянного тока для обоих преобразователей универсальный регулятор прекращает свою работу, в то время как при разделении накопительных элементов в случае отказа в одном из них оставшийся преобразователь останется в работе, и регулятор будет функционировать частично. Таким образом, оснащение каждого активного преобразователя своим звеном постоянного тока является предпочтительным с точки зрения эффективности повышения качества электрической энергии и сохранения части функций универсального регулятора в комбинированных системах электроснабжения переменной структуры [42, 43].

В соответствии с изложенным, представляется целесообразным исследование и анализ взаимного влияния активных преобразователей последовательного и параллельного типа друг на друга с отдельными накопительными элементами в составе универсальных регуляторов в условиях комбинированных систем электроснабжения для повышения эффективности коррекции показателей качества электрической энергии. Также это позволит разработать алгоритм адаптивного управления универсальными регуляторами качества электрической энергии вместе с теоретическими и практическими рекомендациями по выбору их параметров в условиях комбинированных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой.

Методология

Теоретической основой методологии проведения исследований в соответствии с поставленными целями и задачами являются:

- методы фазовых преобразований и синхронизации токов и напряжений в электротехнических комплексах и системах электроснабжения;
- методы симметричных составляющих токов и напряжений;
- методы анализа несинусоидальных режимов в электротехнических комплексах и системах электроснабжения;
- методы математического и имитационного моделирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения;
- методы анализа составляющих коэффициента мощности при несинусоидальных режимах.

Методы фазовых преобразований, основанные на преобразованиях Парка-Кларк, используются в большинстве случаев для формирования опорных величин при управлении активными преобразователями параллельного типа (ПАФ) [44, 45]. При этом в качестве опорной величины выступает основная составляющая тока, потребляемого нелинейной нагрузкой или узлом нагрузки, содержащим линейную и нелинейную части. Относительно указанной опорной величины определяются подлежащие компенсации высшие THD_I гармоники тока и его реактивная составляющая при необходимости.

Для этого осуществляются следующие преобразования из трехфазной системы *abc* в двухфазную $\alpha\beta$:

$$U_\alpha = \frac{\left(2U_{ab} + U_{bc}\right)}{3}; U_\beta = \frac{U_{bc}}{\sqrt{3}}, \qquad (1)$$

где U_{ab} и U_{bc} — линейные напряжения питающей сети.

На основе данных преобразований определяется угол φ, необходимый для фазовой синхронизации компенсационных сигналов:

$$\cos\varphi = \frac{U_\alpha}{U_{sm}}; \sin\varphi = \frac{U_\beta}{U_{sm}}; \qquad U_{sm} = \sqrt{U_\alpha{}^2 + U_\beta{}^2} \tag{2}$$

Фазовую синхронизацию осуществляет детально описанная во многих научных трудах система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), после чего новое настроенное значение φ' используется для формирования опорного тока в системе координат $\alpha\beta$:

$$I_{3\alpha} = I_3 \cos\varphi'; I_{3\beta} = I_3 \sin\varphi', \tag{3}$$

где $I_з$ – заданная величина компенсационного тока параллельного преобразователя, определяемая исходя из значения тока, потребляемого нелинейной нагрузкой или узлом нагрузки.

Далее осуществляются обратные фазовые преобразования из системы координат $\alpha\beta$ в исходную *abc*:

$$I_{3a} = I_{3\alpha}; I_{3b} = \frac{\left(\sqrt{3}I_{3\beta} - I_{3\alpha}\right)}{2}; \quad I_{3b} = \frac{\left(\sqrt{3}I_{3\beta} - I_{3\alpha}\right)}{2}; I_{3c} = \frac{\left(-\sqrt{3}I_{3\beta} - I_{3\alpha}\right)}{2} \tag{4}$$

Полученные опорные токи используются для выявления искажений, подлежащих компенсации параллельным активным преобразователем (ПАФ) путем сравнения с фактическим током, потребляемым нелинейной нагрузкой или узлом нагрузки.

Данный метод положен в основу реализации системы управления параллельным активным преобразователем (ПАФ) в составе универсального регулятора качества электрической энергии, рассматриваемого в данной статье.

Методы симметричных составляющих, или, как указывается в зарубежных источниках, преобразования Фортескью, используются для формирования опорных величин при управлении активными преобразователями последовательного типа [46, 47]. При этом в качестве опорной величины выступает основная составляющая прямой последовательности напряжения, приложенного к нелинейной нагрузке или узлу нагрузки, содержащему линейную и нелинейную части. Относительно указанной опорной величины определяются подлежащие компенсации высшие гармоники напряжения и его отклонение. Согласно данному методу определяются составляющие комплексные значения прямой U_1, обратной U_2 и нулевой U_0 последовательности напряжения:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + a\dot{U}_A + a^2\dot{U}_A\right); \tag{5}$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C); \quad \dot{U}_0 = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C\right) \tag{6}$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – комплексные значения фазных напряжений сети; $a = 2\pi / 3$.

Данный метод положен в основу реализации системы управления последовательным активным преобразователем (ПСАФ) в составе универсального регулятора качества электрической энергии, рассматриваемого в данной статье.

В процессе исследований использовались общеизвестные и общепринятые методы анализа несинусоидальных режимов, в частности быстрое и дискретное преобразование Фурье для выявления спектрального состава тока и напряжения.

В качестве инструмента имитационного моделирования при исследованиях принята система Simulink Matlab, в которой посредством численных методов реализованы дифференциальные уравнения различных порядков, описывающие электромагнитные процессы в электротехнических комплексах и системах электроснабжения. Применение данной среды имитационного моделиро-

вания многократно апробировано, описано и доказало свою адекватность во многих отечественных и зарубежных научных трудах в области исследования проблем качества электрической энергии [48, 49].

Метод анализа составляющих коэффициента мощности при несинусоидальных режимах используется в данных исследованиях в качестве дополнительного критерия оценки эффективности повышения качества электрической энергии универсальным регулятором. Согласно исследованиям [50], общий коэффициент мощности k_M при несинусоидальных режимах определяется в соответствии:

$$k_M = k_{M1} k_{S1} \left(1 + k_{ph}\right), \qquad (7)$$

где $k_{M1} = P_1 / S_1$ — коэффициент мощности по основной составляющей; $k_{S1} = S_1 / S$ — коэффициент, отражающий степень завышения полной мощности элементов электрической сети при несинусоидальных режимах; $k_{ph} = P_{ph} / P_1$ — коэффициент неактивных составляющих мощности высших гармоник

$$\left(P_{ph} = \Sigma U_n I_n \cos\varphi_n \text{, при } n \geqslant 2,\right.$$

$$\left. P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = U_1 I_1 k_{M1}\right).$$

Согласно выражению (7), максимальный коэффициент мощности при несинусоидальных режимах достигается при следующих условиях:

$$k_{M1} \to 1;\ k_{S1} \to 1;\ k_{ph} > 0;\ k_{ph} \to \min. \quad (8)$$

Основными критериями оценки эффективности повышения качества электрической энергии универсальным регулятором являются следующие показатели:

- степени снижения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения THD_U и тока THD_I;
- степень увеличения напряжения на зажимах узла нагрузки;
- степень снижения тока, потребляемого узлом нагрузки;
- степень увеличения составляющих суммарного коэффициента мощности (k_{M1}, k_{S1}) согласно выражению (7).

