

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА В КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Ю.А. Сычев¹, М.Е. Аладын¹, Р.Ю. Зимин¹

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

Аннотация: Обоснована актуальность проблемы повышения качества электрической энергии в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса на основе параллельной работы централизованных и автономных источников. Выявлены основные причины снижения качества электроэнергии со стороны источников, распределительной сети и потребителей. Показаны негативные последствия при электроснабжении потребителей электроэнергией ненадлежащего уровня качества. Показана целесообразность применения фильтрокомпенсирующих устройств с многофункциональными активными преобразователями для повышения качества электрической энергии. Проведен анализ актуальных научно-технических разработок в области структурного и параметрического синтеза фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями. Приведены их ключевые преимущества по сравнению с традиционно применяемыми техническими средствами в системах электроснабжения при вариации параметров энергообеспечения и энергопотребления. Обоснована необходимость развития теории и практики применения электротехнических комплексов с несколькими активными преобразователями в своем составе на примере универсальных компенсаторов повышения качества электроэнергии. Приведено описание, структуры и схемы включения в компенсируемую систему электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса универсальных компенсаторов качества электроэнергии с несколькими активными преобразователями. Разработаны математические модели универсальных компенсаторов в зависимости от их структуры и места размещения.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующие устройства, активные фильтрокомпенсирующие устройства, активные полупроводниковые преобразователи, универсальные компенсаторы, реактивная мощность, высшие гармоники, гармонические искажения, качество электроэнергии, нелинейная нагрузка, электромагнитная совместимость.

Благодарность: Данное исследование проведено в рамках гранта МД-1536.2022.4 «Создание систем комбинированного электроснабжения для особо ответственных технологических и стратегических объектов».

Для цитирования: Сычев Ю. А., Аладын М. Е., Зимин Р. Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 164–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164.

Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry

Y.A. Sychev¹, M.E. Aladin¹, R.Y. Zimin¹

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

Abstract: It is of the current concern to improve electric energy quality in composite power supply systems in the mineral mining industry using interlocked and self-contained sources of power in parallel operation. The main causes of degradation of electric power in the sources, in distributing mains and at consumers are revealed. The adverse consequences of low quality power supply are described. The expediency of using filter compensation devices with multi-function active converters to improve the quality of electric power is demonstrated. The current achievements in science and engineering in structural and parametric synthesis of filter compensation devices with active converters are reviewed. Their major advantages over the conventional gears used in the power supply systems in the conditions of variation in the power supply and consumption parameters are listed. The study substantiates the currentness of theoretical and practical guidance for electrical equipment with a number of active converters as a case-study of universal power quality compensators. The structure of universal power quality compensators with a few active converters and their connection in the compensate power supply systems in the mineral mining sector is described. The mathematical models of universal compensators depending on their structure and location are built.

Key words: filter compensation devices, active filter compensation devices, active semiconductor converters, universal compensators, reactive power, higher harmonics, harmonic distortions, power quality, nonlinear load, electromagnetic compatibility.

Acknowledgements: The study was supported by the Grant for Power Supply Combination at Critical Engineering and Strategic Facilities, Grant No. MD-1536.2022.4.

For citation: Sychev Y. A., Aladin M. E., Zimin R. Y. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):164-179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164.

Введение

Проблема повышения качества электрической энергии и электромагнитной совместимости электрооборудования в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса на настоящий момент является особо актуальной ввиду широкого распространения нелинейной нагрузки в виде систем частотно-регулируемого электропривода технологических установок, которая приводит к несинусоидальности формы кривых тока и напряжения, что, в свою очередь, приводит к дополнительным

потерям электроэнергии в элементах систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. Также, электроэнергия ненадлежащего качества вызывает термическую перегрузку электротехнического оборудования, снижение его срока службы, преждевременному выходу из строя потребителей электроэнергии из-за отказов, нарушению непрерывности технологического процесса, остановке производства и значительным экономическим потерям. Результаты исследований [1 – 3] доказывают, что уровень дополнительных потерь

электроэнергии в электрических машинах, вызванных наличием высших гармонических составляющих тока и напряжения, могут составлять 20% от общего уровня электрических потерь. Также, результаты ряда других исследований [4–6] показывают, несинусоидальность кривых тока и напряжения, которые превышают нормы ГОСТ 32144-2013, что приводит к потенциальному уменьшению срока службы асинхронных электродвигателей в два раза, а конденсаторных установок компенсации реактивной мощности более, чем в пять раз [7–9].

В настоящее время разработаны и активно применяются электротехнические комплексы повышения качества электроэнергии, включающие в себя пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства, каждая из которых имеют как ряд достоинств, так и ряд недостатков. Также, широкое распространение получили гибридные фильтрокомпенсирующие устройства, объединяющие в себе сильные стороны как пассивных, так и активных аналогов. Данные устройства имеют гибкую структуру, широкий набор функций по повышению качества электроэнергии, что является серьезным достоинством в условиях комбинированного электроснабжения при параллельной работе централизованных и автономных источников, когда параметры энергообеспечения и энергопотребления варьируются в достаточно широких пределах [10–12]. Например, в аварийных режимах со стороны централизованной энергосистемы, большая часть нагрузки отключается, а наиболее ответственные потребители получают питание от оставшихся в работе автономных источников. При этом уровень мощности короткого замыкания и показатели качества электроэнергии существенно изменяются по величине [13–15]. Также зарубежный опыт показывает, что в условиях гибких тарифов

на электроэнергию в течение суток со стороны централизованных сетей, экономически целесообразно осуществлять электроснабжение потребителей попеременно от централизованных и автономных источников, что также влияет на характер изменения показателей качества электроэнергии [16].

Необходимо отметить, что особое внимание в настоящее время уделяется разработке и внедрению универсальных компенсаторов качества электроэнергии (unified power quality conditioners), способных комплексно решать проблемы повышения качества электроэнергии и надежности систем комбинированного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса [17–19].

