

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА В КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Ю.А. Сычев¹, М.Е. Аладьин

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Sychev_YuA@pers.spmi.ru

Аннотация: Обоснована актуальность проблемы обеспечения и повышения качества электрической энергии в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с ответственной технологической нелинейной нагрузкой. Приводятся основные результаты исследований уровня эффективности работы многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства с несколькими разнотипными активными преобразователями в комбинированной системе электроснабжения для предприятий минерально-сырьевого комплекса. Обобщены результаты предыдущих исследований авторов по данной тематике, которые приняты за основу, в том числе принятая последовательность включения активных преобразователей в составе многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства, а также способ формирования несинусоидального режима, при котором устройство продемонстрировало максимальную эффективность. Определена конфигурация пассивного активно-индуктивно-емкостного фильтра, предлагаемая для установки на выходе последовательного преобразователя в составе многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства для повышения эффективности работы последнего в комбинированных системах электроснабжения при значительном уровне искажения со стороны питающей сети. Подобный фильтр также позволяет снизить массогабаритные показатели многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства за счет уменьшения мощности выходного трансформатора последовательного преобразователя. Получены закономерности изменения нормируемых и ненормируемых показателей качества электрической энергии от мощности трансформатора последовательного преобразователя и параметров пассивного фильтра на выходе последовательного преобразователя. Полученные результаты показали эффективность и целесообразность установки пассивного активно-индуктивно-емкостного фильтра предлагаемой конфигурации на выходе последовательного преобразователя в составе многофункционального устройства для условий комбинированных систем электроснабжения.

Ключевые слова: активный преобразователь, нелинейная нагрузка, высшие гармоники, многофункциональное фильтрокомпенсирующее устройство, качество электрической энергии, активный фильтр, комбинированная система электроснабжения.

Для цитирования: Сычев Ю. А., Аладьин М. Е. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 7. – С. 170–184. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_7_0_170.

Multifunction filter compensation devices in hybrid power supply systems in the mineral sector

Yu.A. Sychev¹, M.E. Aladin¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Sychev_YuA@pers.spmi.ru

Abstract: The significance of higher quality power service in hybrid supply systems subjected to critical nonlinear loading in the mineral sector is demonstrated. The key studies on efficiency of a multifunction filter compensation device with a number of active converters in a hybrid power supply system in the mineral sector are described. The previous research findings obtained by the authors in the field of the present scientific subject are generalized and assumed as a basis, including the adopted sequencing of active converters of the multifunction filter compensation devices, as well as the method of shaping a distorted wave for the filter compensator to demonstrate the maximum efficiency. The configuration of an active/passive inductor–capacitor filter is determined and proposed for installation at the outlet of a series converter of the multifunction filter compensation device to enhance efficiency of the latter in the hybrid power supply systems exposed to a high distortion from the supply mains. Such filter makes it possible to diminish the weight and size of the multifunction filter compensator at the cost of decreasing capacity of an output transformer of the series converter. The patterns of the normalizable and non-normalizable quality factors of electric power are obtained depending on the capacity of the series converter transformer and parameters of the passive filter at the outlet of the series converter. The results demonstrate efficiency and expediency of the proposed configuration of the passive/active inductor–capacitor filter to be set at the outlet of the series converter of the multifunction device for the hybrid power supply systems.

Key words: active converter, nonlinear load, high harmonics, multifunction filter compensation device, power quality, active filter, hybrid power supply system.

For citation: Sychev Yu. A., Aladin M. E. Multifunction filter compensation devices in hybrid power supply systems in the mineral sector. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(7):170–184. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_7_0_170.

Введение

Ключевой особенностью комбинированных систем электроснабжения является параллельная или обособленная работа централизованных и автономных источников с учетом ответственной технологической нагрузки, включая машины и оборудование минерально-сырьевого комплекса [1, 2]. При таких условиях процессы вариации показателей качества электрической энергии протекают совершенно иначе по сравнению с традиционными энергосистемами бесконечной мощности, что определяет специфические требования к фильтрокомпенсирующим устройствам [3, 4]. При

этом ответственная технологическая нагрузка минерально-сырьевого комплекса, как правило, реализована на базе частотно-регулируемого электропривода, который является основным видом нелинейной преобразовательной нагрузки, существенно ухудшающим уровень качества электроэнергии [5, 6].

В ряде научных работ [7, 8], а также исследованиях авторов [9] показана и обоснована целесообразность и эффективность применения многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с гибкой адаптивной структурой на основе нескольких активных преобразователей для обеспечения качества

электроэнергии в комбинированных системах электроснабжения при изменении параметров и характеристик питающей сети и подключенной нагрузки [10, 11].

Также особое внимание будет уделяться характеру и особенностям взаимного влияния преобразователей, образующих универсальные компенсаторы. Ведь активные преобразователи, являясь достаточно сложными устройствами со сложными алгоритмами управления, находясь в одной сети и работая в составе одного устройства, генерируя компенсационные токи и напряжения, могут приводить к возникновению процессов как улучшающих, так и ухудшающих уровень качества электрической энергии [12, 13].

Помимо этого, различные алгоритмы управления, которыми оснащены активные преобразователи, как в составе фильтров, так и в составе специализированных устройств, обуславливают высокую частоту коммутации силовых элементов преобразователей, что является причиной возможных высокочастотных помех [14, 15]. Это также нужно учитывать при выборе упомянутых преобразователей, включая топологию и способ управления [16, 17].

Данная статья является развитием и продолжением исследований авторов [9], посвященных анализу эффективности указанных фильтрокомпенсирующих устройств.