Таким образом, под эффективностью работы универсального регулятора подразумевается его способность обеспечивать требуемое увеличение или снижение указанных показателей, представленных выше, а также соответствие уровня качества электроэнергии в части уровня искажения напряжения нормам ГОСТ 32144-2013.

В соответствии с поставленными целями и задачами, исследования включали в себя следующие основные этапы:

- анализ эффективности функционирования универсального регулятора качества электрической энергии с распределенной структурой при различных способах формирования несинусоидальных режимов;
- анализ эффективности функционирования универсального регулятора качества электрической энергии с распределенной структурой при различном порядке подключения активных преобразователей последовательного и параллельного типа;
- анализ эффективности функционирования универсального регулятора качества электрической энергии при вариации параметров питающей сети и подключенной нагрузки.

Результаты

В качестве объекта исследования принят универсальный регулятор качества электрической энергии.

Детально его конфигурация изображена на рис. 1.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: $S_{ПСАФ}$ — мощность выходного трансформатора ПСАФ; $U_{ПАФ}$, $U_{ПСАФ}$ — напряжения на выходе активных преобразователей; u_1, u_2 — напряжения в звеньях постоянного тока активных преобразователей; $i_{ПАФ}$, $i_{ПСАФ}$ — токи на

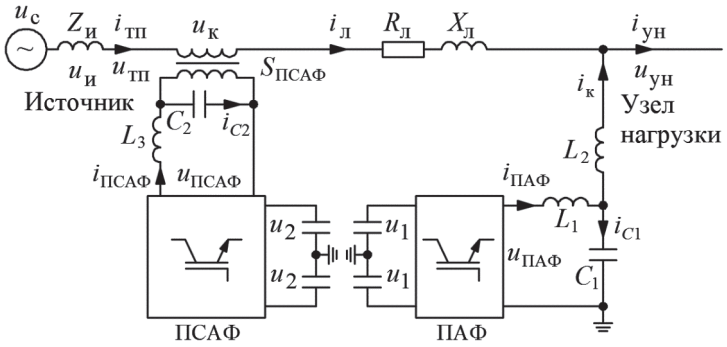

Рис. 1. Структура исследуемого универсального регулятора качества электрической энергии
Fig. 1. Structure of general-purpose power quality control under study

выходе активных преобразователей; L_1, L_2, L_3, C_1, C_2 — параметры выходных фильтров активных преобразователей; $Z_и$ — внутреннее сопротивление источника; $u_и$, $u_{ТП}$, $u_{ун}$ — напряжение источника, точки подключения и узла нагрузки соответственно; $i_{ТП}$, $i_{ун}$ — токи точки подключения и узла нагрузки соответственно; i_K, u_K — компенсационный ток и напряжение активных преобразователей; i_{C1}, i_{C2} — токи выходных фильтров активных преобразователей; $k_{пр1}$, $k_{пр2}$ — функции состояния силовых ключей активных преобразователей; $R_Л$, $X_Л$ — активное и реактивное сопротивление линии соответственно.

При математическом и имитационном моделировании приняты следующие допущения [51]:

- состояние силовых элементов активных преобразователей описывается коэффициентом k_{in}, который принимает значения 0 и 1 при закрытии и открытии элемента соответственно;
- на протяжении одного шага интегрирования все нелинейности рассматриваются как линейные зависимости, затем происходит уточнение и пересчет коэффициентов уравнений.

Математическая модель исследуемого универсального регулятора, приведенного на рис. 1, описывается следующими уравнениями.

Для цепи последовательного активного преобразователя (ПСАФ):

$$u_K = k_{тр2}u_{C2} = 2k_{пр2}u_2 - \Delta u_{L3} = \\ = 2u_{ПСАФ} - \Delta u_{L3}; \quad (9)$$

$$u_{ПСАФ} = L_3\frac{di_{ПСАФ}}{dt} + U_{C2};$$

$$i_{ТП} = i_л;\ u_K = i_{ТП}k;\ i_{C2} = C_2\frac{dU_{C2}}{dt}; \quad (10)$$

$$u_с = u_и + u_{ТП} + u_K = i_{ТП}(Z_и + k) + \\ + u_{ТП} = i_{ТП}Z_и + u_K + i_{ТП}; \quad (11)$$

$$S_{ПСАФ} = \sqrt{3}\,ki_{ТП}^2;\ \Delta u_л = \sqrt{3}\,i_л Z_л; \\ Z_л = \sqrt{R_л^2 + X_л^2}. \quad (12)$$

Для цепи параллельного активного преобразователя (ПАФ):

$$u_{ПАФ} = 2k_{пр1}u_1 = \Delta u_{L1} + u_{C1} = \\ = \Delta u_{L1} + \Delta u_{L2} + u_{ун}; \quad (13)$$

$$\Delta u_л = u_{ТП} - u_{C1};$$

$$\Delta u_{L1} = L_1\frac{di_{ПАФ}}{dt};\ \Delta u_{L2} = L_2\frac{di_K}{dt}. \quad (14)$$

$$i_{C1} = C_1\frac{du_{C1}}{dt};\ i_{ПАФ} = i_{C1} + i_K. \quad (15)$$

В выражениях (9) — (15): $k_{тр2}$ — коэффициент трансформации трансформа-

тора на выходе ПСАФ; k — коэффициент, отражающий взаимосвязь между компенсационным напряжением ПСАФ и током сети, остальные обозначения аналогичны рис. 1.

При математическом и имитационном моделировании в качестве базисной величины внутреннего сопротивления питающей сети 0,4 кВ принято сопротивление источника бесконечной мощности с мощностью короткого замыкания более 200 МВА, к которому подключена линейная и нелинейная нагрузка суммарной мощностью от 200 до 300 кВт. В качестве базисной величины сопротивления линии между последовательным и параллельным преобразователем в составе регулятора принято сопротивление кабельной линии 50 м с учетом допустимых потерь напряжения не более 5%. Согласно требованиям ГОСТ 32144-2013 величина суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не должна превышать 8% для сетей 0,4 кВ. Уровень высших гармоник тока не регламентируется отечественной нормативной документацией, поэтому в рамках данных исследований оценивалось соответствие степени искажения тока требованиям международных стандартов (не более 20%). Нелинейная нагрузка представлена в виде неуправляемого шестипульсного выпрямителя в составе преобразователя частоты системы регулируемого электропривода технологического оборудования.