Существующие технические решения

На сегодняшний день наиболее известным способом повышения качества электроэнергии является применение фильтрокомпенсирующих устройств, которые можно классифицировать на 3 группы: пассивные, активные и гибридные [20, 21].

Основным недостатком пассивных фильтрокомпенсирующих устройств является ограниченная эффективность в части снижения уровня несинусоидальности при вариации спектра высших гармонических составляющих. Активные фильтрокомпенсирующие устройства также имеют ряд недостатков, среди которых необходимо выделить возможность возникновения резонансных явлений при совместной работе устройств компенсации реактивной мощности [21–23]. Известны исследования, демонстрирующие ограниченную способность активных фильтрокомпенсирующих устройств осуществлять компенсацию высших гармонических составляющих в условиях систем распределенной генерации и комбинированного электро-

снабжения. Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства и универсальные компенсаторы на основе нескольких активных преобразователей, сочетающие достоинства активных и пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, обладают более широким набором реализуемых функций по повышению качества электроэнергии в части высших гармонических составляющих тока и напряжения, отклонений напряжения, коррекции коэффициента мощности [24–26].

Однако, ввиду значительного прогресса, которого удалось достичь в рамках совершенствования характеристик силовых полупроводниковых приборов, а также уменьшению их стоимости, активные фильтрокомпенсирующие устройства становятся все более конкурентноспособными относительно пассивных аналогов [23, 27]. Активный фильтр является сложным устройством, в состав которого входят силовая часть (инвертор) и блок управления [28, 29].

В силовую часть активного фильтрокомпенсирующего устройства входят инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), последовательно к которому подключен сглаживающий фильтр. Выходной ток инвертора изменяется в соответствии с законом, который задается системой управления. Накопители энергии в инверторе — конденсаторы или реакторы.

В активном фильтрокомпенсирующем устройстве производится анализ гармонического состава тока и напряжения в точке присоединения к сети, по результатам анализа вырабатывается и подается в сеть аналогичный спектр высших гармонических составляющих с противоположным знаком. Таким образом происходит компенсация высших гармоник, а питающий ток имеет форму синусоиды. Классифицировать активные фильтры гармоник можно по типу

инвертора, числу фаз, способу включения в сеть и формированию управляющего сигнала [30–32].

Несмотря на все преимущества активных фильтров по сравнению с их пассивными аналогами, они также имеют свои недостатки, главным из которых является высокая стоимость и сложная силовая часть. В настоящее время как пассивные, так и активные фильтры имеют широкое распространение, однако, особенное внимание уделяется разработке и внедрению гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, способных совмещать в себе достоинства и пассивных, и активных устройств [33, 34]. Также, они обладают более широким набором реализуемых функций по повышению качества электроэнергии в части высших гармонических составляющих тока и напряжения, отклонений напряжения, коррекции коэффициента мощности. Гибридные фильтры можно классифицировать по схеме их включения в сеть и по способу соединения активной и пассивной частей между собой [34].

Также стоит отметить активное развитие и внедрение наиболее современных устройств коррекции качества электроэнергии с несколькими активными преобразователями в своем составе, которые принято называть универсальными компенсаторами. Данные устройства имеют в своем составе динамические компенсаторы искажения напряжения (ДКИН) и статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ) и могут подключаться к сети как последовательно, так и параллельно. Подобные универсальные компенсаторы могут иметь общее звено постоянного тока на два преобразователя, в этом случае такой компенсатор будет являться сосредоточенным. В случае, если каждый из преобразователей имеет свое звено постоянного тока и преобразователи уста-

новлены в разных точках, но их управление осуществляется централизованно, то такие компенсаторы будут являться распределенными [35 – 37].

Статический компенсатор реактивной мощности является управляемым инвертором напряжения, внутреннее сопротивление которого близко к нулю. СТАТКОМ подключается к системе с помощью линейного реактора, который обеспечивает преобразование разности напряжений сети и самого устройства в его выходной ток, то есть источник напряжения преобразовывается в источник тока [14]. Статические компенсаторы подключаются к системам электроснабжения среднего класса напряжения параллельно с нагрузкой [38, 42].

Как говорилось ранее, в состав универсальных компенсаторов также входят динамические компенсаторы искажения напряжения (ДКИН). В состав данного электротехнического комплекса входят вольтодобавочный трансформатор, выпрямитель и полностью управляемый инвертор на IGBT-транзисторах, а также система бай-пасс и электронная систе-

ма управления. К преимуществам данных устройств можно отнести высокий коэффициент полезного действия (около 98%), высокие массогабаритные характеристики, практически неограниченные возможности по их интеграции в системы электроснабжения, а также отсутствие элементов, которые требуют регулярного обслуживания [27, 36, 37].

Принцип работы динамического компенсатора основывается на упреждающей коррекции с моментальным откликом при изменении амплитуды и фазы напряжения в точке подключения к системе электроснабжения [38].

Общая структура универсального компенсатора на основе устройств статического компенсатора реактивной мощности и динамического компенсатора искажения напряжения представлена на рис. 1.