Научная проблема и цель исследования

Результаты исследований многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства [9] с несколькими активными преобразователями при изменении путей и показателей формирования несинусоидальных режимов показали, что подобное решение достаточно эффективно с точки зрения обеспечения качества электрической энергии по нормируе-

мым, ненормируемым и дополнительным (косвенным) показателям качества электроэнергии, но преимущественно в централизованных энергосистемах с бесконечно малым внутренним сопротивлением и бесконечно большой мощностью короткого замыкания (энергосистемы бесконечной мощности) [18, 19]. Причем был выявлен путь (способ) формирования несинусоидального режима, при котором упомянутое устройство демонстрирует максимальную эффективность [9]. Однако при наличии значительного уровня гармонических искажений по напряжению со стороны питающей сети данное устройство продемонстрировало недостаточную эффективность по подавлению гармоник напряжения. Для устранения этого недостатка предложено использование дополнительного пассивного фильтра заданной конфигурации, который включается на выходе одного из активных преобразователей в составе предлагаемого устройства [20, 21].

Известен ряд научных работ, где обосновывается и доказывается эффективность включения пассивного фильтра на выходе параллельного активного фильтра для повышения степени коррекции высших гармоник напряжения в условиях автономных энергосистем [22, 23]. В составе предлагаемого многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства имеется два активных преобразователя: параллельного и последовательного типа, при этом на выходе последовательного преобразователя включается вольтодобавочный силовой трансформатор заданной мощности, которая определяется исходя из мощности подключенной нагрузки [24, 25]. Таким образом, наличие данного трансформатора непосредственно определяет и влияет на массогабаритные показатели предлагаемого многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства,

которые, с учетом сложности и дороговизны данного устройства, должны быть по возможности минимизированы [26, 27]. Исходя из этого, в рамках данных исследований предлагается установка пассивного фильтра именно на выходе последовательного активного преобразователя [28, 29].

Имитационное моделирование

За основу принята модель, описанная в трудах авторов [9], содержащая источник напряжения 0,4 кВ с изменяемым внутренним сопротивлением, узел нагрузки, состоящий из линейной и нелинейной частей суммарной мощностью 250–300 кВт, два активных преобразователя (фильтра), один из которых параллельного, а другой последовательного типа, между ними кабельная линия длиной до 50 м. При имитационном моделировании в качестве базисной величины внутреннего сопротивления сети 0,4 кВ принято сопротивление централизованного источника с мощностью короткого замыкания более 20 МВА на уровне 0,4 кВ, мощность в автономной

режиме принималась 2 МВА с соответствующим внутренним сопротивлением [30, 31].

В качестве базисной величины сопротивления линии между последовательным (ПСАФ) и параллельным преобразователем (ПАФ) устройством принято сопротивление кабельной линии 50 м с учетом допустимых потерь напряжения не более 5%. Нелинейная преобразовательная нагрузка представлена в виде управляемого 6-пульсного выпрямителя в составе системы регулируемого электропривода [32, 33], линейная нагрузка – в виде активно-индуктивной нагрузки. Последовательный и параллельный преобразователи устройства представлены в виде инверторов с накопительными конденсаторами в звене постоянного тока емкостью 2 мкФ и напряжением не менее 535 В и выходными дросселями индуктивностью 200 мкГн [34, 35]. Имитационная модель, разработанная в среде Simulink Matlab, приведена на рис. 1.

Указанная модель состоит из источника питания с внутренним активно-

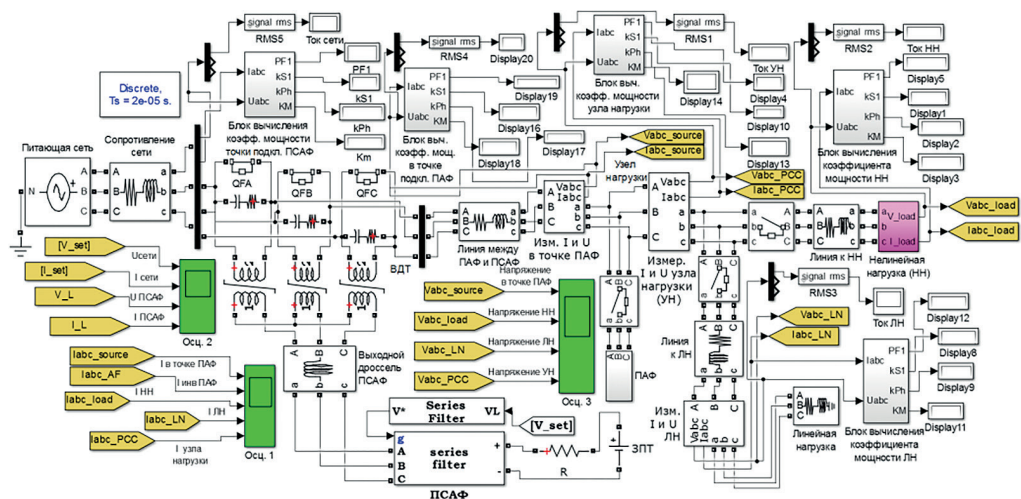


Рис. 1. Имитационная модель комбинированной системы электроснабжения с линейной, нелинейной нагрузками и многофункциональным фильтрокомпенсирующим устройством

Fig. 1. Simulation model of the combined power supply system with linear, nonlinear loads and multifunctional filter device

индуктивным сопротивлением, ПАФ, ПСАФ, линии между ними, линейной и нелинейной нагрузок. Линейная нагрузка выполнена в виде активно-индуктивного сопротивления, нелинейная — в виде неуправляемого 6-пульсного диодного выпрямителя. ПАФ и ПСАФ также выполнены на базе 6-пульсных схем с IGBT транзисторами, ПСАФ также оснащен вольтодобавочным трансформатором, на выходе которого включаются пассивные фильтры разных конфигураций. В модели также присутствуют стандартные измерительные блоки, а также разработанные авторами блоки вычисления составляющих суммарного коэффициента мощности при несинусоидальных режимах.