В процессе моделирования рассматривались следующие режимы работы универсального регулятора в части последовательности включения преобразователей и пути формирования несинусоидальных условий [52]:

- в первый момент времени включение линейной нагрузки (ЛН), далее подключение нелинейной нагрузки (НН), затем появление искажений со стороны питающей сети, включение последовательного активного преобразователя (ПСАФ), включение параллельного активного преобразователя (ПАФ) (Режим № 1);
- в первый момент времени включение нелинейной нагрузки, далее подключение линейной нагрузки, затем появление искажений со стороны питающей сети, включение последовательного активного преобразователя, включение параллельного активного преобразователя (Режим № 2);
- в первый момент времени включение линейной нагрузки, далее подключение нелинейной нагрузки, затем появление искажений со стороны питающей сети, включение параллельного активного преобразователя, включение последовательного активного преобразователя (Режим № 3);
- в первый момент времени включение нелинейной нагрузки, далее подключение линейной нагрузки, затем появление искажений со стороны питающей сети, включение параллельного активного преобразователя, включение последовательного активного преобразователя (Режим № 4);
- в первый момент времени появление искажений со стороны питающей сети, далее включение линейной нагрузки, затем подключение нелинейной нагрузки, включение последовательного активного преобразователя, включение параллельного активного преобразователя (Режим № 5);
- в первый момент времени появление искажений со стороны питающей сети, далее включение линейной нагрузки, затем подключение нелинейной нагрузки, включение параллельного активного преобразователя, включение последовательного активного преобразователя (Режим № 6);
- в первый момент времени появление искажений со стороны питающей сети, далее включение нелинейной нагрузки,

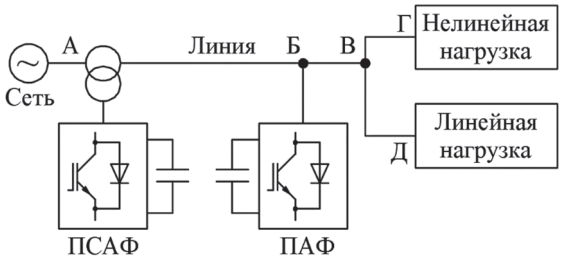

Рис. 2. Точки измерения составляющих коэффициента мощности при моделировании универсального регулятора
Fig. 2. Measurement points of power factor components in modeling general-purpose control

затем подключение линейной нагрузки, включение параллельного активного преобразователя, включение последовательного активного преобразователя (Режим № 7);

• в первый момент времени появление искажений со стороны питающей сети, далее включение нелинейной нагрузки, затем подключение линейной нагрузки, включение последовательного активного преобразователя, включение параллельного активного преобразователя (Режим № 8).

На рис. 2 приведены пять точек (А, Б, В, Г, Д), в которых при моделировании универсального регулятора для указанных восьми режимов проводились измерения соответствующих показателей.

В табл. 1 — 4 приведены значения тока (I), напряжения (U), суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения (THD_U) и тока (THD_I), полученные по результатам моделирования указанных режимов. Указанные показатели измерялись в точке подключения универсального регулятора качества электрической энергии (точка А на рис. 2).

На рис. 3 — 7 приведены гистограммы значений k_M, k_{M1}, k_{S1}, k_{ph}, полученные по

Таблица 1

Режимы № 1 и № 2
Modes No. 1 and No. 2

Показатель	Последовательность включения преобразователей и формирования несинусоидального режима				
	вкл. ЛН	вкл. НН	искажения сети	вкл. ПСАФ	вкл. ПАФ
Режим № 1					
I, А	210,9	311	311,2	328,4	321
THD_I, %	2,07	9,23	9,67	9,88	8,52
U, В	307,6	306,4	306,5	323,7	319,5
THD_U, %	0,01	0,58	7,66	7,62	9,51
Режим № 2					
I, А	107,1	311	311,2	328,4	320,9
THD_I, %	27,29	9,23	9,67	9,88	8,65
U, В	309	306,4	306,5	323,7	319,4
THD_U, %	0,59	0,58	7,66	7,62	9,57

Таблица 2

Режимы № 3 и № 4
Modes No. 3 and No. 4

Показатель	Последовательность включения преобразователей и формирования несинусоидального режима				
	вкл. ЛН	вкл. НН	искажения сети	вкл. ПСАФ	вкл. ПАФ
Режим №3					
I, А	210,9	311	311,2	308,1	321
THD_I, %	2,07	9,23	9,67	8,9	8,71
U, В	307,6	306,4	306,5	306,6	319,4
THD_U, %	0,01	0,58	7,66	9,69	9,59
Режим №4					
I, А	107,1	311	311,2	308	321
THD_I, %	27,29	9,23	9,67	8,99	8,66
U, В	309	306,4	306,5	306,6	319,4
THD_U, %	0,59	0,58	7,66	9,73	9,54

результатам анализа режимов работы универсального регулятора в указанных точках, исходя из последовательности включения активных преобразователей и путей формирования несинусоидальных условий [53].

Обсуждение

Результаты, приведенные в табл. 1—4, позволяют сделать следующие выводы и выявить основные закономерности:

• наиболее эффективными с точки зрения повышения качества электриче-

Таблица 3

Режимы № 5 и № 6
Modes No. 5 and No. 6

Показатель	Последовательность включения преобразователей и формирования несинусоидального режима				
	вкл. ЛН	вкл. НН	искажения сети	вкл. ПСАФ	вкл. ПАФ
Режим № 5					
I, А	—	211	311,2	328,4	320,8
THD_I, %	—	4,28	9,67	9,88	8,73
U, В	310,3	307,7	306,5	323,7	319,4
THD_U, %	7,62	7,61	7,66	7,62	9,58
Режим № 6					
I, А	—	211	311,2	308,1	320,8
THD_I, %	—	4,28	9,67	8,89	8,65
U, В	310,3	307,7	306,5	306,6	319,3
THD_U, %	7,62	7,61	7,66	9,7	9,55

Таблица 4

Режимы № 7 и № 8
Modes No. 7 and No. 8

Показатель	Последовательность включения преобразователей и формирования несинусоидального режима				
	вкл. ЛН	вкл. НН	искажения сети	вкл. ПСАФ	вкл. ПАФ
Режим № 7					
I, А	–	107,1	311,2	308,1	321
THD_I, %	–	27,29	9,67	8,97	8,59
U, В	310,3	309,1	306,5	306,6	319,4
THD_U, %	7,62	7,67	7,66	9,71	9,54
Режим № 8					
I, А	–	107,1	311,2	328,4	321
THD_I, %	–	27,29	9,67	9,88	8,71
U, В	310,3	309,1	306,5	323,7	319,4
THD_U, %	7,62	7,67	7,66	7,62	9,6

ской энергии по снижению уровня высших гармоник тока и напряжения, а также по уменьшению отклонения напряжения являются режимы № 3, 4, 6, 7, вне зависимости от путей формирования несинусоидального режима, при этом во всех указанных режимах величина потребляемого узлом нагрузки тока растет не более чем на 5%, что является побочным эффектом работы последовательного активного преобразователя;

• при включении последовательного преобразователя в момент времени после запуска параллельного преобразователя в составе универсального регулятора наблюдается увеличение потреб-

