УДК 621.311

Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами

Ю.А.СЫЧЕВ, Р.Ю.ЗИМИН ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация. Показана актуальность и необходимость выбора и обоснования структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств на основе последовательных и параллельных активных фильтров для повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. Разработаны математические модели гибридных фильтрокомпенсирующих устройств на основе параллельного и последовательного активных фильтров. На основе данных математических моделей разработаны компьютерные имитационные модели указанных гибридных структур. Результаты имитационного моделирования показали эффективность коррекции показателей качества электроэнергии в части снижения уровня высших гармоник тока и напряжения, а также отклонений напряжения. Выявлены степени влияния фильтрокомпенсирующих устройств на показатели качества электроэнергии, определяющие непрерывность и устойчивость технологического процесса на предприятиях минерально-сырьевого комплекса. Установлено, что гибридное фильтрокомпенсирующее устройство на базе параллельного активного фильтра позволяет снизить уровень высших гармоник тока и напряжения более чем на 90 и 70 % соответственно, а на основе последовательного активного фильтра – снизить уровень высших гармоник напряжения более чем на 80 %. По результатам моделирования выявлена возможность компенсации реактивной мощности гибридной структуры на основе параллельного активного и пассивных фильтров. Обоснована возможность интеграции гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в более сложные многофункциональные электротехнические комплексы автоматизированного повышения качества электроэнергии, а также целесообразность и перспективность их использования в системах комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников распределенной генерации.

Ключевые слова: гибридные структуры; высшие гармоники; провалы напряжения; качество электроэнергии; нелинейная нагрузка; фильтрокомпенсирующие устройства; электромагнитная совместимость; гармонические искажения

Введение. Современные электротехнические комплексы промышленных предприятий минерально-сырьевого комплекса характеризуются интенсивным распространением нелинейной нагрузки в виде систем частотно-регулируемого электропривода технологических установок. Это негативно влияет на уровень качества электроэнергии в части несинусоидальности напряжения и тока [3]. Величины показателей качества электроэнергии определяют уровень эффективности и надежности работы сетей и систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса (МСК), а также отдельных видов электрооборудования.

Постановка проблемы. Проблема обеспечения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости электрооборудования является актуальной для предприятий МСК. Уровень качества электроэнергии оказывает непосредственное влияние на срок службы основного электрооборудования, устойчивость функционирования электроустановок, величину дополнительных потерь энергии в элементах систем электроснабжения, вибрации в электродвигателях. В частности, по результатам исследований [5, 7] установлено, что величина дополнительных потерь энергии в электрических машинах, обусловленных наличием высших гармоник тока и напряжения, могут достигать 25 % от уровня суммарных потерь. Также выявлено [8, 12], что при наличии гармонических искажений в сети, превышающих нормы ГОСТ 32144-2013, срок службы асинхронных двигателей может снизиться в 1,5-2 раза, конденсаторных установок компенсации реактивной мощности – в пять и более раз. Для погружных асинхронных электродвигателей технологических установок нефтедобычи при уровне снижения напряжения более чем на 70 % от номинальной величины критическая длительность провала напряжения по условию устойчивости составляет 0,15 с [4, 14].

Существующие технические решения. Для компенсации высших гармоник тока и напряжения используется ряд технических средств и решений, которые можно разделить на три класса: пассивные, активные и гибридные [1].

Пассивный класс устройств влияет на сопротивления участков сети или соотношение сопротивлений в какой-либо точке сети. Основными недостатками таких устройств являются ограниченность по спектру компенсируемых гармоник и невозможность адаптивной подстройки к изменениям гармонического спектра сети [11].

Активные устройства обладают свойством адаптивности, позволяют компенсировать полный спектр высших гармоник от 2 до 40 порядка и возможностью интеграции в системы автоматизированного повышения качества электроэнергии [15]. Однако существенным недостатком таких средств является дороговизна и невозможность их применения в сетях с конденсаторными установками коррекции коэффициента мощности из-за наличия резонансных явлений [2, 10].