Основные структуры универсальных компенсаторов повышения качества электрической энергии

Универсальные компенсаторы представляют собой более сложные электротехнические комплексы коррекции качества электроэнергии, а также имеют большой набор функций по сравнению с описанными ранее фильтрокомпенсирующими устройствами. Соответственно, универсальные компенсаторы также необходимо классифицировать аналогично гибридным фильтрокомпенсирующим устройствам. Ввиду того, что в основе универсальных компенсаторов качества электроэнергии лежат параллельные и последовательные активные фильтры (СТАТКОМ и ДКИН) [3, 15, 18], классифицировать данные электротехнические комплексы следует по типу и порядку подключения фильтров к системе электроснабжения. На рис. 2 представлены основные варианты подключения универсальных компенсаторов к сети,

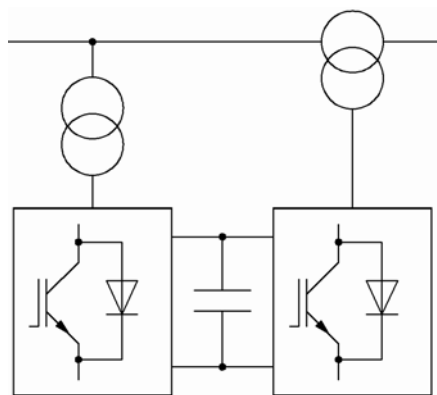


Рис. 1. Структура универсального компенсатора на основе статического компенсатора реактивной мощности и динамического компенсатора искажения напряжения

Fig. 1. Structure of universal compensator based on static compensator of reactive power and dynamic compensator of voltage distortion

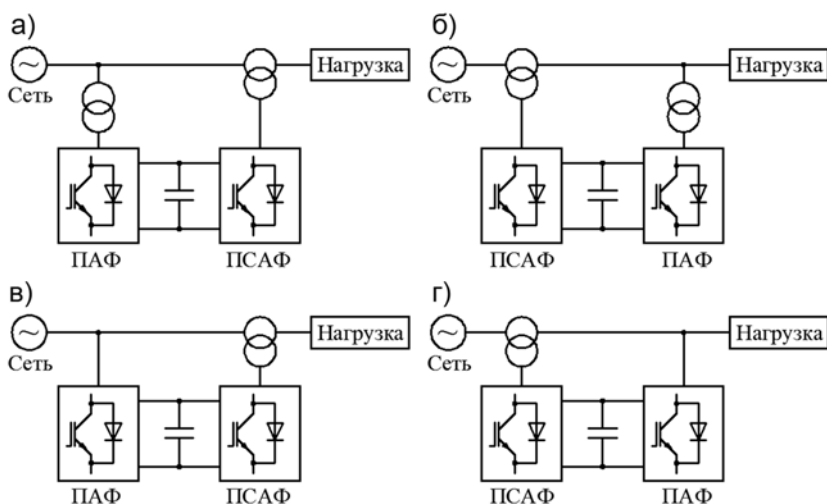


Рис. 2. Основные варианты подключения универсальных компенсаторов к сети
 Fig. 2. Basic scenarios of universal compensator connection to mains

где ПАФ — параллельный активный фильтр, ПСАФ — последовательный активный фильтр.

На рис. 2, а и 2, б представлены варианты подключения универсального компенсатора с активными преобразователями через два трансформатора, на рис. 2, в и 2, г — с помощью одного трансформатора.

Структуры, приведенные на рис. 2, имеют общее звено постоянного тока для последовательного и параллельного преобразователя. При этом такие структуры можно рассматривать в качестве сосредоточенных универсальных компенсаторов [13, 14, 25]. В случае, если каждый преобразователь имеет свое звено постоянного тока и преобразователи устанавливаются в разных точках сети, но имеют централизованное управление, подобные универсальные компенсаторы можно рассматривать как распределенные [39].

В данной статье рассматриваются сосредоточенные универсальные компенсаторы. Распределенные универсальные компенсаторы являются предметом дальнейших исследований.

Математические модели универсальных компенсаторов качества электрической энергии

На рис. 3—6 приведены более детализированные схемы универсальных компенсаторов для разработки математических моделей данных устройств, где $S_{\text{ПАФ}}$, $S_{\text{ПСАФ}}$ — мощности выходных силовых трансформаторов (СТ) ПАФ и ПСАФ соответственно; $u_{\text{ПАФ}}$, $u_{\text{ПСАФ}}$ — напряжения на выходе инверторов ПАФ и ПСАФ соответственно; u_{dc} — напряжение в звене постоянного тока; $i_{\text{ПАФ}}$, $i_{\text{ПСАФ}}$ — токи на выходе инверторов ПАФ и ПСАФ соответственно; L_1, L_2, L_3, C_1, C_2 — параметры выходных фильтров ПАФ и ПСАФ; Z_c — внутреннее сопротивление сети; $u_c, u_{\text{ТОП}}, u_n$ — напряжение сети, ТОП и нагрузки соответственно; $i_c, i_{\text{ТОП}}, i_n$ — ток сети, ТОП и нагрузки соответственно; i_k, u_k — компенсационный ток ПАФ и компенсационное напряжение ПСАФ; $i_{\text{С1}}, i_{\text{С2}}, i_{\text{Ф}}$ — токи выходных фильтров ПАФ и ПСАФ; $k_{\text{пр1}}, k_{\text{пр2}}$ — функции состояния силовых ключей преобразователей ПАФ и ПСАФ соответственно; $k_{\text{тр1}}, k_{\text{тр2}}$ — коэффициенты трансформации СТ ПАФ и ПСАФ соответственно;

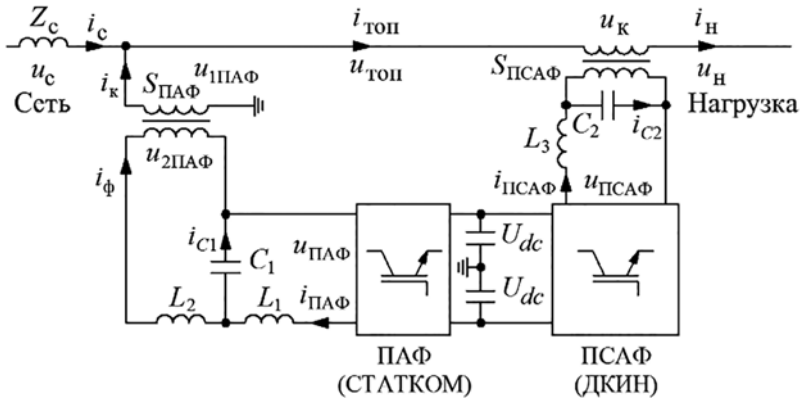


Рис. 3. Схема для моделирования универсального компенсатора со структурой на рис. 2, а
 Fig. 3. Diagram for modeling a universal compensator with structure in Fig. 2, a