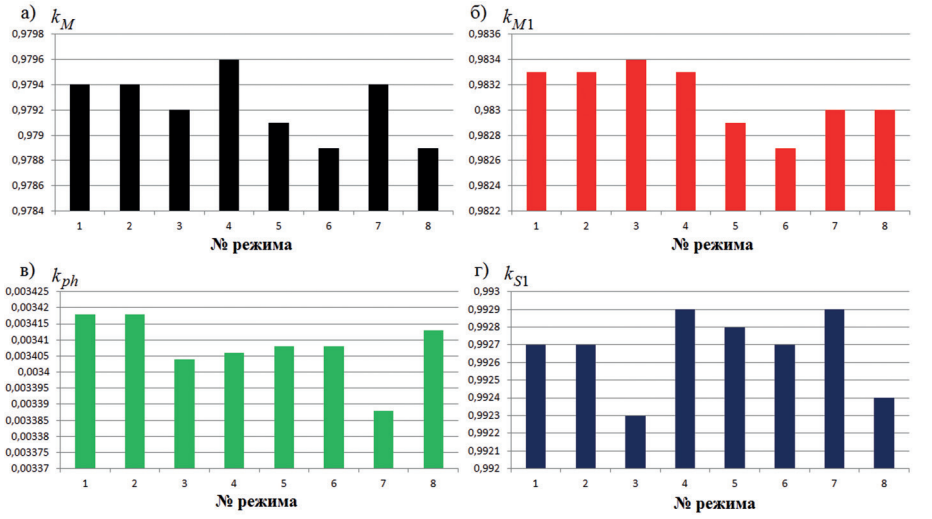

Рис. 3. Составляющие коэффициента мощности в точке А
Fig. 3. Power factor components at point A

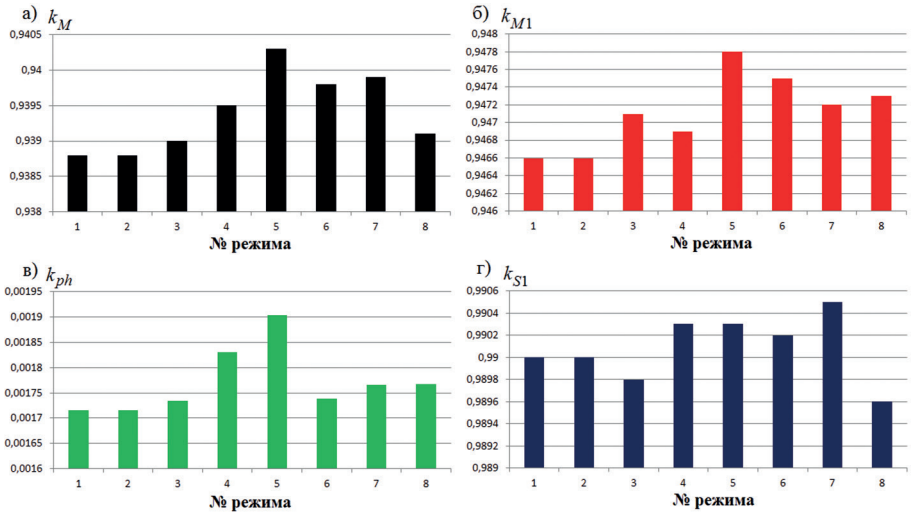

Рис. 4. Составляющие коэффициента мощности в точке Б
Fig. 4. Power factor components at point B

ляемого узлом нагрузки тока не более чем на 5%, при этом величина напряжения увеличивается также не более чем на 5%;

• при включении параллельного преобразователя в момент времени после запуска последовательного преобразователя в составе универсального регулятора наблюдается снижение потребляемого узлом нагрузки тока не более чем на 2%, при этом также снижается уровень напряжения, не более чем на 1%, а уровень высших гармоник напряжения растет не более чем на 2%;

• степень эффективности последовательного преобразователя по компенсации отклонений напряжения значительно выше, чем по подавлению гармоник

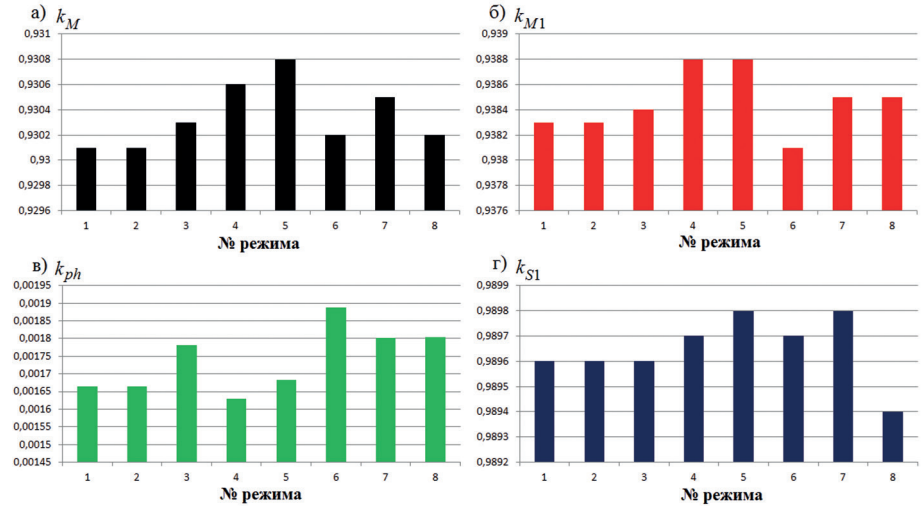

Рис. 5. Составляющие коэффициента мощности в точке В
Fig. 5. Power factor components at point V

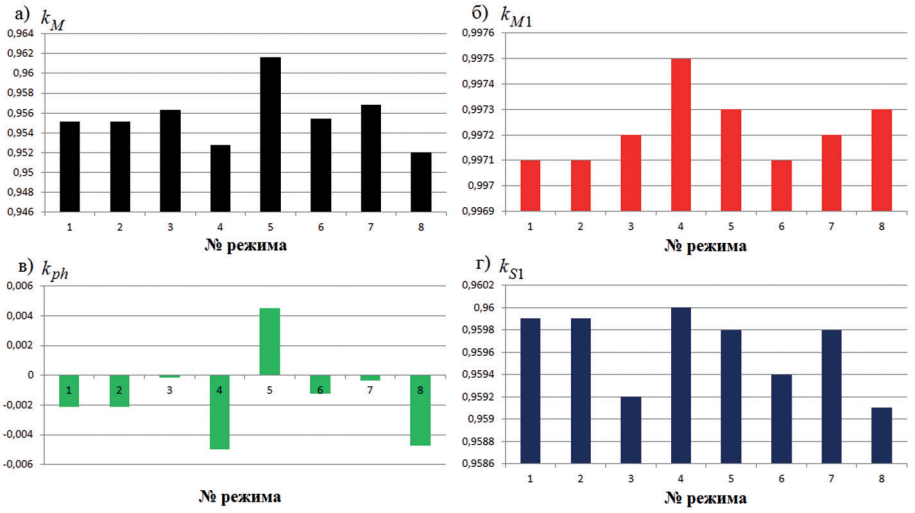

Рис. 6. Составляющие коэффициента мощности в точке Г
Fig. 6. Power factor components at point G

напряжения, в частности, по результатам применения данного преобразователя в составе универсального регулятора напряжение в среднем повышается на 4 — 5%, а уровень гармоник напряжения снижается менее чем на 1%;

• ввод в работу последовательного преобразователя при функционирующем параллельном способствует снижению уровня гармоник тока менее чем на 1%, что соизмеримо со степенью эффективности параллельного преобразователя.