Гибридные средства образуются из комбинации активных и пассивных устройств. Применение активных фильтров совместно с пассивными позволяет регулировать параметры последних. Также совместное применение с пассивными фильтрами в рамках гибридных систем позволяет снизить номинальные параметры активных фильтров [18, 26, 27]. Гибридные устройства классифицируются по следующим признакам: виду соединения активной и пассивной части между собой, а также способу подключения к компенсируемой сети. Также необходимо отметить, что гибридные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) повышают качество электроэнергии по нескольким показателям одновременно, т.е. обладают свойством многофункциональности. При этом подобные устройства способны компенсировать провалы и отклонения напряжения [16, 22].

Математические модели гибридных фильтрокомпенсирующих устройств. Основными топологиями гибридных ФКУ являются различные комбинации активных и пассивных фильтров. Наличие пассивной части позволяет снизить массо-габаритные показатели активной части за счет снижения номинальной мощности силовых элементов, которые являются наиболее дорогостоящими в составе ФКУ.

Исходя из показателей качества электроэнергии, за которыми нужен непрерывный контроль в условиях систем электроснабжения МСК, целесообразно рассматривать две основные структуры [9, 17, 25, 28]:

- гибридная на основе параллельного активного и пассивного фильтров для обеспечения компенсации высших гармонических составляющих (ВГС) по току со стороны нелинейной нагрузки и отклонений напряжения со стороны питающей сети (гибридное ФКУ № 1);
- гибридная на основе последовательного активного и пассивного фильтров для обеспечения компенсации ВГС и провалов по напряжению со стороны источника и высших гармоник тока со стороны нелинейной нагрузки (гибридное ФКУ № 2).

При математическом и компьютерном имитационном моделировании указанных ФКУ были приняты следующие основные допущения и ограничения:

- силовые элементы активных фильтров приняты идеальными ключами (нулевое сопротивление в открытом состоянии, бесконечно большое сопротивление в закрытом состоянии);
- состояние каждого силового ключа описывается функцией $K_{инв}$, принимающей значение 0, если ключ закрыт, и значение 1, если ключ открыт;
- на протяжении одного шага интегрирования все нелинейности рассматриваются как линейные зависимости [23].

Структура гибридного ФКУ № 1 представлена на рис.1, а.

Математическая модель гибридного ФКУ № 1 основана на следующих выражениях [9, 14, 25]:

$$\begin{aligned} u_c(t) &= \Delta u_c(t) + u_{пфа}(t) = \Delta u_c(t) + u_{пф}(t) = \Delta u_c(t) + u_{ин}(t); \\ u_{пфа}(t) &= u_{пф}(t) = u_{ин}(t); \\ i_c(t) &= i_{паф}(t) + i_{пф}(t) + i_{ин}(t); \\ u_{паф}(t) &= u_{Lф}(t) + u_{инв}(t); \\ u_{Lф}(t) &= L_{ф} \frac{di_{инв}(t)}{dt}; \\ u_{инв}(t) &= K_{инв}(t) u_{dc}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

Рис.1. Структуры гибридных ФКУ № 1 (а) и № 2 (б)

где $u_c(t)$ – мгновенное напряжение в сети; $\Delta u_c(t)$ – мгновенное падение напряжения линии от источника до места подключения гибридного ФКУ № 1 и $\Delta u_c(t) = i_c(t)Z_c$; $u_{пф}(t)$ – мгновенное значение напряжения на параллельном активном ФКУ; $u_{пф}(t)$ – мгновенное значение напряжения на пассивном ФКУ; $u_{нн}(t)$ – мгновенное значение напряжения на нелинейной нагрузке; $i_c(t)$ – мгновенное значение тока в сети; $i_{пф}(t)$ – мгновенное значение тока активного ФКУ; $i_{пф}(t)$ – мгновенное значение тока пассивного ФКУ; $i_{нн}(t)$ – мгновенное значение тока нелинейной нагрузки; $u_{инв}(t)$ – мгновенное значение напряжения на выходе инвертора активного фильтра; $u_{L\phi}(t)$ – мгновенное значение падения напряжения на индуктивности активного фильтра; L_ϕ – индуктивность на выходе активного ФКУ; $i_{инв}(t)$ – мгновенное значение тока инвертора активного ФКУ; $K_{инв}(t)$ – модулирующая функция, характеризующая степень включения и отключения IGBT-транзисторов; $u_{dc}(t)$ – напряжение на обкладках конденсатора активного ФКУ [10, 11].