В рамках данного исследования в процессе имитационного моделирования приняты следующие допущения и ограничения [36, 37]:

- в рамках рассматриваемого устройства сначала вводится в работу параллельный активный преобразователь со стороны узла нагрузки, затем последовательный активный преобразователь, включенный со стороны питающей сети, целесообразность данного решения обоснована в исследованиях авторов [9];
- параллельный активный преобразователь в составе устройства не оснащен выходными фильтрами, так как этот вопрос был подробно изучен в ряде научных исследований [18, 19], а также в работе авторов [9];
- в процессе моделирования осуществлялось изменение внутреннего сопротивления питающей сети в диапазоне, соответствующем переходу от централизованного к автономному электроснабжению и наоборот, с учетом допустимого уровня напряжения на источнике [38, 39];
- основные критерии настройки параметров пассивного фильтра на выходе последовательного преобразователя: минимизация потерь напряжения, подав-

ление гармоник высокого порядка при высокочастотной коммутации ключей преобразователя, минимизация потерь активной мощности, нивелирование возможных резонансных явлений [40, 41].

Критерием оценки эффективности работы устройства является степень коррекции (снижения или увеличения) того или иного показателя качества электроэнергии:

$$\delta_{ПКЭ} = \left(\frac{ПКЭ_{до} - ПКЭ_{после}}{ПКЭ_{до}} \right) * 100\% , \quad (1)$$

где $ПКЭ_{до}$ и $ПКЭ_{после}$ — соответственно величины нормируемых и ненормируемых показателей качества электроэнергии (ПКЭ) до и после включения устройства. К анализу принимались степени снижения (увеличения) суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и тока (δTHD_U и δTHD_I соответственно), степени снижения (увеличения) отклонения напряжения (δU), степени снижения (увеличения) тока узла нагрузки δI_c . Если указанные степени снижения по результатам моделирования получаются отрицательными, это говорит о том, что устройство своей работой ухудшает один или несколько показателей качества электроэнергии при какой-либо совокупности условий [42, 43]. Такой подход, по мнению авторов, является наиболее адекватным при анализе эффективности многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств как отдельного класса устройств [44, 45].

Результаты имитационного моделирования и их обсуждение

По результатам исследований была выявлена конфигурация пассивного фильтра, предлагаемая для включения на выходе последовательного преобразователя в составе исследуемого многофункционального устройства, которая приведена на рис. 2.

В процессе имитационного моделирования осуществлялась вариация параметров L_ϕ , $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ в определенных диапазонах, которые определялись по критериям минимизации потерь напряжения в фильтре, а также минимизации степени увеличения потребляемого нагрузкой тока. Одновременно с этим вариации подвергалась мощность вольтодобавочного трансформатора последовательного преобразователя $S_{\text{ПСАФ}}$ для выявления возможной степени ее уменьшения для снижения массогабаритных показателей устройства [46, 47].

На рис. 3 приведены зависимости изменения δU_c от $S_{\text{ПСАФ}}$ при вариации емкости $C_{\phi 1}$ выходного фильтра с фиксированными $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_ϕ , $C_{\phi 2}$. На рис. 4–6 приведены аналогичные закономерности для δTHD_U , δI_c и δTHD_I .

Аналогичные закономерности были получены для δU_c , δTHD_U , δI_c и δTHD_I при вариации L_ϕ и $C_{\phi 2}$ с фиксацией остальных параметров.

Для удобства анализа полученных результатов диапазоны вариации δU_c , δTHD_U , δI_c и δTHD_I , полученные при имитационном моделировании, сведены в таблицу.

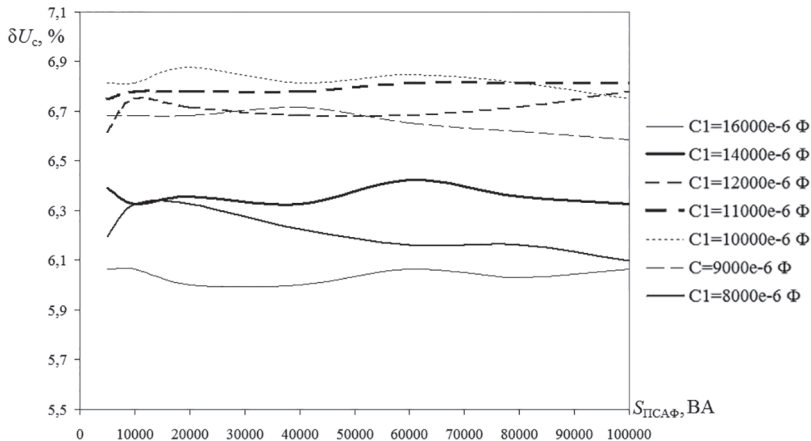


Рис. 3. Зависимости изменения δU_c от $S_{\text{ПСАФ}}$ при вариации емкости $C_{\phi 1}$ выходного фильтра с фиксированными $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_ϕ , $C_{\phi 2}$

Fig. 3. The dependences of the variation of the δU_c from $S_{\text{ПСАФ}}$ under variation of the capacitance $C_{\phi 1}$ of the output filter with fixed $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_ϕ , $C_{\phi 2}$