Согласно данным, приведенным на рис. 3 — 7, можно сделать следующие основные выводы.

1. На зажимах нелинейной нагрузки (точка Г на рис. 2) коэффициент k_{ph}, отражающий наличие неактивных состав-

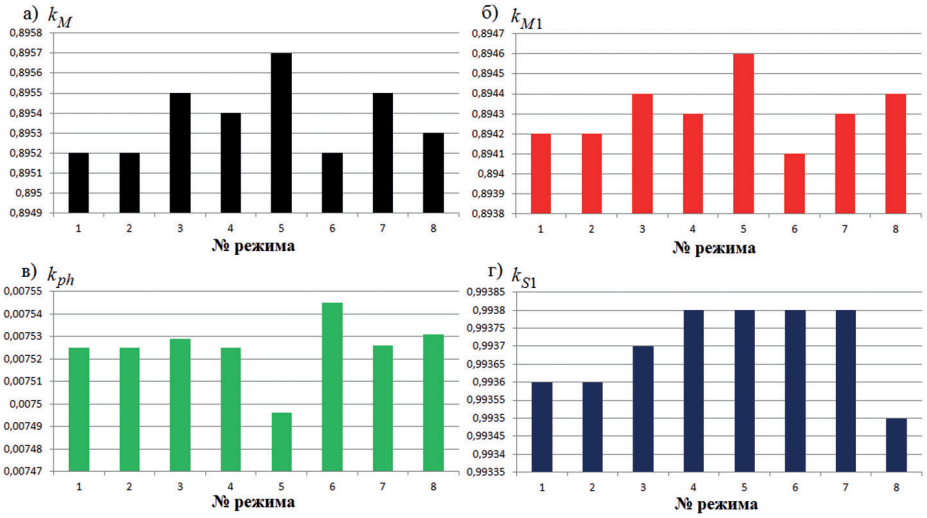

Рис. 7. Составляющие коэффициента мощности в точке Д
Fig. 7. Power factor components at point D

ляющих мощности из-за присутствия высших гармоник, принимает положительное значение только в режиме № 5, что ведет к увеличению коэффициента мощности k_M. В остальных режимах величина k_{ph} отрицательна, что влияет на снижение общего коэффициента мощности k_M. Таким образом, в указанном режиме активные преобразователи в составе регулятора оказывают косвенное влияние на характер потребления нелинейной нагрузкой высших гармоник.

2. На зажимах линейной нагрузки (точка Д на рис. 2) коэффициент k_{ph}, отражающий наличие неактивных составляющих мощности из-за присутствия высших гармоник, принимает положительное значения во всех восьми режимах работы универсального регулятора, при этом минимальное значение k_{ph} наблюдается в пятом режиме.

3. В точке подключения универсального регулятора (точка А на рис. 2) общий коэффициент мощности k_M достигает максимального значения в четвертом режиме вместе с коэффициентом k_{S1}.

4. В точке подключения узла нагрузки (точка В на рис. 2) максимальные значения коэффициентов k_M, k_{ph}, k_{M1} достигаются в режиме № 5.

5. В точке подключения параллельного преобразователя в составе регулятора (точка Б на рис. 2) максимальные значения коэффициентов k_M, k_{S1}, k_{M1} достигаются в режиме № 5.

6. В целом установлено, что параллельный преобразователь в составе регулятора обладает более высокой эффективностью по коррекции коэффициента мощности при несинусоидальных режимах [54, 55], чем последовательный.

Также по результатам моделирования установлено более существенное влияние длины линии от точки подключения универсального регулятора до узла нагрузки на показатели эффективности повышения качества электрической энергии, в отличие от внутреннего сопротивления питающей сети. В частности, при вариации полного сопротивления линии от регулятора до узла нагрузки от 0,1 до 10 от исходной базовой величины значения THD_U и THD_I изменялись в пределах от 8 до 30% и от 4 до 10% соответственно для седьмого режима. При аналогичной вариации полного сопротивления питающей сети значения THD_U и THD_I изменялись в пределах от 9 до 14% и от 5 до 9% соответственно для седьмого режима. Также для седьмого режима выявлено, что при мощности нелинейной нагрузки, равной 30 — 40% от суммарной мощности узла, достигается максимальная эффективность коррекции показателей качества электрической энергии.

Данная закономерность показывает возможность универсального регулятора качества электрической энергии распределенной структуры с одинаковой эффективностью функционировать в системах комбинированного электроснабжения при переходе питания ответственной нагрузки с централизованных источников на автономные, и наоборот.

Сделанные выводы и выявленные закономерности показывают, что уровень эффективности активных преобразователей различных типов по повышению качества электрической энергии и коррекции коэффициента мощности сети даже при их совместной работе в рамках универсальных регуляторов достаточно ограничен. Данный факт необходимо учитывать при применении универсальных регуляторов в конкретных условиях исходя из параметров и характеристик питающей сети (централизованная или автономная энергосистема) и подключенной нагрузки (соотношение линейной и нелинейной нагрузки), а также текущих значений показателей качества электроэнергии и последовательности подключения активных преобразователей. Для

определенных условий эффективность регуляторов будет достаточной по заданной совокупности показателей, для других условий — недостаточной.

Это доказывает необходимость использования не только активных преобразователей в составе универсальных регуляторов, но и пассивных фильтров различной конфигурации. Помимо этого, целесообразно оснащение активных преобразователей на выходе пассивными фильтрами различной конфигурации. Таким образом, речь идет о рассмотрении более сложных структур универсальных регуляторов качества электроэнергии с активными преобразователями и пассивными фильтрами.

Подобные более сложные структуры также относятся к классу многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с несколькими активными преобразователями [56]. Данные структуры являются объектом дальнейших исследований.

Полученные результаты будут полезны при разработке, планировании, организации и реализации комплексных мероприятий по повышению качества электрической энергии, энергоэффективности и электробезопасности [57] в системах электроснабжения предприятий практически всех отраслей промышленности, включая горную [58—60], металлургическую, нефтегазовую [61, 62] и обрабатывающую [63].

Заключение

1. Обоснована актуальность проблемы повышения качества электрической энергии в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой с точки зрения обеспечения энергетической эффективности.

2. Показана необходимость наличия многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями в комбинированных системах электроснабжения, характеризующихся вариацией показателей качества электрической энергии, при изменении параметров питающей сети и подключенной нагрузки.