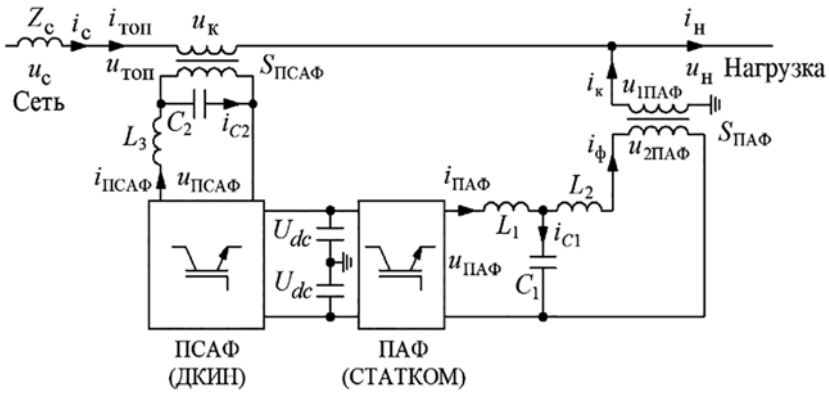


Рис. 4. Схема для моделирования универсального компенсатора со структурой на рис. 2, б
 Fig. 4. Diagram for modeling a universal compensator with structure in Fig. 2, b

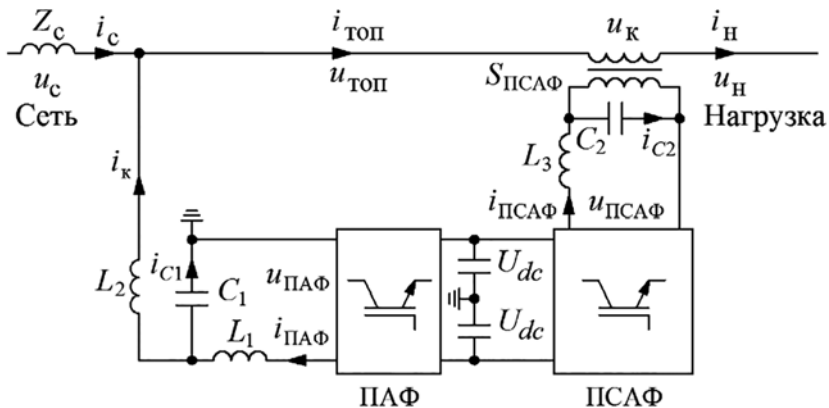


Рис. 5. Схема для моделирования универсального компенсатора со структурой на рис. 2, в
 Fig. 5. Diagram for modeling a universal compensator with structure in Fig. 2, v

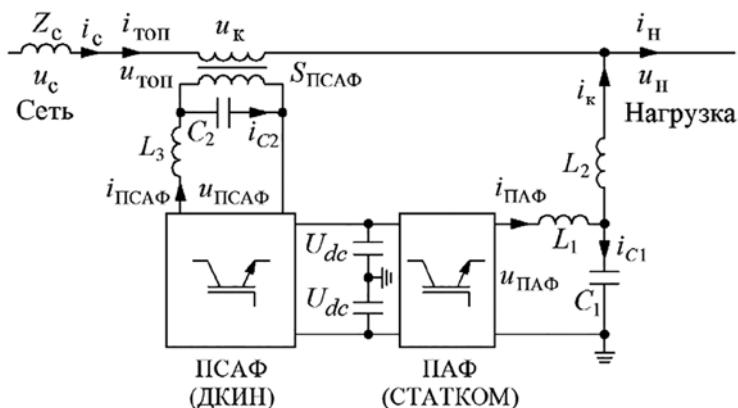


Рис. 6. Схема для моделирования универсального компенсатора со структурой на рис. 2, г
Fig. 6. Diagram for modeling a universal compensator with structure in Fig. 2, g

$u_{1\text{ПАФ}}$, $u_{2\text{ПАФ}}$ — напряжения на первичной и вторичной обмотках СТ ПАФ.

При математическом описании универсальных компенсаторов приняты следующие основные допущения:

- силовые элементы активных преобразователей учитываются в виде идеальных ключей, режим работы которых в зависимости от схемы коммутации представлен в виде соответствующих коэффициентов k , $k_{\text{пр1}}$, $k_{\text{пр2}}$;

- потери в трансформаторах не учитываются;

- узел нагрузки, состоящий из линейной и нелинейной частей, учитывается в виде потребляемого тока $i_{\text{н}}$;

- питающая сеть представляется в виде идеального источника напряжения с полным внутренним сопротивлением Z_c .

Приведенные ранее структуры универсальных компенсаторов имеют математическое описание, представленное ниже.

Математическое описание структуры рис. 3:

- для цепи последовательного активного фильтра:

$$u_k = k_{\text{тр2}} u_{C2} = 2k_{\text{пр2}} u_{dc} - \Delta u_{L3};$$

$$u_{\text{ПСАФ}} = L_3 (di_{\text{ПСАФ}}/dt) + u_{C2} = 2k_{\text{пр2}} u_{dc};$$

$$u_k = k i_{\text{ТОП}}; i_c = i_k + i_{\text{ТОП}};$$

$$u_c = i_c Z_c + i_{\text{ТОП}} k + u_{\text{н}}; u_k = i_{\text{ТОП}} k;$$

$$u_{\text{ТОП}} = i_{\text{ТОП}} k + u_{\text{н}}; i_{\text{ТОП}} = i_{\text{н}};$$

$$S_{\text{ПСАФ}} = \sqrt{3} k i_{\text{ТОП}}^2. \quad (1)$$

- для цепи параллельного активного фильтра:

$$u_{\text{ПАФ}} = 2k_{\text{пр1}} u_{dc} = \Delta u_{L1} + u_{C1};$$

$$u_{C1} = \Delta u_{L2} + u_{2\text{ПАФ}}; \Delta u_{L1} = L_1 (di_{\text{ПАФ}}/dt);$$

$$\Delta u_{L2} = L_2 (di_{\phi}/dt); i_{C1} = C_1 (du_{C1}/dt);$$

$$k_{\text{тр1}} = (u_{1\text{ПАФ}}/u_{2\text{ПАФ}}); i_{\text{ПАФ}} = i_{C1} + i_{\phi};$$

$$S_{\text{ПАФ}} = \sqrt{3} u_{1\text{ПАФ}} i_k = \sqrt{3} u_{2\text{ПАФ}} i_{\phi}. \quad (2)$$