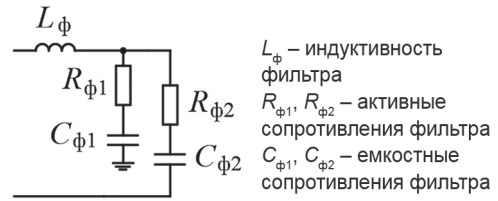


Рис. 2. Конфигурация пассивного фильтра на выходе последовательного преобразователя

Fig. 2. The configuration of the passive filter at the output of the series converter

По результатам вариации параметров пассивного фильтра со структурой (см. рис. 2) на выходе последовательного преобразователя в составе устройства сделаны следующие основные выводы:

- мощность трансформатора $S_{\text{ПСАФ}}$ на выходе последовательного преобразователя оказывает незначительное влияние на показатели эффективности работы устройства при вариации параметров и конфигурации пассивных фильтров на выходе трансформатора указанного преобразователя, а также внутреннего сопротивления сети [48, 49]. Это позволяет существенно минимизировать $S_{\text{ПСАФ}}$ для снижения массогабаритных показателей устройства;

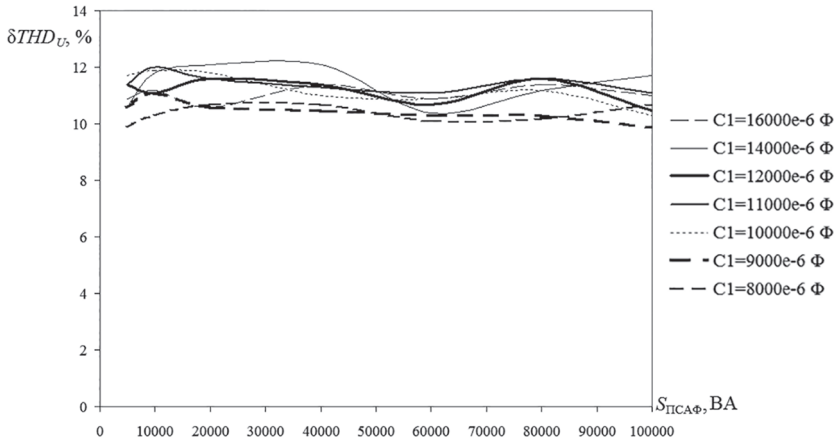


Рис. 4. Зависимости изменения δTHD_U от $S_{PCAФ}$ при вариации емкости $C_{\phi 1}$ выходного фильтра с фиксированными $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_{ϕ} , $C_{\phi 2}$

Fig. 4. The dependences of the variation of the δTHD_U from $S_{PCAФ}$ under variation of the capacitance $C_{\phi 1}$ of the output filter with fixed $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_{ϕ} , $C_{\phi 2}$

- параметры RLC-фильтра различным образом влияют на отдельные показатели качества, что позволяет выборочно регулировать параметры фильтра исходя из параметров питающей сети (централизованное или автономное электроснабжение) [50];
- вариация параметров RLC-фильтра при высоких значениях внутреннего сопротивления сети сопровождается ростом тока узла нагрузки;

- характер вариации степени эффективности коррекции показателей качества электроэнергии при изменении параметров выходного фильтра и $S_{PCAФ}$ показывает наличие незначительных резонансов, что необходимо учитывать при настройке характеристик устройства;
- для повышения эффективности коррекции отклонений и искажений напряжения при высоких значениях внутреннего сопротивления сети необходи-

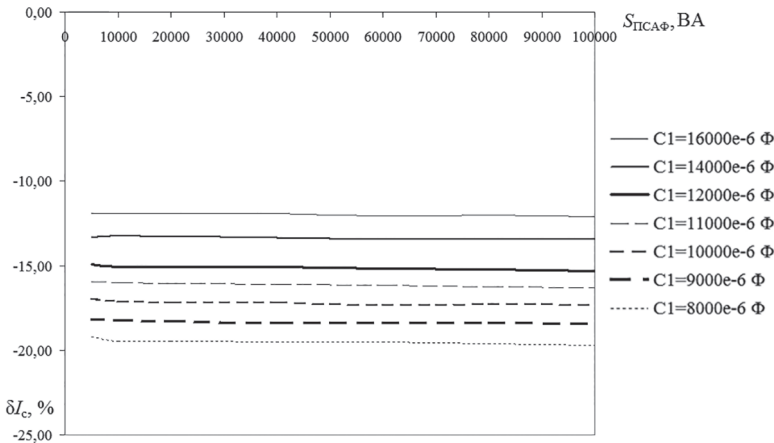


Рис. 5. Зависимости изменения δI_c от $S_{PCAФ}$ при вариации емкости $C_{\phi 1}$ выходного фильтра с фиксированными $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_{ϕ} , $C_{\phi 2}$

Fig. 5. The dependences of the variation of the δI_c from $S_{PCAФ}$ under variation of the capacitance $C_{\phi 1}$ of the output filter with fixed $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_{ϕ} , $C_{\phi 2}$