3. Выявлены основные конфигурации универсальных регуляторов качества электрической энергии, которые также относятся к классу многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями.

4. Показана перспективность применения универсальных регуляторов качества электрической энергии с распределенной конфигурацией в системах комбинированного электроснабжения.

5. Обоснована необходимость анализа взаимного влияния активных преобразователей в составе универсального регулятора с распределенной структурой при повышении качества электрической энергии.

6. Разработана математическая и имитационная модели универсального регулятора качества электрической энергии с распределенной структурой.

7. Проведен комплексный анализ результатов моделирования в части оценки эффективности повышения качества электрической энергии по заданному набору показателей универсальным регулятором при различной последовательности включения активных преобразователей и различных условиях формирования несинусоидальных режимов. При этом установлено, что во всех режимах работы универсальный регулятор не способен обеспечивать повышение качества электрической энергии согласно нормам ГОСТ 32144-2013 в части искажений формы кривой напряжения, что требует усовершенствования его структуры в части установки дополнительных пассивных фильтров. В этом случае речь идет о применении гибридных универсальных регуляторов, что является объектом дальнейших исследований.

8. Дана оценка влияния универсального регулятора качества электрической энергии с распределенной структурой на составляющие коэффициента мощности при несинусоидальных режимах.

Авторский коллектив выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю, доктору технических наук, профессору, профессору кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского Горного университета Б.Н. Абрамовичу (1937 — 2021) за помощь в подготовке и проведении научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lyakhomskii A. V.*, *Petrochenkov A. B.*, *Petukhov S. V.*, *Perfileva E. N.* Consulting on energy management systems in mining industry // Eurasian Mining. 2022, vol. 38, no. 2, pp. 30 — 33. DOI: 10.17580/em.2022.02.07.

2. *Ляхомский А. В.*, *Перфильева Е. Н.*, *Кутепов А. Г.* Анализ деятельности организаций угольной отрасли по обеспечению повышения энергоэффективности // Уголь. — 2021. — № 4 (1141). — С. 32 — 36.

3. *Абрамов Б. И.*, *Державин Д. А.*, *Чуриков А. М.*, *Новоселов Ю. Б.*, *Суслов М. А.*, *Шевырев Ю. В.* Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 1. — С. 90 — 92.

4. *Устинов Д. А.*, *Айсар А. Р.* Разработка нового рабочего алгоритма для повышения эффективности удаленной защиты в сетях распределенной генерации // Безопасность труда в промышленности. 2023. — № 5. — С. 20 — 27. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-20-27.

5. *Zhukovskiy Y. L., Batueva D. E., Buldysko A. D., Gil B., Starshaia V. V.* Fossil energy in the framework of sustainable development: analysis of prospects and development of forecast scenarios // Energies. 2021, vol. 14, no. 17, article 5268. DOI: 10.3390/en14175268.

6. *Ершов М. С.*, *Феоктистов Е. А.* Влияние режима неустойчивого вращения долота на энергоэффективность электропривода ротора буровой установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 148 — 161. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_148.

7. *Dovgun V., Temerbaev S., Chernyshov M., Novikov V., Boyarskaya N., Gracheva E.* Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks // Energies. 2020, vol. 13, no. 18, article 4915. DOI: 10.3390/en13184915.

8. *Sosnina E., Bedretdinov R., Kryukov E.* The effect of the thyristor energy router on harmonics // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 222 — 232. DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp222-232.

9. *Герман-Галкин С. Г.* Анализ и расчет параллельного активного фильтра // Электротехника. — 2018. — № 1. — С. 55 — 61. DOI: 10.3103/S1068371218010042.

10. *Perez Valles A., Salmeron Revuelta P.* New distributed measurement index for the identification of harmonic distortion and/or unbalance sources based on the IEEE Std. 1459 framework // Electric Power Systems Research. 2019, vol. 172, pp. 96 — 104.

11. *Жуковский Ю. Л.*, *Королев Н. А.*, *Малькова Я. М.* Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 686 — 700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

12. *Шевырева Н. Ю.* Влияние активного выпрямителя напряжения с релейным контуром тока на искажение формы напряжения сети // Горный журнал. — 2022. — № 12. — С. 49 — 54. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.09.

13. *Шевырев Ю. В.* Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 171—178. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

14. *Petrochenkov A., Romodin A., Leyzgold D., Kokorev A., Lyakhomskii A., Perfil'eva E., Gagarin Y., Shapranov R., Brusnitcin P., Ilyushin P.* Investigation of the influence of gas turbine power stations on the quality of electric energy in the associated petroleum gas utilization // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 1, article 299. DOI: 10.3390/su14010299.

15. *Шевырев Ю. В.*, *Шевырева Н. Ю.* Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 66—69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

16. *Litran S. P., Salmeron P.* Electromagnetic compatibility analysis of a control strategy for a hybrid active filter // Electric Power Systems Research. 2017, vol. 144, pp. 81—88. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.11.014.

17. *Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S.* Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation // Energies. 2022, vol. 15, no. 7, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

18. *Ляхомский А. В., Плащанский Л. А.* Обоснование метода определения расчетных электрических нагрузок алмазодобывающих предприятий, разрабатывающих месторождения в криолитозоне // Горный журнал. — 2019. — № 8. — С. 77—80. DOI: 10.17580/gzh.2019.08.15.

23. *Карасев М. А.*, *Петрушин В. В.*, *Рысин А. И.* Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 48—66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

24. *Антонов Б. М.*, *Баранов Н. Н.*, *Крюков К. В.*, *Розанов Ю. К.* Гибридная система децентрализованного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии разных видов // Электричество. — 2018. — № 1. — С. 8—13. DOI: 10.1080/14786451.2011.590898.

Литературу с п. 19 по п. 22 и с п. 25 по п. 29 смотри в REFERENCES.

30. *Устинов Д. А.*, *Айсар А. Р.* Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 2. — С. 15—20. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20.

Литературу с п. 31 по п. 54 смотри в REFERENCES.

55. *Щуров Н. И.*, *Мятеж С. В.*, *Малоземов Б. В.* Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 270—283. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_270.

56. *Щуров Н. И.*, *Мятеж С. В.*, *Малоземов Б. В.*, *Штанг А. А.* Определение реактивной мощности в сети тяговых подстанций шахтных электровозов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 284—300. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_284.

57. *Sandhya P., Ramrao N.* Modeling of hybrid active power filter using artificial intelligence controller: Hardware and software prospective // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2021, vol. 12, no. 4, pp. 2545—2556. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2545-2556.

58. *Малафеев С. И.*, *Микрюков В. И.*, *Малафеева А. А.* Высоковольтная карьерная перегонная станция: анализ электробезопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 143—153. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_143.

59. *Ляхомский А. В.*, *Фащиленко В. Н.* Исследование энергоэффективного управляемого электромеханического резонанса для процессов резания и разрушения горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 223—234. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-223-234.