Структура гибридного ФКУ № 2 представлена на рис.1, б.

Математическая модель гибридного ФКУ № 2 основана на следующих выражениях [8, 10, 11]:

$$u_c(t) = \Delta u_c(t) + u_k(t) + u_{пф}(t) = \Delta u_c(t) + u_k(t) + u_{нн}(t);$$

$$u_c(t) = i_c(t)Z_c + u_k(t) + u_{нн}(t);$$

$$i_c(t) = i_{пф}(t) + i_{нн}(t);$$

$$u_k(t) = K_{тр} u_{сф}(t); \quad (2)$$

$$u_{сф}(t) = u_{L\phi}(t) + u_{инв}(t);$$

$$u_{L\phi}(t) = L_\phi \frac{di_{инв}(t)}{dt};$$

$$u_{инв}(t) = K_{инв}(t) u_{dc}(t),$$

где $u_k(t)$ – мгновенное значение компенсационного высшего напряжения на трансформаторе; $K_{тр}$ – коэффициент трансформации; $u_{сф}(t)$ – мгновенное значение напряжения на обкладках конденсатора [21, 23].

Система управления активной частью (параллельный активный фильтр) гибридного ФКУ № 1 реализуется на основе фазовых преобразований и фазовой синхронизации опорных величин.

Система управления измеряет фазные напряжения сети (u_a, u_b, u_c) и преобразует их в двухфазную систему $\alpha\beta$ следующим образом:

$$u_\alpha = u_a - \frac{u_b + u_c}{2}; \quad (3)$$

$$u_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(u_b - u_c).$$

Фазовые преобразования позволяют определить угол φ между изображающим вектором искаженного напряжения сети и его проекцией на ось α . Характер изменения и величина угла φ содержит информацию об уровне искажения, присутствующих высших гармониках, фазовом сдвиге напряжения и тока компенсируемой сети. Исходные направляющие:

$$\begin{aligned}\cos\varphi &= u_{\alpha}/u_{sm}; \\ \sin\varphi &= u_{\beta}/u_{sm}; \\ u_{sm} &= \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}.\end{aligned}\tag{4}$$

Блок фазовой синхронизации корректирует угол φ до величины φ' , соответствующей синусоидальной форме кривой напряжения сети. Далее определяются опорные токи в системе координат $\alpha\beta$:

$$\begin{aligned}i_{3\alpha} &= i_3 \cos\varphi'; \\ i_{3\beta} &= i_3 \sin\varphi',\end{aligned}\tag{5}$$

где i_3 – сигнал задания по току. По аналогии с (3) осуществляется обратное фазовое преобразование:

$$\begin{aligned}i_{3a} &= i_{3\alpha}; \\ i_{3b} &= \frac{\sqrt{3} i_{3\beta} - i_{3\alpha}}{2}; \\ i_{3c} &= \frac{-\sqrt{3} i_{3\beta} - i_{3\alpha}}{2}.\end{aligned}\tag{6}$$

После этого из опорных синусоидальных токов, определенных по выражению (6), вычитаются токи нелинейной нагрузки (i_{na} , i_{nb} , i_{nc}):

$$\begin{aligned}i_{0a} &= i_{3a} - i_{na}; \\ i_{0b} &= i_{3b} - i_{nb}; \\ i_{0c} &= i_{3c} - i_{nc}.\end{aligned}\tag{7}$$

На основании полученных токов (i_{0a} , i_{0b} , i_{0c}) формируются импульсы управления силовыми ключами инвертора активного фильтра. Токи i_{0a} , i_{0b} , i_{0c} дают информацию о наличии высших гармоник тока, которые должен компенсировать параллельный активный фильтр в составе гибридного ФКУ № 1.