Для структуры рис. 4:

- для цепи последовательного активного фильтра:

$$u_k = k_{\text{тр2}} u_{C2} = 2k_{\text{пр2}} u_{dc} - \Delta u_{L3};$$

$$u_{\text{ПСАФ}} = L_3 (di_{\text{ПСАФ}}/dt) + u_{C2} = 2k_{\text{пр2}} u_{dc};$$

$$u_k = k i_c; i_c = i_{\text{ТОП}} = i_k + i_{\text{н}};$$

$$u_c = i_c (Z_c + k) + u_{\text{ТОП}}; u_k = i_{\text{ТОП}} k;$$

$$u_{\text{ТОП}} = i_{\text{ТОП}} k + u_{\text{н}}; S_{\text{ПСАФ}} = \sqrt{3} k i_{\text{ТОП}}^2. \quad (3)$$

- для цепи параллельного активного фильтра:

$$u_{\text{ПАФ}} = 2k_{\text{пр1}} u_{dc} = \Delta u_{L1} + u_{C1};$$

$$\begin{aligned}
u_{C1} &= \Delta u_{L2} + u_{2ПАФ}; \Delta u_{L1} = L_1 (di_{ПАФ}/dt); \\
\Delta u_{L2} &= L_2 (di_{\phi}/dt); i_{C1} = C_1 (du_{C1}/dt); \\
k_{тр1} &= (u_{1ПАФ}/u_{2ПАФ}); i_{ПАФ} = i_{C1} + i_{\phi}; \\
S_{ПАФ} &= \sqrt{3} u_{1ПАФ} i_{\kappa} = \sqrt{3} u_{2ПАФ} i_{\phi}; \\
u_c &= u_{\kappa} + u_{\text{н}} = u_{\kappa} + u_{ПАФ} + \Delta u_{ПАФ} = \\
&= u_{\kappa} + u_{ПАФ} + \sqrt{3} i_{\kappa} Z_{трПАФ}. \quad (4)
\end{aligned}$$

Для структуры рис. 5:

• для цепи параллельного активно-го фильтра:

$$\begin{aligned}
u_{\kappa} &= k_{тр2} u_{C2} = 2k_{пр2} u_{dc} - \Delta u_{L3}; \\
u_{ПСАФ} &= L_3 (di_{ПСАФ}/dt) + u_{C2} = 2k_{пр2} u_{dc}; \\
u_{\kappa} &= k i_{ТОП}; i_c = i_{\kappa} + i_{ТОП}; \\
u_c &= i_c Z_c + i_{ТОП} k + u_{\text{н}}; \\
u_{ТОП} &= i_{ТОП} k + u_{\text{н}}; i_{ТОП} = i_{\text{н}}; \\
S_{ПСАФ} &= \sqrt{3} k i_{ТОП}^2. \quad (5)
\end{aligned}$$

• для цепи последовательного активного фильтра:

$$\begin{aligned}
u_{ПАФ} &= 2k_{пр1} u_{dc} = \Delta u_{L1} + u_{C1}; \\
u_{C1} &= \Delta u_{L2} + u_{2ПАФ}; \Delta u_{L1} = L_1 (di_{ПАФ}/dt); \\
\Delta u_{L2} &= L_2 (di_{\phi}/dt); i_{C1} = C_1 (du_{C1}/dt); \\
i_{ПАФ} &= i_{C1} + i_{\kappa}. \quad (6)
\end{aligned}$$

Для структуры рис. 6:

• для цепи параллельного активно-го фильтра:

$$\begin{aligned}
u_{\kappa} &= k_{тр2} u_{C2} = 2k_{пр2} u_{dc} - \Delta u_{L3}; \\
u_{ПСАФ} &= L_3 (di_{ПСАФ}/dt) + u_{C2} = 2k_{пр2} u_{dc}; \\
u_{\kappa} &= k i_c; i_c = i_{ТОП} = i_{\kappa} + i_{\text{н}}; \\
u_c &= i_c (Z_c + k) + u_{ТОП}; u_{\kappa} = i_{ТОП} k; \\
u_{ТОП} &= i_{ТОП} k + u_{\text{н}}; S_{ПСАФ} = \sqrt{3} k i_{ТОП}^2. \quad (7)
\end{aligned}$$

• для цепи последовательного активного фильтра:

$$\begin{aligned}
u_{ПАФ} &= 2k_{пр1} u_{dc} = \Delta u_{L1} + u_{C1}; \\
u_{C1} &= \Delta u_{L2} + u_{2ПАФ}; \Delta u_{L1} = L_1 (di_{ПАФ}/dt); \\
\Delta u_{L2} &= L_2 (di_{\phi}/dt); i_{C1} = C_1 (du_{C1}/dt); \\
i_{ПАФ} &= i_{C1} + i_{\kappa}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Обозначения в формулах (1)–(8) полностью соответствуют обозначениям на рис. 3–6. Таким образом, с учетом приведенных допущений выражения (1)–(8) следует рассматривать в качестве базовых математических моделей универсальных компенсаторов различной топологии и режима работы. Данные модели также являются теоретической основой структурного и параметрического синтеза универсальных компенсаторов [13, 17, 23].