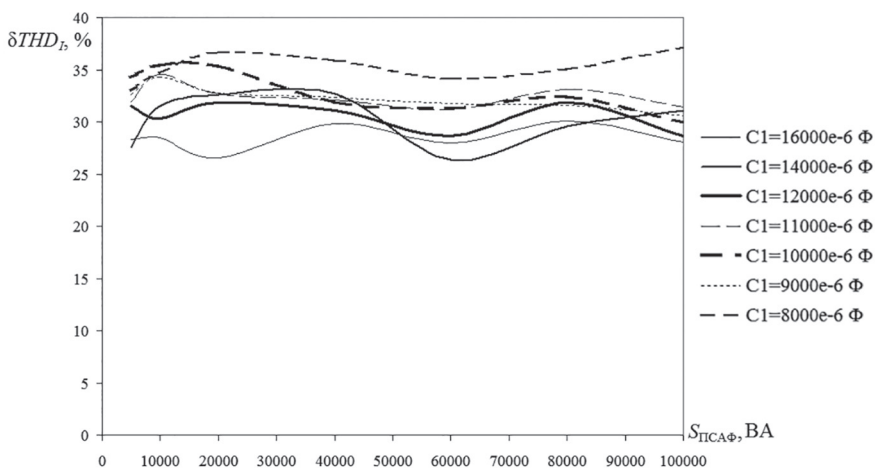


Рис. 6. Зависимости изменения δTHD_u от $S_{PCAФ}$ при вариации емкости $C_{\phi 1}$ выходного фильтра с фиксированными $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_{ϕ} , $C_{\phi 2}$

Fig. 6. The dependences of the variation of the δTHD_u from $S_{PCAФ}$ under variation of the capacitance $C_{\phi 1}$ of the output filter with fixed $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, L_{ϕ} , $C_{\phi 2}$

Результаты влияния параметров фильтра на показатели качества электроэнергии The influence of the filter's parameters on the power quality indicators

Регулируемый параметр	Степень коррекции показателя качества электроэнергии			
	δU_c , %	δTHD_u , %	δI_c , %	δTHD_i , %
L_{ϕ}	5,27 ÷ 5,45	9,5 ÷ 11,9	-9,95 ÷ -9,73	23 ÷ 31
$C_{\phi 2}$	5,05 ÷ 5,8	-7 ÷ 12	-14 ÷ -9	-37 ÷ 35
$C_{\phi 1}$	6 ÷ 6,9	10 ÷ 12	-19 ÷ -12	26 ÷ 37

мо регулировать параметры $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ RLC-фильтра соответственно (согласно таблице);

- для повышения эффективности коррекции искажений тока при высоких значениях внутреннего сопротивления сети необходимо регулировать параметр $C_{\phi 1}$ RLC-фильтра (согласно таблице);
- для снижения δI_c необходимо регулирование параметра L_{ϕ} RLC-фильтра (согласно таблице).

Заключение

По результатам исследований выявлена структура пассивного фильтра, подключение которого на выходе вольтодобавочного трансформатора последовательного преобразователя дает возможность роста эффективности устройства при коррекции показателей качества электро-

энергии при автономном режиме электроснабжения. Выявлены закономерности влияния параметров этой конфигурации на степень эффективности коррекции нормируемых и ненормируемых показателей качества электроэнергии. Эти закономерности показывают, как влияет диапазон вариации того или иного параметра пассивного фильтра на глубину коррекции каждого из показателей. Это дает возможность осуществлять выборочную регулировку этих параметров, исходя из того, какой из показателей качества нуждается в наиболее глубокой коррекции. Также применение пассивного фильтра на выходе последовательного преобразователя позволяет снизить мощность вольтодобавочного трансформатора, что дает возможность снизить массогабаритные показатели устройства в целом.

Данные закономерности получены впервые для условий применения пассивного фильтра предложенной конфигурации на выходе последовательного преобразователя в составе многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства на основе нескольких активных преобразователей.

Полученные результаты будут полезны при разработке, планировании, организации и реализации комплексных мероприятий по повышению качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий практически всех отраслей промышленности минерально-сырьевого комплекса.

Также представленные результаты показывают, что активные преобразователи в составе регулятора при определенных режимах можно попеременно отключать и включать в зависимости от набора имеющихся источников и в соответствии с составом подключаемой нагрузки (процентное содержание мощности линейных и нелинейных потребителей и степень их ответственности в части необходимости их отключения в аварийных режимах). Помимо этого, один из преобразователей в составе предлагаемого устройства в зависимости от уровня заряда накопительного конденсатора можно перевести в режим источника бесперебойного питания при одновременном отказе централизованного и автономного электроснабжения наиболее ответственных технологических электроприемников. Существуют исследования, доказывающие возможность подобного режима работы. Также один из преобразователей может быть перенесен в другую точку системы электроснабжения, если по результатам реконструкции или технического перевооружения производства появились дополнительные нагрузки, введены в строй новые генерирующие мощности, поменялась

конфигурация распределительной сети и значения показателей качества электроэнергии изменились. Это подтверждает гибкость предлагаемого многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства с распределенной структурой в условиях периодических реконструкций промышленных систем электроснабжения. Помимо этого, полученные закономерности могут помочь определить вклад того или иного устройства, подключаемого к электрической сети, в разные составляющие результирующего коэффициента мощности, в зависимости от структуры системы электроснабжения, набора потребителей, параметров и характеристик питающих источников, что можно выделить в качестве направления дальнейших исследований по данной научной тематике.