60. *Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Y.* Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network // Metallurgist. 2023, vol. 66, no. 10, pp. 105—112. DOI: 10.1007/s11015-023-01445

61. *Воронин В. А., Непша Ф. С.* Выбор оптимальной конфигурации конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения выемочных участков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12. — С. 94—108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_94.

62. *Порсев Е. Г., Кравченко Д. П.* Применение электроосмоса в геологоразведке и на нефтепромыслах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 229—240. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_229.

63. *Pupin V., Safonov D., Fedorov O.* Modeling and research of operating modes of oil and gas pumping stations to determine the requirements for automation devices / Proceedings of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020. 2020, pp. 372—376. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216310. ГИАБ

REFERENCES

1. Lyakhomskii A. V., Petrochenkov A. B., Petukhov S. V., Perfileva E. N. Consulting on energy management systems in mining industry. *Eurasian Mining*. 2022, vol. 38, no. 2, pp. 30—33. DOI: 10.17580/em.2022.02.07.

2. Lyahomskii A. V., Perfil'eva E. N., Kutepov A. G. Analysis of the coal industry organizations activities on provision improve energy efficiency. *Ugol'*. 2021, no. 4 (1141), pp. 32—36. [In Russ].

3. Abramov B. I., Derzhavin D. A., Churikov A. M., Novoselov Yu. B., Suslov M. A., Shevyrev Yu. V. Instrumental studies of the electrical energy quality for oil field under conditions of wide-spread application of frequency-regulated electrical drives. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2016, no. 1, pp. 90—92. [In Russ].

4. Ustinov D. A., Aysar A. R. Development of a new working algorithm for improving the efficiency of the remote protectionin the distributed generation networks. O*ccupational Safety in Industry*. 2023, no. 5. pp. 20—27. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-20-27.

5. Zhukovskiy Y. L., Batueva D. E., Buldysko A. D., Gil B., Starshaia V. V. Fossil energy in the framework of sustainable development: analysis of prospects and development of forecast scenarios. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 17, article 5268. DOI: 10.3390/en14175268.

6. Ershov M. S., Feoktistov E. A. Impact of unstable drilling on energy efficiency of drill rotor drive. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 148—161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_148.

7. Dovgun V., Temerbaev S., Chernyshov M., Novikov V., Boyarskaya N., Gracheva E. Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 18, article 4915. DOI: 10.3390/en13184915.

8. Sosnina E., Bedretdinov R., Kryukov E. The effect of the thyristor energy router on harmonics. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 222—232. DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp222-232.

9. German-Galkin S. G. Analysis and calculation of a parallel active filter. *Elektrotekhnika*. 2018, no. 1, pp. 55—61. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371218010042.

10. Perez Valles A., Salmeron Revuelta P. New distributed measurement index for the identification of harmonic distortion and/or unbalance sources based on the IEEE Std. 1459 framework. *Electric Power Systems Research*. 2019, vol. 172, pp. 96—104.

11. Zhukovskiy Y. L., Korolev N. A., Malkova Y. M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 686—700. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

12. Shevyreva N. Yu. Influence of active rectifier with relay current circuit on supply voltage distortion. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 12, pp. 49—54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.09.

13. Shevyrev Yu. V. Power quality improvement in operation of semiconductor frequency converter. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 171—178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

14. Petrochenkov A., Romodin A., Leyzgold D., Kokorev A., Lyakhomskii A., Perfil'eva E., Gagarin Y., Shapranov R., Brusnitcin P., Ilyushin P. Investigation of the influence of gas turbine power stations on the quality of electric energy in the associated petroleum gas utilization. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1, article 299. DOI: 10.3390/su14010299.

15. Shevyrev Yu. V., Shevyreva N. Yu. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 66—69. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

16. Litran S. P., Salmeron P. Electromagnetic compatibility analysis of a control strategy for a hybrid active filter. *Electric Power Systems Research*. 2017, vol. 144, pp. 81—88. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.11.014.

17. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 7, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

18. Lyakhomskiy A. V., Plashchanskiy L. A. Substantiation of the method for determination of design electric demand for diamond ore mines in the permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2019, vol. 8, pp. 77—80. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.08.15.

19. Dobroskok N., Lavrinovskiy V. S., Trusova E. S. Simplified control system for grid-tied modular multilevel based energy storage. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 405—412. DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp405-412.

20. Ghazzali M., Haloua M., Giri F. Fixed-time control of voltage dynamics of three-phase voltage source inverters with LC output filter. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2022, vol. 13, no. 3, pp. 1843—1853. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1843-1853.

21. Zhukovskiy Y., Buldysko A., Revin I. Induction motor bearing fault diagnosis based on singular value decomposition of the stator current. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 8, article 3303. DOI: 10.3390/en16083303.

22. Tounsi M. M., Meliani B., Benaired N., Djaafar F. Fuzzy logic controller of photovoltaic panel-unified power quality conditioner with voltage compensation and stability. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 577—588. DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp577-588.

23. Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 48—66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

24. Antonov B. M., Baranov N. N., Kryukov K. V., Rozanov YU. K. A hybrid decentralized power supply system based on different kinds of renewable energy sources. *Elektrichestvo*. 2018, no. 1, pp. 8—13. [In Russ]. DOI: 10.1080/14786451.2011.590898.

25. Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020, vol. 29, pp. 1521—1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.

26. Litvinenko V. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: The focus on liquefied natural gas. *Resources*. 2020, vol. 9, no. 5, article 0059. DOI: 10.3390/resources9050059.

27. Queen H. J., Jayakumar J., Deepika T. J. Comparative techno-economic analysis of power system with and without renewable energy sources. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 1260—1268. DOI: 10.11591/ijeecs.v24.i3.pp1260-1268.

28. Ustinov D. A., Shafhatov E. R. Assessment of Reliability Indicators of Combined Systems of Offshore Wind Turbines and Wave Energy Converters. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 24, article 9630. DOI: 10.3390/en15249630.

29. Abdallah W. J., Hashmi K., Faiz M. T., Flah A., Channumsin S., Mohamed M. A., Ustinov D. A. A novel control method for active power sharing in renewable-energy-based micro distribution networks. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 2, article 1579. DOI: 10.3390/su 15021579.

30. Ustinov D. A., Aysar A. R. Analysis of the Impact of the Distributed Generation Facilities on Protection Systems and Voltage Mode: Review. *Occupational Safety in Industry*. 2023, no. 2. pp. 15 — 20. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20.

31. Ustinov D., Nazarychev A., Pelenev, D., Babyr K., Pugachev A. Investigation of the effect of current protections in conditions of single-phase ground fault through transient resistance in the electrical networks of mining enterprises. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 9, article 3690. DOI: 10.3390/en16093690.

32. Andang A., Hartati R. S., Manuaba I. B. G., Kumara I. N. S. Three-phase four-wire shunt hybrid active power filter model with model predictive control in imbalance distribution networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022, vol. 12, no. 6, pp. 5923 — 5937. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5923-5937.