Имитационное моделирование структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств. С учетом выражений (1), (2) и на основе приведенных структур на рис.1, а и б разработаны компьютерные имитационные модели гибридных ФКУ № 1 и № 2 в программном пакете Simulink MATLAB с учетом параметров и характеристик существующих систем электроснабжения предприятий МСК. В данных виртуальных моделях реализованы системы управления активными частями ФКУ № 1 и № 2. Имитационная модель на примере ФКУ № 1 приведена на рис.2.

В качестве исходных данных при имитационном моделировании приняты параметры нефтепромысловой распределительной сети [20]. В качестве источника электроснабжения принята промысловая воздушная линия 6 кВ длиной 3 км с мощностью трехфазного короткого замыкания на уровне 250 МВА и скважинный трансформатор 6/0,4 кВ мощностью 100 кВА. Нелинейная нагрузка моделировалась посредством трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя (схема Ларионова) с активно-индуктивной нагрузкой мощностью 80 кВА. При моделировании активный фильтр настраивался на подавление высших гармоник тока со 2 по 40 номер включительно, так как согласно требованиям ГОСТ 32144-2013 при определении уровня искажений напряжения учитывается именно данный диапазон высших гармоник [13, 24]. Большинство серийных активных фильтров настраиваются на определенный диапазон высших гармоник, более дорогие модификации с более сложными алгоритмами работы можно настроить на подавление

Рис.2. Имитационная модель системы электроснабжения МСК с гибридным ФКУ № 1

отдельных гармоник [31]. На рис.2 показан блок определения коэффициента искажения на примере напряжения источника «Vabc_сети». Для остальных параметров используются аналогичные блоки, встроенные в блок «Интерфейс», где задаются основные параметры и режимы моделирования.

При разработке имитационной модели параметры питающей сети и подключенной нагрузки задавались в относительных единицах, где за базис принимались усредненные величины мощностей и сопротивлений элементов. При этом за базисные принимались величины мощности нагрузки в часы максимума. Моделирование осуществлялось на примере технологических установок нефтедобычи, где мощности погружных технологических электроустановок могут превышать несколько сотен кВт [6]. Также при моделировании уровень искажения тока нагрузки задавался в диапазоне от 9 до 30 %, а уровень искажения напряжения сети – от 2 до 15 %, что соответствует результатам экспериментальных исследований в сетях нефтедобычи [7].

По результатам моделирования были получены степени снижения коэффициентов, характеризующие наличие высших гармонических составляющих в сети до и после применения ФКУ: $\Delta THD_I - 91$, $\Delta THD_U - 72$, $\Delta K_{I5} - 96$, $\Delta K_{U5} - 75$, $\Delta K_{I7} - 97$, $\Delta K_{U7} - 68$ % (THD_I , THD_U – суммарные коэффициенты гармонических составляющих по току и напряжению соответственно; K_{I5} , K_{I7} , K_{U5} , K_{U7} – коэффициенты 5-й и 7-й гармонических составляющих по току и напряжению соответственно). Степень снижения на примере THD_U и THD_I определяется следующим образом:

$$\Delta THD_U = \frac{THD_{U1} - THD_{U2}}{THD_{U1}} \cdot 100 \% ; \quad (8)$$

$$\Delta THD_I = \frac{THD_{I1} - THD_{I2}}{THD_{I1}} \cdot 100 \% ,$$

где THD_{U1} , THD_{I1} – коэффициенты до применения ФКУ; THD_{U2} , THD_{I2} – коэффициенты после применения ФКУ.