Среди дальнейших направлений исследований по данному вопросу следует также выделить:

- использование более сложных структур активных преобразователей, например, трехуровневых инверторов;
- разработку более эффективных алгоритмов регулирования напряжения в звене постоянного тока преобразователей;
- разработку мероприятий по снижению активных потерь при высокочастотной коммутации силовых элементов активных преобразователей;
- дальнейшее совершенствование способов релейного регулирования при управлении активными преобразователями;
- разработку технологии виртуальных инверторов для моделирования искажений от автономных источников различной природы;
- дальнейшее расширение функциональных возможностей универсальных регуляторов в части компенсации несимметричных режимов источников и нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Averbukh M. A., Zhilin E. V.* Optimization of coefficients specified with non-sinusoidal and non-symmetry feeding voltage in electrical supply systems in individual residential sector // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1066, no. 1, article 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012019.
2. *Непша Ф. С., Варнавский К. А., Воронин В. А., Заславский И. С., Ливен А. С.* Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях // *Записки Горного института*. – 2023. – Т. 261. – С. 455–469. DOI: 10.31897/PMI.2023.20.
3. *Устинов Д. А., Растворова И. И., Поливанов А. Е.* Современные методы оптимизации систем с распределенной генерацией электроэнергии // *Горный журнал*. – 2025. – № 9. – С. 26–36. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.03.
4. *Дмитриев Б. Ф., Галушин С. Я.* Гибридные энергоустановки на базе электрохимических генераторов для морских транспортных средств // *Электротехника*. – 2025. – № 1. – С. 80–86. DOI: 10.53891/00135860-2025-1-80-86.
5. *Герман-Галкин С. Г., Дмитриев Б. Ф.* Аналитическое и модельное исследование гибридной судовой электроэнергетической системы // *Электротехника*. – 2024. – № 4. – С. 53–62. DOI: 10.53891/00135860-2024-4-53-62.
6. *Baburin S. V., Turyshva 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.
7. *Плащанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю.* Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // *Горные науки и технологии*. – 2022. – Т. 7. – № 1. – С. 66–77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.
8. *Malozymov B. V., Martyushev N. V., Demin A. Y., Pogrebnoy A. V., Efremkov E. A., Valuev D. V., Boltrushevich A. E.* Improving the reliability of current collectors in electric vehicles // *Mathematics*. 2025, vol. 13, no. 12, article 2022. DOI: 10.3390/math13122022.
9. *Sychev Y. A., Aladin M. E., Abramovich B. N.* The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions / *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020, vol. 2020, pp. 904–908. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039427.
10. *Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К.* Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов // *Записки Горного института*. – 2025. – Т. 275. – С. 5–17.
11. *Karpov A. S., Yaroshevich V. V., Gubskaya E. I.* Research on electrical energy parameters in the distribution system of a mining facility // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025, vol. 15, no. 21, article 11355. DOI: 10.3390/app152111355.
12. *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*. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 2231–2237. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp2231-2237.
13. *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.
14. *Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Ематин Е. А., Абельянц У. В.* Статистический анализ и прогнозное моделирование электропотребления экскаваторов и участков угольного разреза // *Уголь*. – 2024. – № 3 (1178). – С. 79–86. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-79-86.
15. *Shishkin P. V., Malozymov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M.* Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment // *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 11, article 1660. DOI: 10.3390/math12111660.
16. *Laxmid devi 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.
17. *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.

18. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Methodology for developing a maintenance action program for power units of captive power plants based on an integrated priority indicator // *Energies*. 2026, vol. 19, no. 6, article 1584, DOI: 10.3390/en19061584.

19. Yanchenko S., Kulikov A., Tsyruk S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices // *Electric Power Systems Research*. 2018, vol. 163, pp. 28–37. DOI: 10.1016/j.epr.2018.05.021.

20. 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.

21. Yanchenko S. A., Costa F. B., Strunz K. Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2118–2128. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3020754.

22. Avdeev B., Vyngra A., Chernyi S. Improving the Electricity Quality by Means of a Single-Phase Solid-State Transformer // *Designs*. 2020, vol. 4, no. 3, article 35. DOI: 10.3390/designs4030035.

23. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Chernyi S. G., Zhilenkov A. A., Degtyarev A., Mamunts D., Kustov A. Parametric correction in the control system of the electric propulsion of autonomous underwater vehicles affected by random inputs // *Discover Applied Sciences*. 2024, vol. 6, no. 10, article 510. DOI: 10.1007/s42452-024-06199-0.

24. 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.

25. Воронцов А. Г., Пронин М. В., Соловьев А. П., Глушаков В. В., Розбицкий Г. Г., Дикун И. А. Быстродействующие модели систем с модульными многоуровневыми преобразователями // *Электротехника*. — 2024. — № 1. — С. 41–49. DOI: 10.53891/00135860_2024_1_41.

26. Ключев Р. В. Разработка методики расчета качаний в электрической системе // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 1205–1213. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213.

27. Petrochenkov A. B., Romodin A. V. Energy-optimizer complex // *Russian Electrical Engineering*. 2010, vol. 81, no. 6, pp. 323–327. DOI: 10.3103/S106837121006009X.

28. Kostin V. N., Krivenko A. V., Serikov V. A. 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*. 2019, pp. 263–271. DOI: 10.1201/9781003017226-36.

29. Ершов М. С., Комков А. Н., Феоктистов Е. А. Комплексная модель регулируемого электропривода ротора буровой установки // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 261. — С. 339–348. DOI: 10.31897/PMI.2023.20.

30. Shishkin P. V., Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Development of a mathematical model of operation reliability of mine hoisting plants // *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 12, article 1843. DOI: 10.3390/math12121843.

31. Turyshva A., Kozhubaev Y., Changwen Y., Ershov R., Novak D., Poddubniy D. Integrated control technologies for mechanized coal mining // *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 11, article 1947. DOI: 10.3390/sym17111947.

32. Ключев Р. В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината // *Горная промышленность*. — 2024. — № 55. — С. 105–109. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-55-105-109.