Экономический эффект от внедрения универсальных компенсаторов качества электрической энергии

Согласно проведенным расчетам экономический эффект от внедрения одного универсального компенсатора может достигать 350–550 тыс. руб. в год в условиях систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса, а срок окупаемости составляет от 3 до 5 лет. Данный эффект достигается путем снижения потребления реактивной мощности, уменьшения потерь энергии в элементах систем электроснабжения из-за наличия искажений, а также уменьшением количества отказов электрооборудования.

Обсуждение

Таким образом, можно сделать вывод, что для решения существующих проблем по повышению качества электроэнергии в комбинированных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой, можно использовать ряд технических средств и решений, а именно:

- Использование параллельных и последовательных активных фильтров.
- Использование гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.
- Использование специализированных устройств на основе активных преобразователей (ДКИН, СТАТКОМ).

Учитывая достаточно высокую стоимость активных преобразователей их применение для реализации конкретной функции должно быть строго обосновано или же данные преобразователи должны быть частью более сложных многофункциональных устройств. При этом существующие и известные топологии многофункциональных гибридных фильтрокомпенсирующих устройств содержат в себе лишь один какой-либо активный преобразователь (параллельный или последовательный).

Для решения существующих проблем, описанных ранее, предлагается применение многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на основе универсальных компенсаторов с несколькими активными преобразователями различных типов. Предлагаемые устройства являются электротехническим комплексом с распределенной переменной структурой, гибким алгоритмическим обеспечением исходя из вариации различных факторов.

Кроме того, представленные структуры на рис. 2, целесообразно дополнить пассивными фильтрами, как со стороны сети, так и со стороны узла нагрузки, что существенно расширяет функционал универсальных компенсаторов в условиях вариации показателей режимов энергообеспечения и энергопотребления в системах комбинированного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса.

Также перспективным направлением дальнейших исследований является структурный и параметрический синтез многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на основе распре-

деленных универсальных компенсаторов.

Заключение

1. Обоснована актуальность разработки многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на базе универсальных компенсаторов в условиях систем комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников.

2. Показано, что проблема повышения качества электрической энергии остается актуальной в условиях систем комбинированного электроснабжения, когда искажения формы кривых тока и напряжения наблюдаются как со стороны электротехнических комплексов автономных источников, так и со стороны подключенной нелинейной нагрузки технологических объектов.

3. Обоснована целесообразность исследования вопроса структурного и параметрического синтеза многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на основе нескольких активных преобразователей различных типов.

4. Показана необходимость наличия многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с гибкой адаптивной структурой в условиях комбинированных систем электроснабжения при вариации параметров источников питания и подключенной нагрузки.

5. Приведены структуры и математическое описание многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств на основе универсальных компенсаторов с последовательными и параллельными активными преобразователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б. Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 31–40. DOI: 10.25515/PM1.2018.1.31.

2. *Абрамович Б. Н., Богданов И. А.* Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

3. *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.

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

5. *Герман-Галкин С. Г., Звежечов З. Ч., Поляков Н. А.* Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2014. — № 3(91). — С. 131–139.

6. *Егоров Д. Э., Довгун В. П.* Оптимизация компенсационных характеристик гибридных силовых фильтров // Технологии электромагнитной совместимости. — 2016. — № 3(58). — С. 18–26.

7. *Jian Han, Xing Li, Yao Sun, Shaonan Gong, Shoudao Huang* Quadruple-active-bridge based unified power quality conditioner-L with fault current limiting capability // Electric Power Systems Research. 2022, vol. 206, article 107780. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107780.

8. *Ляхомский А. В., Плащанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю.* Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 207–213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213.

9. *Subrahmanyam K. B. V. S. R., Gopal B.* PV system integration with multilevel UPQC for power quality improvement in distribution system / Materials Today: Proceedings. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.487.

10. *Клюев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А.* Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 300–311. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14.

11. *Козярук А. Е., Камышьян А. М.* Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 576–582. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.

12. *Довгун В. П., Сташков И. А., Николаев И. Ф., Синяговский А. Ф.* Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения переменного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016. — № 3. — С. 55–60.

13. *Ненахов А. И., Гамазин С. И.* Совмещение функций компенсации реактивной мощности, симметрирования и активной фильтрации токов при построении алгоритма управления устройством СТАТКОМ // Электричество. — 2016. — № 8. — С. 46–52.

14. *Розанов Ю. К., Лепанов М. Г., Киселев М. Г.* Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя // Электротехника. — 2014. — № 8. — С. 51–59.

15. *Шевырев Ю. В.* Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 171–178.

16. *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.

17. *Baburin S. V., Turysheva A. V., Kovalchuk M. S.* Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.

18. *Бельский А. А., Моренов В. А., Купавых К. С., Сандыга М. С.* Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки // Энергетика. Изве-

ствия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 146–154. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154.

19. *Dayi Li, Tingkang Wang, Wenhao Pan, Xinzhi Ding, Jie Gong* A comprehensive review of improving power quality using active power filters // *Electric Power Systems Research*. 2021, vol. 199, article 107389. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107389.

20. *Garipov B. I., Ustinov D. A.* Simulation of combined power system with storage device / *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. CRC Press, 2019, 7 p. DOI: 10.1201/9781003017226-34.

21. *Gulkov Y. V., Ustinov D. A.* Electric power quality distortions influencing oil processing plant parameters and characteristics // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 9, pp. 2027–2030.

22. *Gulkov Y. V., Turyshcheva A. V., Vinogradova I. V.* Producing steels with special properties using a jet heat treatment system // *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 854. pp. 30–36. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.30

23. *Iakovleva E. V., Belova M. V., Soares A., Rassolkin A.* On the issues of spatial modeling of non-standard profiles by the example of electromagnetic emission measurement data // *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1. DOI: 10.3390/su14010574. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/574>.