Степени снижения для коэффициентов K_{I5} , K_{U5} , K_{I7} , K_{U7} определяются аналогичным образом:

$$\Delta K_{U5} = \frac{K'_{U5} - K''_{U5}}{K'_{U5}} \cdot 100 \% ; \quad (9)$$

$$\Delta K_{U7} = \frac{K'_{U7} - K''_{U7}}{K'_{U7}} \cdot 100 \% ;$$

Рис.3. Имитационная модель системы электроснабжения МСК с гибридным ФКУ № 2

$$\Delta K_{I5} = \frac{K'_{I5} - K''_{I5}}{K'_{I5}} \cdot 100 \%;$$

$$\Delta K_{I7} = \frac{K'_{I7} - K''_{I7}}{K'_{I7}} \cdot 100 \%,$$

где K'_{I5} , K'_{I7} – коэффициенты до применения ФКУ; K''_{I5} , K''_{I7} – коэффициенты после применения ФКУ.

Гибридное ФКУ №1 с активной частью параллельного типа позволяет осуществлять компенсацию ВГС тока в сети и компенсацию реактивной мощности для обеспечения коэффициента мощности k_m близкого к единице в условиях предприятий МСК. Энергетические показатели работ без ФКУ № 1 (с ФКУ № 1): $P = 0,292$ (0,293) о.е., $Q = 0,067$ (0,001) о.е., $k_m = 0,974$ (0,999).

Имитационная модель гибридного ФКУ № 2 представлена на рис.3.

Система управления последовательного активного фильтра в составе гибридного ФКУ № 2 реализована на основе преобразований трехфазной системы питающих напряжений в составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности (преобразования Фортескью) [30, 34]. Выделенные составляющие прямой последовательности напряжения сети являются опорными величинами при компенсации провалов, отклонений и искажения напряжения последовательным активным фильтром в составе гибридного ФКУ № 2.

В ходе имитационного моделирования регистрировались осциллограммы формы кривой напряжения в системе электроснабжения до и после подключения ФКУ № 2. Также по результатам моделирования были получены степени снижения уровня гармонических искажений по напряжению: $\Delta THD_U - 85$, $\Delta K_{U5} - 96$, $\Delta K_{U7} - 96$ %. Соответствующие степени снижения определялись аналогично ФКУ № 1 по выражениям (8) и (9).

Анализ результатов моделирования. По результатам моделирования выявлена способность гибридного ФКУ на базе параллельного активного фильтра осуществлять компенсацию высших

гармоник тока и напряжения одновременно с коррекцией коэффициента мощности сети. В частности, с применением гибридного ФКУ № 1 значение суммарного коэффициента гармонических составляющих снизилось на 93,16 % по току и на 72,14 % по напряжению, а также повысился коэффициент мощности на 12,35 %. Данная особенность позволяет рассматривать гибридные ФКУ № 1 как многофункциональные устройства и на их базе создавать более сложные электро-технические комплексы и системы для автоматизированного повышения качества электроэнергии [29, 35]. При этом установлено, что применение гибридного ФКУ № 1 повышает величину потребляемой активной мощности на 0,4 %, что связано с активными потерями в силовых ключах активной части ФКУ при компенсации высших гармоник.

По результатам моделирования установлено, что гибридное ФКУ № 2 с последовательной активной частью способно создавать добавку напряжения для нормализации уровня сетевого напряжения в случае его отклонения из-за подключения нагрузки в условиях протяженных линий электропередачи. При моделировании действующее значение напряжения в момент подключения нагрузки составляет 0,84 о.е. (за базис принято номинальное значение), что недопустимо согласно требованиям ГОСТ 32144-2013. При подключении гибридного ФКУ № 2 создается добавка напряжения (ΔU), действующее значение составляет 1 о.е.:

$$\delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{нагр.}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \% = \frac{1 - 0,84}{1} \cdot 100 \% = 16 \%. \quad (10)$$

Гибридное ФКУ № 2 на основе последовательного активного фильтра одновременно с компенсацией провалов напряжения способно подавлять высшие гармоники напряжения, что также подтверждает многофункциональность устройства. При этом уровень гармоник напряжения снижается на 85 %.