33. Коржев А. А., Маларев В. И., Минакова Т. Е. Исследование схем измерительных автогенераторов для контроля влажности жидких нефтепродуктов диэлектрическим методом // *Горный журнал*. — 2025. — № 9. — С. 58–62. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.07.

34. Petrochenkov A. B., Mishurinskikh S. V. Development of a method for optimizing power consumption of an electric driven centrifugal pump // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2021, vol. 2021, pp. 1520–1524. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396730.

35. Кубрин С. С., Загоршменный И. М., Решетняк С. Н., Максименко Ю. М. Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт // *Уголь*. — 2024. — № 4. — С. 83–87. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.

36. Babaei Z., Samet H., Serikov V. A. New power balance equations for modelling electric arc furnace // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2025, vol. 19, no. 1, article e70116. DOI: 10.1049/gtd2.70116.

37. Novak D., Kozhubaev Y., Kang H., Cheng H., Ershov R. Intelligent system study for asymmetric positioning of personnel, transport, and equipment monitoring in coal mines // *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 5, article 755. DOI: 10.3390/sym17050755.

38. Ustinov A. D., Abou Rashid A. Using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection // *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2192–2199. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.06.

39. Выболдин Ю. К. Использование технологии PLC для повышения эффективности системы передачи данных в подземных сооружениях // *Горный журнал*. — 2025. — № 9. — С. 62–68. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.08.

40. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop a maintenance strategy for electrical equipment // *Energies*. 2025, vol. 18, no. 21, article 5832. DOI: 10.3390/en18215832.

41. Veprikov A. A., Glukhov A. A. Problems of operating industrial dc power sources in parallel connection / *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020, vol. 2020, pp. 1339–1343. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038928.

42. Arkhipova O. V., Dolgikh N. N., Kovalev V. Z., Osipov D. S., Paramzin A. O., Tkachenko V. A. Developing the calculation methods of effective values of current and voltage for nonsinusoidal transient modes in electric power systems based wavelet transform // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, vol. 1118, no. 1, article 012031. DOI: 10.1088/1757-899x/1118/1/012031.

43. 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.

44. Мякотных А. А., Иванова П. В., Иванов С. Л. Критерии и технологические требования создания мостовой платформы добычи торфяного сырья для климатически нейтральной геотехнологии // *Горная промышленность*. — 2024. — № 4. — С. 116–120. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-116-120.


45. Корогодин А. С., Иванов С. Л. Оценка технического состояния опорных подшипников скольжения барабанной мельницы при эксплуатации в составе арктического комплекса горного оборудования // *Горная промышленность*. — 2024. — № 6. — С. 144–151. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

46. 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.

47. 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.

48. Melnikova O., Nazarychev A., Iliev I., Beloev I., Suslov K. Diagnostic statistical characteristics of dielectric strength of power transformer oil insulation // *Energy*. 2025, vol. 340, article 139169. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139169.

49. 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.

50. 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. 

REFERENCES

1. Averbukh M. A., Zhilin E. V. Optimization of coefficients specified with non-sinusoidal and non-symmetry feeding voltage in electrical supply systems in individual residential sector. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1066, no. 1, article 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012019.

2. Nepsha F. S., Varnavskiy K. A., Voronin V. A., Zaslavskiy I. S., Liven A. S. Integration of renewable energy at coal mining enterprises: problems and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 455–469. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.20.

3. Ustinov D. A., Rastvorova I. I., Polivanov A. E. Up-to-date methods of distributed generation optimization. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 9, pp. 26–36. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.03.
4. Dmitriev B. F., Galushin S. Ya. Hybrid power plants based on electrochemical generators for marine vehicles. *Russian Electrical Engineering*. 2025, vol. 96, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.3103/S1068371225700105.
5. German-Galkin S. G., Dmitriev B. F. An analytical and simulation study of a hybrid shipboard electrical-power system. *Russian Electrical Engineering*. 2024, vol. 95, no. 4, pp. 302–312. DOI: 10.3103/s1068371224700305.
6. 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.
7. Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Y. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 1, pp. 66–77. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.
8. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Demin A. Y., Pogrebnoy A. V., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Boltrushovich A. E. Improving the reliability of current collectors in electric vehicles. *Mathematics*. 2025, vol. 13, no. 12, article 2022. DOI: 10.3390/math13122022.
9. Sychev Y. A., Aladin M. E., Abramovich B. N. The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020, vol. 2020, pp. 904–908. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039427.
10. Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K. Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 275, pp. 5–17. [In Russ].
11. Karpov A. S., Yaroshevich V. V., Gubskaya E. I. Research on electrical energy parameters in the distribution system of a mining facility. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025, vol. 15, no. 21, article 11355. DOI: 10.3390/app152111355.
12. 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*. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 2231–2237. DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp2231-2237.
13. 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.
14. Karpenko S. M., Karpenko N. V., Ematin E. A., Abelyants U. V. Statistical analysis and predictive modelling of electric power consumption of excavators and sites of a coal strip mine. *Ugol'*. 2024, no. 3 (1178), pp. 79–86. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-79-86.
15. Shishkin P. V., Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment. *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 11, article 1660. DOI: 10.3390/math12111660.
16. 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.
17. 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.
18. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloiev H., Suslov K., Beloiev I. Methodology for developing a maintenance action program for power units of captive power plants based on an integrated priority indicator. *Energies*. 2026, vol. 19, no. 6, article 1584, DOI: 10.3390/en19061584.
19. Yanchenko S., Kulikov A., Tsyruk S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices. *Electric Power Systems Research*. 2018, vol. 163, pp. 28–37. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.05.021.
20. 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.
21. Yanchenko S. A., Costa F. B., Strunz K. Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2118–2128. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3020754.