33. Manimegalai M., Sebasthirani K. An optimal model for power quality improvement in smart grid using gravitational search-based proportional integral controller and node microcontroller unit. *Electric Power Components and Systems*. 2022, vol. 50, no. 16–17, pp. 989 — 1005. DOI: 10.1080/15325008.2022.2143940.

34. Madhavan M., Anandan N. Unified power quality control based microgrid for power quality enhancement using various controlling techniques. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023, vol. 29, no. 1, pp. 75 — 84. DOI: 10.11591/ijeecs.v29. i1.pp75 — 84.

35. Kostin V. N., Serikov V. A., Krivenko A. V. Modeling of operation modes of electrical supply systems with non-linear load. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues — Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. 2020, no. 1, pp. 263 — 271. DOI: 10.1201/978100301722.

36. Gomez Y. A. G., Garcia N. T., Hoyos F. E. Unit vector template generator applied to a new control algorithm for an UPQC with instantaneous power tensor formulation, a simulation case study. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020, vol. 10, no. 4, pp. 3889 — 3897. DOI: 10.11591/ijece.v10i4.pp3889-3897.

37. Rao K. V. G., Kumar M. K. The harmonic reduction techniques in shunt active power filter when integrated with non-conventional energy sources. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 1236 — 1245. DOI: 10.11591/ijeecs. v25.i3.pp1236-1245.

38. Abramovich B. N., Ustinov D. A., Abdallah Wael. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022, vol. 13, no. 2, pp. 1007 — 1025. DOI: 10.11591/ijpeds.v13. i2.pp1007-1025.

39. Rao N. S., Rao P. V. R. Novel multi-device unified power quality conditioner for power quality improvement. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 390 — 400. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i1.pp390-400.

40. Hasan K., Othman M. M., Rahman N. F. A., Hannan M. A., Musirin I. Significant implication of unified power quality conditioner in power quality problems mitigation. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2029, vol. 10, no. 4, pp. 2231 — 2237. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp2231-2237.

41. Sumana S., Dhanalakshmi R., Dhamodharan S. Validation of photovoltaics powered UPQC using ANFIS controller in a standard microgrid test environment. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022, vol. 12, no. 1, pp. 92 — 101. DOI: 10.11591/ijece. v12i1.pp92-101.

42. Laxmidevi Ramanaiah M., Damodar Reddy M. Moth flame optimization method for unified power quality conditioner allocation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2018, vol. 8, no. 1, pp. 530 — 537. DOI: 10.11591/ijece.v8i1.pp530-537.

43. Djoudi D., Cherif B., Toufik T., Abdelkhalek O. Hybrid unified power quality conditioner for power quality enhancement. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2020, vol. 11, no. 4, pp. 2126 — 2134. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp2126-2134.

44. Slimane B., Othmane A., Abdallah B. A. Unified power quality conditioner supplied by fuel cell system via SEPIC converter. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 178 — 194. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp178-194.

45. Kabra P., Lalitha S. V. N. L., Donepudi S. R. Bad data analysis and detection using PMU with UPQC integration to grid during fault conditions. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 256 — 265. DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp256-265.

46. Thamizh Thentral T. M., Vijayakumar K., Jegatheesan R. Performance comparison of hybrid active power filter for P-Q theory and SVPWM technique. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 84 — 93. DOI: 10.11591/ijece.v11i1.pp84-93.

47. Thuyen C. M. A new design algorithm for hybrid active power filter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019, vol. 9, no. 6, pp. 4507 — 4515. DOI: 10.11591/ijece.v9i6.pp4507-4515.

48. Thuyen C. M. Improved p-q harmonic detection method for hybrid active power filter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2018, vol. 8, no. 5, pp. 2910 — 2919. DOI: 10.11591/ijece.v8i5.pp2910-2919.

49. Mahmoud M. O., Mamdouh W., Khalil H. Source current harmonic mitigation of distorted voltage source by using shunt active power filter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020, vol. 10, no. 4, pp. 3967 — 3977. DOI: 10.11591/ijece.v10i4.pp3967-3977.

50. Madhu B. R., Dinesh M. N., Thinlas T., Menezes D. Enhancement of power quality using microprocessor based shunt active power filter for unbalanced load. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020, vol. 10, no. 4, pp. 3393 — 3402. DOI: 10.11591/ijece.v10i4.pp3393-3402.

51. Sychev Y. A., Aladin M. E., Abramovich B. N. The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions. *Proceedings of 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039427.

52. Vorontsov A. G., Pronin M. V. Calculation of systems with electric machines and solid-state converters on high-speed dual models. *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, no. 1, pp. 18 — 23. DOI: 10.3103/S1068371221010119.

53. Shamala N., Lakshminarayana C. Performance Enhancement in Active Power Filter (APF) by FPGA Implementation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2018, vol. 8, no. 2, pp. 689 — 698. DOI: 10.11591/ijece.v8i2.pp689-698.

54. Hoo D. S., Chua K. H., Lim Y. S., Lim B. H., Bonab M. B., Wang L. Mitigation of harmonic distortions in third rail electrical systems. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 348 — 357. DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp348-357.

55. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozemov B. V. Analysis and calculation of inactive power in the power network of electric consumers of mining transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 270 — 283. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_270.

56. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozemov B. V., Shtang A. A. Determination of the reactive power of the ac network of the traction substations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 284 — 300. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_284.

57. Sandhya P., Ramrao N. Modeling of hybrid active power filter using artificial intelligence controller: Hardware and software prospective. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2021, vol. 12, no. 4, pp. 2545 – 2556. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2545-2556.

58. Malafeev S. I., Mikryukov V. I., Malafeeva A. A. High-voltage mobile station in open pit mine: Electrosafety analysis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 143 – 153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_143.

59. Lyakhomsky A. V., Fashchilenko V. N. Development of energy-efficient controlled electromechanical resonance for processes of cutting and shattering of rock massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 10, pp. 223 – 234. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-223-234.

60. Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Y. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurgist*. 2023, vol. 66, no. 10, pp. 105 – 112. DOI: 10.1007/s11015-023-01445

61. Voronin V. A., Nepsha F. S. Optimizing geometry of capacity units for reactive power compensation in power supply systems in extraction areas in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 94 – 108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_94.

62. Porsev E. G., Kravchenko D. P. Application of electrosmos in the oil field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 229 – 240. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_229.

63. Pupin V., Safonov D., Fedorov O. Modeling and research of operating modes of oil and gas pumping stations to determine the requirements for automation devices. *Proceedings of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020*. 2020, pp. 372 – 376. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216310.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сычев Юрий Анатольевич[1] – д-р техн. наук,
доцент, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
Аладьин Максим Евгеньевич[1] – аспирант,
e-mail: m.aladyin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Аладьин М.Е., e-mail: m.aladyin@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Y.A. Sychev[1], Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
M.E. Aladin[1], Graduate Student,
e-mail: m.aladyin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: M.E. Aladin, e-mail: m.aladyin@gmail.com.

Получена редакцией 14.04.2023; получена после рецензии 14.06.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 14.04.2023; received after the review 14.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.