Также наличие активной части, несмотря на ее дороговизну, в виде параллельного или последовательного активного фильтра в составе гибридных структур существенно повышает эффективность подавления высших гармоник тока и напряжения. В частности, наличие параллельного активного фильтра в структуре гибридного ФКУ № 1 существенно повышает эффективность компенсации высших гармоник тока (THD_I без активной части снижается с 29,09 до 14,25 %, а с активной – до 2 %). Наличие последовательного активного фильтра в структуре гибридного ФКУ № 2 существенно повышает эффективность компенсации высших гармоник напряжения (THD_U без активной части снижается с 14,38 до 8,48 %, а с активной – до 2,14 %).

Обсуждение. Рассмотренные структуры гибридных ФКУ могут быть использованы в рамках единого электротехнического комплекса для автоматизированного повышения качества электроэнергии в сетях и системах электроснабжения различной структуры [19]. Гибридные ФКУ на основе последовательных и параллельных активных фильтров способны подавлять высшие гармоники тока и напряжения, корректировать коэффициент мощности, компенсировать отклонения напряжения в условиях МСК, где активная мощность отдельных технологических установок изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен кВт, уровень искажения напряжения – от 1 до 20 %, уровень искажения тока – от 4 до 60 %.

На базе подобных структур могут быть созданы более совершенные универсальные компенсаторы [32, 33] в рамках гибких систем передачи переменного тока для условий предприятий МСК. Рассмотренные гибридные структуры обладают переменной структурой, что позволяет использовать их в системах комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников, когда в случае аварийных режимов режим электроснабжения изменяется, а также при отключении части неответственной нелинейной нагрузки. Предметом дальнейших исследований является анализ влияния показателей режимов энергообеспечения и энергопотребления на уровень эффективности гибридных ФКУ.

Заключение. Выявлены основные типы гибридных ФКУ на основе параллельных и последовательных активных фильтров, применение которых позволяет повысить уровень качества электроэнергии в условиях систем электроснабжения предприятий МСК по ключевым показателям, включая величину высших гармоник напряжения и тока, а также отклонения напряжения. Гибридное ФКУ на основе параллельного активного фильтра способно компенсировать реактивную мощность узла нагрузки, приближая коэффициент мощности к единице.

Результаты моделирования показали достаточную, согласно требованиям ГОСТ 32144-2013, эффективность повышения качества электроэнергии разработанными гибридными ФКУ, в частности, гибридное ФКУ на основе последовательного активного фильтра на 15 % снижает уровень отклонения сетевого напряжения и в семь раз – степень его искажения. Гибридное ФКУ на базе параллельного активного фильтра способно приблизить коэффициент мощности сети к 1, снизить уровень искажений тока в десять раз, а искажений напряжения – в четыре раза. Совместное применение активных и пассивных фильтров повышает эффективность коррекции уровня высших гармоник тока и напряжения более чем в два раза.