24. *Pelz G. M., da Silva S. A. O., Sampaio L. P.* Distributed generation integrating a photovoltaic-based system with a single- to three-phase UPQC applied to rural or remote areas supplied by single-phase electrical power // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020, vol. 117, article 105673. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105673.

25. *Pelz G. M., da Silva S. A. O., Sampaio L. P.* Comparative analysis involving PI and state-feedback multi-resonant controllers applied to the grid voltage disturbances rejection of a unified power quality conditioner // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020, vol. 115, article 105481. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105481.

26. *Kavithaa G., Balakrishnan P., Yuvaraj S. A.,* A prognostic energy optimization technique with unified power quality conditioner for energy stabilization in grid system // *Computers & Electrical Engineering*. 2021, vol. 94, article 107360. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107360.

27. *Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V.* Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle // *Energies*. 2021, vol. 14, no. 19, article 6074. DOI: 10.3390/en14196074.

28. *Lavrik A. Y., Zhukovskiy Y. L.* Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // *Energies*. 2021, vol. 14, no. 16, article 5059. DOI: 10.3390/en14165059.

29. *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.

30. *Fagundes S. M., Cardoso F. L., Stangler E. V., Neves F. A. S., Mezaroba M.* A detailed power flow analysis of the dual unified power quality conditioner (iUPQC) using power angle control (PAC) // *Electric Power Systems Research*. 2021, vol. 192, article 106933. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106933.

31. *Litran S. P., Salmeron P.* Design criteria of a control strategy for hybrid power filters based on current and voltage detection // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2015, vol. 25, no. 3, pp. 419–432. DOI: 10.1002/etep.1850.

32. *Tao Jin, Yueling Chen, Jintao Guo, Mengqi Wang, Mohamed M. A.* An effective compensation control strategy for power quality enhancement of unified power quality conditioner // *Energy Reports*. 2020, vol. 6, pp. 2167–2179. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.07.027.

33. *Ustinov D. A., Baburin S. V.* Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 7, pp. 5267–5270.

34. 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.

35. Bacon V. D., da Silva S. A. O., Guerrero J. M. Multifunctional UPQC operating as an interface converter between hybrid AC-DC microgrids and utility grids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022, vol. 136, article 107638. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107638.

36. Сычев Ю. А., Зимин Р. Ю. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 247. — С. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.

37. Жданкин Е. В., Устинов Д. А. Имитационное моделирование активной накопительной системы // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*. — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 52–58. DOI: 10.14529/power180406.

38. Zhukovskiy Y., Koteleva N. Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters // *Journal of Physics. Conference Series*. 2018, vol. 1050, no. 1, article 012106. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012106.

39. 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. **МИАБ**

REFERENCES

1. Abramovich B. N. System of uninterrupted power supply of mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 229, pp. 31–40. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.

2. Abramovich B. N., Bogdanov I. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 408–416. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

3. Antonov B. M., Baranov N. N., Kryukov K. V., Rozanov Yu. K. Hybrid system of decentralized power supply based on renewable energy sources of various types. *Elektrichestvo*. 2018, no. 1, pp. 8–13. [In Russ]. DOI: 10.1080/14786451.2011.590898.

4. Herman-Galkin S. G. Analysis and calculation of a parallel active filter. *Elektrotehnika*. 2018, no. 1, pp. 55–61. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371218010042.

5. Herman-Galkin S. G., Zvezhevich Z. Ch., Polyakov N. A. Analytical and model study of an active semiconductor converter in electric drive systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014, no. 3(91), pp. 131–139.

6. Egorov D. E., Dovgun V. P. Optimization of compensation characteristics of hybrid power filters. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2016, no. 3(58), pp. 18–26. [In Russ].

7. Jian Han, Xing Li, Yao Sun, Shaonan Gong, Shoudao Huang Quadruple-active-bridge based unified power quality conditioner-L with fault current limiting capability. *Electric Power Systems Research*. 2022, vol. 206, article 107780. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107780.

8. Lyakhomskiy A. V., Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Yu. High-voltage unit for automated monitoring of electrical energy quality in underground networks of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 7, pp. 207–213. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213.

9. Subrahmanyam K. B. V. S. R., Gopal B. PV system integration with multilevel UPQC for power quality improvement in distribution system. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.487.

10. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A. Improving the efficiency of relay protection at a mining and processing plant. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 300–311. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14.