22. Avdeev B., Vyngra A., Chernyi S. Improving the Electricity Quality by Means of a Single-Phase Solid-State Transformer. *Designs*. 2020, vol. 4, no. 3, article 35. DOI: 10.3390/designs4030035.
23. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Chernyi S. G., Zhilenkov A. A., Degtyarev A., Mamunts D., Kustov A. Parametric correction in the control system of the electric propulsion of autonomous underwater vehicles affected by random inputs. *Discover Applied Sciences*. 2024, vol. 6, no. 10, article 510. DOI: 10.1007/s42452-024-06199-0.
24. 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.
25. Vorontsov A. G., Pronin M. V., Soloviev A. P., Glushakov V. V., Rozbitsky G. G., Dikun I. A. High-speed models of systems with modular multi-level converters. *Russian Electrical Engineering*. 2024, vol. 95, no. 1, pp. 41–50. DOI: 10.3103/S1068371224010103.
26. Klyuev R. V. System analysis of rocking calculation methods for power supply systems in quarry points. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1205–1213. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213.
27. Petrochenkov A. B., Romodin A. V. Energy-optimizer complex. *Russian Electrical Engineering*. 2010, vol. 81, no. 6, pp. 323–327. DOI: 10.3103/S106837121006009X.
28. Kostin V. N., Krivenko A. V., Serikov V. A. 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*. 2019, pp. 263–271. DOI: 10.1201/9781003017226-36.
29. Ershov M. S., Komkov A. N., Feoktistov E. A. A complex model of a drilling rig rotor with adjustable electric drive. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 339–348. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.20.
30. Shishkin P. V., Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Development of a mathematical model of operation reliability of mine hoisting plants. *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 12, article 1843. DOI: 10.3390/math12121843.
31. Turyshcheva A., Kozhubaev Y., Changwen Y., Ershov R., Novak D., Poddubniy D. Integrated control technologies for mechanized coal mining. *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 11, article 1947. DOI: 10.3390/sym17111947.
32. Klyuev R. V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant. *Russian Mining Industry*. 2024, no. 5S, pp. 105–109. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109.
33. Korzhev A. A., Malarev V. I., Minakova T. E. Measuring self-oscillator circuits for oil humidity control using dielectric method. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 9, pp. 58–62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.07.
34. Petrochenkov A. B., Mishurinskikh S. V. Development of a method for optimizing power consumption of an electric driven centrifugal pump. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2021, vol. 2021, pp. 1520–1524. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396730.
35. Kubrin S. S., Zakorshmeny I. M., Reshetnyak S. N., Maksimenko Yu. M. Increasing operational efficiency of mining machines in coal mines. *Ugol'*. 2024, no. 4, pp. 83–87. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.
36. Babaei Z., Samet H., Serikov V. A. New power balance equations for modelling electric arc furnace. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2025, vol. 19, no. 1, article e70116. DOI: 10.1049/gtd.2.70116.
37. Novak D., Kozhubaev Y., Kang H., Cheng H., Ershov R. Intelligent system study for asymmetric positioning of personnel, transport, and equipment monitoring in coal mines. *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 5, article 755. DOI: 10.3390/sym17050755.
38. Ustinov A. D., Abou Rashid A. Using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2192–2199. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.06.
39. Vyboldin Yu. K. The use of PLC technology to improve efficiency of data transmission systems in underground structures. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 9, pp. 62–68. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.08.
40. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloiev H., Suslov K., Beloiev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop

a maintenance strategy for electrical equipment. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 21, article 5832. DOI: 10.3390/en18215832.

41. Veprikov A. A., Glukhov A. A. Problems of operating industrial dc power sources in parallel connection. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020, vol. 2020, pp. 1339–1343. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038928.

42. Arkhipova O. V., Dolgikh N. N., Kovalev V. Z., Osipov D. S., Paramzin A. O., Tkachenko V. A. Developing the calculation methods of effective values of current and voltage for nonsinusoidal transient modes in electric power systems based wavelet transform. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, vol. 1118, no. 1, article 012031. DOI: 10.1088/1757-899x/1118/1/012031.

43. 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.

44. Myakotnykh A. A., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Criteria and technological requirements for creation of a bridge platform to extract peat raw materials for climate-neutral geotechnology. *Russian Mining Industry*. 2024, no. 4, pp.116–120. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-919. 2024, no. 4, pp. 116–120. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-116-120.

45. Korogodin A. S., Ivanov S. L. Assessment of the technical condition of drum mill supporting sliding bearings during operation as part of an arctic mining equipment complex. *Russian Mining Industry*. 2024, no. 6, pp. 144–151. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

46. 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.

47. 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.

48. Melnikova O., Nazarychev A., Iliev I., Beloev I., Suslov K. Diagnostic statistical characteristics of dielectric strength of power transformer oil insulation. *Energy*. 2025, vol. 340, article 139169. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139169.

49. 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.

50. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сычев Юрий Анатольевич¹ — д-р техн. наук, доцент,
e-mail: Sychev_YuA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-0119-505X.

Аладьин Максим Евгеньевич¹ — аспирант,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266.

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Сычев Ю.А., e-mail: Sychev_YuA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.A. Sychev¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Sychev_YuA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
M.E. Aladin¹, Graduate Student, ORCID ID: 0000-0002-0706-1266

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: Yu.A. Sychev, e-mail: Sychev_YuA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 26.01.2026; получена после рецензии 18.03.2026; принята к печати 10.06.2026.

Received by the editors 26.01.2026; received after the review 18.03.2026; accepted for printing 10.06.2026.