Результаты моделирования доказали многофункциональность проанализированных гибридных ФКУ и возможность их использования в рамках более сложных электротехнических комплексов и систем автоматизированного повышения качества электроэнергии, в частности, в гибких системах передачи переменного тока (FACTS).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баланс энергии в электрических цепях / В.Е.Тонкаль, А.В.Новосельцев, С.П.Денисюк и др. Киев: Наукова думка, 1992. 312 с.
2. Гамазин С.И. Применение тиристорных компенсаторов в системах электроснабжения / С.И.Гамазин, А.И.Ненахов // Главный энергетик. 2014. № 4. С. 55-58.
3. Герман-Галкин С.Г. Исследование спектральных характеристик многоуровневых полупроводниковых преобразователей / С.Г.Герман-Галкин, Б.Ф.Дмитриев // Электротехника. 2014. № 3. С. 45-53.
4. Ершов М.С. Методика экспериментального определения параметров источников питания промышленных систем электроснабжения / М.С.Ершов, Р.Н.Конкин // Промышленная энергетика. 2017. № 2. С. 34-39.
5. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. 2019. № 3. С. 33-37.
6. Литвиненко В.С. Методика определения параметров режима бурения наклонно-прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями / В.С.Литвиненко, М.В.Двойников // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 105-112. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.105
7. Методы компенсации провалов и искажений напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий / Б.Н.Абрамович, Д.А.Устинов, Ю.А.Сычев, А.Я.Шклярский // Нефтяное хозяйство. 2014. № 8. С. 110-112.
8. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н.Портнягин, М.С.Ершов, П.Ю.Барбасов, М.Ю.Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 1. С. 61-66. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66
9. Пашкевич Н.В. Управление эколого-экономическим риском негативного воздействия отходов горно-металлургического производства / Н.В.Пашкевич, М.А.Пашкевич, Т.А.Петрова // Записки Горного института. 2005. Т. 166. С. 68-70.
10. Пронин М.В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / М.В.Пронин, А.Г.Воронцов. СПб: Ладога, 2017. 220 с.
11. Розанов Ю.К. Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя / Ю.К.Розанов, М.Г.Лепанов, М.Г.Киселев // Электротехника. 2014. № 8. С. 51-59.
12. Розанов Ю.К. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / Ю.К.Розанов, А.П.Бурман, Ю.Г.Шакарян. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 336 с.
13. Тетерин Н.В. Математическое описание микроволнового контактного уровнемера жидких сред / Н.В.Тетерин, О.М.Большунова // Записки Горного института. 2010. Т. 186. С. 151-158.
14. Хабибуллин М.М. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока / М.М.Хабибуллин, В.Н.Мещеряков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 7. С. 26-33.
15. Шакарян Ю.Г. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач / Ю.Г.Шакарян, В.К.Фокин, А.П.Лихачев // Электричество. 2013. № 12. С. 2-13.
16. Costabeber A. Distributed cooperative control of low-voltage residential microgrids / A. Costabeber, P. Tenti, P. Mattavelli // 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 25-28 June, 2012, Aalborg, Denmark, 2012. P. 457-463. DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254042
17. Development of fire safety measures aimed at preventing and responding to spontaneous combustion in brown coal mines / E.B.Gridina, S.V.Kovshov, T.I.Antonenko, A.K.Miroshnichenko // Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. № 6. P. 96-101. DOI: 10.33271/nvngu/2020-6/096
18. Device for limiting single phase ground fault of mining machines / R.S. Fediuk, N.Y. Stoyushko, Y.G. Yevdokimova et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 3. P. 032009. DOI:10.1088/1755-1315/87/3/032009
19. Gulkov Y.V. Research of grounding systems of electrical complexes in the conditions of permafrost soils / Y.V.Gulkov, A.V.Turysheva, A.V.Kopteva // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 28-31 January, 2019, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2019. P. 969-972. DOI: 0.1109/ElConRus.2019.8657119
20. Kovalchuk M.S. Ensuring the Reliable Operation of the Pumping Units by Efficient State Diagnosis / M.S.Kovalchuk, D.A.Poddubnyi // All-Russian research-to-practice conference «Ecology and safety in the technosphere: current problems and solutions» (EST 2018), 22-24 November, 2018, Yurga, Russia, 2019. Vol. 224. Iss. 1. P. 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012032