11. Kozyaruk A. E., Kamyshyan A. M. Improving the energy efficiency of the electromechanical transmission of a quarry dump truck. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 576–582. [In Russ]. DOI: 10.31897/PM1.2019.5.576.
12. Dovgun V. P., Stashkov I. A., Nikolaev I. F., Sinyagovsky A. F. Multifunctional filter-compensating devices for AC traction power supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2016, no. 3, pp. 55–60. [In Russ].
13. Nenakhov A. I., Gamazin S. I. Combining the functions of reactive power compensation, symmetry and active filtering of currents when constructing an algorithm for controlling a STATCOM device. *Elektrichestvo*. 2016, no. 8, pp. 46–52. [In Russ].
14. Rozanov Yu. K., Lapanov M. G., Kiselev M. G. Multifunctional electric power quality controller based on a power electronic converter. *Elektrotehnika*. 2014, no. 8, pp. 51–59. [In Russ].
15. 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].
16. Shevyrev Yu. V., Shevyreva N. Yu. Improvement of the voltage form in the power supply systems of enterprises of the mineral resource complex with an active rectifier. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 66–69. [In Russ].
17. Baburin S. V., Turyshcheva A. V., Kovalchuk M. S. Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.
18. Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. Wind turbine electrical energy supply system for oil well heating. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 146–154. [In Russ]. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154.
19. Dayi Li, Tingkang Wang, Wenhao Pan, Xinzhi Ding, Jie Gong A comprehensive review of improving power quality using active power filters. *Electric Power Systems Research*. 2021, vol. 199, article 107389. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107389.
20. Garipov B. I., Ustinov D. A. Simulation of combined power system with storage device. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. CRC Press, 2019, 7 p. DOI: 10.1201/9781003017226-34.
21. Gulkov Y. V., Ustinov D. A. Electric power quality distortions influencing oil processing plant parameters and characteristics. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 9, pp. 2027–2030.
22. Gulkov Y. V., Turyshcheva A. V., Vinogradova I. V. Producing steels with special properties using a jet heat treatment system. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 854. pp. 30–36. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.30
23. Iakovleva E. V., Belova M. V., Soares A., Rassolkin A. On the issues of spatial modeling of non-standard profiles by the example of electromagnetic emission measurement data. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1. DOI: 10.3390/su14010574. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/574>.
24. Pelz G. M., da Silva S. A. O., Sampaio L. P. Distributed generation integrating a photovoltaic-based system with a single- to three-phase UPQC applied to rural or remote areas supplied by single-phase electrical power. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020, vol. 117, article 105673. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105673.
25. Pelz G. M., da Silva S. A. O., Sampaio L. P. Comparative analysis involving PI and state-feedback multi-resonant controllers applied to the grid voltage disturbances rejection of a unified power quality conditioner. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020, vol. 115, article 105481. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105481.
26. Kavithaa G., Balakrishnan P., Yuvaraj S. A., A prognostic energy optimization technique with unified power quality conditioner for energy stabilization in grid system. *Computers & Electrical Engineering*. 2021, vol. 94, article 107360. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107360.

27. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 19, article 6074. DOI: 10.3390/en14196074.
28. Lavrik A. Y., Zhukovskiy Y. L. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 16, article 5059. DOI: 10.3390/en14165059.
29. 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.
30. Fagundes S. M., Cardoso F. L., Stangler E. V., Neves F. A. S., Mezaroba M. A detailed power flow analysis of the dual unified power quality conditioner (iUPQC) using power angle control (PAC). *Electric Power Systems Research*. 2021, vol. 192, article 106933. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106933.
31. Litran S. P., Salmeron P. Design criteria of a control strategy for hybrid power filters based on current and voltage detection. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2015, vol. 25, no. 3, pp. 419–432. DOI: 10.1002/etep.1850.
32. Tao Jin, Yueling Chen, Jintao Guo, Mengqi Wang, Mohamed M. A. An effective compensation control strategy for power quality enhancement of unified power quality conditioner. *Energy Reports*. 2020, vol. 6, pp. 2167–2179. DOI: 10.1016/j.egy.2020.07.027.
33. Ustinov D. A., Baburin S. V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 7, pp. 5267–5270.
34. 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.
35. Bacon V. D., da Silva S. A. O., Guerrero J. M. Multifunctional UPQC operating as an interface converter between hybrid AC-DC microgrids and utility grids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022, vol. 136, article 107638. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107638.
36. Sychev Yu. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 132–140. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
37. Zhdankin E. V., Ustinov D. A. Simulation modeling of an active storage system. *Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»*. 2018, vol. 18, no. 4, pp. 52–58. [In Russ]. DOI: 10.14529/power180406.
38. Zhukovskiy Y., Koteleva N. Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters. *Journal of Physics. Conference Series*. 2018, vol. 1050, no. 1, article 012106. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012106.
39. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сычев Юрий Анатольевич¹ — д-р техн. наук,
доцент, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
Аладьин Максим Евгеньевич¹ — аспирант,
e-mail: m.aladyin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266,

Зимин Роман Юрьевич¹ — канд. техн. наук,
ассистент, e-mail: roman.zimin@ro.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0498-8904,
¹ Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Аладын М.Е., e-mail: m.aladyin@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.A. Sychev¹, Dr. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
M.E. Aladin¹, Graduate Student,
e-mail: m.aladyin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266,
R.Yu. Zimin¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant, e-mail: roman.zimin@ro.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0498-8904,
¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: M.E. Aladin, e-mail: m.aladyin@gmail.com.

Получена редакцией 18.03.2022; получена после рецензии 03.05.2022; принята к печати 10.06.2022.
Received by the editors 18.03.2022; received after the review 03.05.2022; accepted for printing 10.06.2022.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО ЗАВОДА

(№ 1254/07-22 от 18.05.2022; 10 с.)

Косарева-Володько Ольга Владимировна¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: kosareva-volodko@rambler.ru; Пиримов Фарзод Файзуллоевич¹ — магистр,
¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Вопросы энергосбережения являются очень актуальными в современном производстве. Химическое производство, является достаточно энергоемким, так как в его производственный цикл входит получение аммиака, каустической соды, химических волокон, хлора, метанола и многих других продуктов, требующих на свое производство больших затрат электроэнергии. Основная электрическая нагрузка на химических предприятиях представлена асинхронными двигателями и их системами управления, что подразумевает большое значение величины реактивной мощности. В целях обеспечения экономии электроэнергии на химических предприятиях в данной статье даны рекомендации, позволяющие повысить энергосбережение.

Ключевые слова: энергосбережение, экономия электроэнергии, расход электроэнергии, мощность, нагрузка.

MEASURES TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF A CHEMICAL PLANT

O.V. Kosareva-Volod'ko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: kosareva-volodko@rambler.ru,
F.F. Pirimov¹, Magister,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISI», 119049, Moscow, Russia.

Energy saving issues are very relevant in modern production. Chemical production is quite energy intensive, since its production cycle includes the production of ammonia, caustic soda, chemical fibers, chlorine, methanol and many other products that require large amounts of electricity for their production. The main electrical load at chemical plants is represented by asynchronous motors and their control systems, which implies a large value of reactive power. In order to ensure energy savings at chemical enterprises, this article provides recommendations to improve energy savings.

Key words: energy saving, electricity saving, electricity consumption, power, load.