21. Litran S.P. Comparative Analysis of Compensation Strategies for Series APF Based on the Electric Power Dual Formulation // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 4-6 April, 2017, Cadiz, Spain, 2017. P. 199-204. DOI: [10.1109/CPE.2017.7915169](https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915169)
22. Litran S.P. Design Criteria of a Control Strategy for Hybrid Power Filters Based on Current and Voltage Detection / S.P.Litran, P.Salmeron // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2015. Vol. 25. Iss. 3. P. 419-432. DOI: [10.1002/etep.1850](https://doi.org/10.1002/etep.1850)
23. Litran S.P. Electromagnetic Compatibility Analysis of a Control Strategy for a Hybrid Active Filter / S.P.Litran, P.Salmeron // Electric Power Systems Research. 2017. Vol. 144. P. 81-88. DOI: [10.1016/j.epsr.2016.11.014](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.11.014)
24. Pai F. Design of a dynamic voltage restorer with cascade inverter / F.Pai, P.Tseng, J.Huang // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 21-23 October, 2016, Shanghai, China, 2016. P. 172-176. DOI: [10.1109/ICPRE.2016.7871195](https://doi.org/10.1109/ICPRE.2016.7871195)
25. Pashkevich M.A. Development of an operational environmental monitoring system for hazardous industrial facilities of Gazprom Dobycha Urengoy / M.A.Pashkevich, T.A.Petrova // Journal of Physics: Conference Series, 14-17 May, 2019, St. Petersburg, Russia, 2019. Vol. 1384. № 1. P. 012040.
26. Power supply distribution system for calorimeters at the LHC beyond the nominal luminosity // P.Tenti, G.Spiazzi, S.Buso et al. // Journal of Instrumentation. 2011. Vol. 6. P. 1-17. DOI: [10.1088/1748-0221/6/06/P06005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/06/P06005)
27. Revuelta P.S. Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality / P.S.Revuelta, S.P.Litran, J.P.Thomas. Amsterdam: Elsevier, 2016. 420 p.
28. Serzhan S.L. Substantiation of the Draghead Application as a Mining Unit in Conditions of Solid Minerals Deep-Sea Mining / S.L.Serzhan, I.S.Trufanova, D.V.Malevannyi // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272. Iss. 2. P. 1-6. DOI: [10.1088/1755-1315/272/2/022048](https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022048)
29. Skamyin A.N. Energy efficiency improving of reactive power compensation devices / A.N.Skamyin, M.S.Kovalchuk // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 29 January – 1 February, 2018, Moscow, Russia, 2018. P. 780-783. DOI: [10.1109/ElConRus.2018.8317207](https://doi.org/10.1109/ElConRus.2018.8317207)
30. Thomas J.P. Assessment on Apparent Power Indices with Hybrid Active Power Filters // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 4-6 April, 2017, Cadiz, Spain, 2017. P. 181-186. DOI: [10.1109/CPE.2017.7915166](https://doi.org/10.1109/CPE.2017.7915166)
31. Thomas J.P. Practical Evaluation of Unbalance and Harmonic Distortion in Power Conditioning // Electric Power Systems Research. 2016. Vol. 141. P. 487-499. DOI: [10.1016/j.epsr.2016.08.012](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.012)
32. Ustinov D.A. Increase of Dynamic Stability of Alternating Current Electric Drives at Short-Term Violations of Oilfield Power Supply // Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics), 13-15 November, 2018, Omsk, Russia, 2018. P. 1-5. DOI: [10.1109/Dynamics.2018.8601457](https://doi.org/10.1109/Dynamics.2018.8601457)
33. Valles A.P. A New Distributed Measurement Index for the Identification of Harmonic Distortion and/or Unbalance Sources Based on the IEEE Std. 1459 Framework / A.P.Valles, P.S.Revuelta // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 172. P. 96-104. DOI: [10.1016/j.epsr.2019.03.007](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.007)
34. Xu X. Novel current-tracking control for hybrid active power filter with injection circuit and its engineering application / Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 21-23 October, 2016, Shanghai, China, 2016. P. 269-274. DOI: [10.1109/ICPRE.2016.7871214](https://doi.org/10.1109/ICPRE.2016.7871214)
35. Zagrivnyi E.A. Studying the operating mode of the down-hole electrode heater for the production of high-viscosity oil / E.A.Zagrivnyi, V.I.Malarev, A.V.Kopteva // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 28-31 January, 2019, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2019. P. 1110-1113. DOI: [10.1109/ElConRus.2019.8656868](https://doi.org/10.1109/ElConRus.2019.8656868)

Авторы: Ю.А.Сычев, канд. техн. наук, доцент, sychev_yua@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0119-505X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Р.Ю.Зимин, аспирант, zimin_ryu@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0498-8904> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.01.2021.

Статья принята к публикации 01.02.2021.