

**ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ
ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ**

Сычев Юрий Анатольевич

*доктор технических наук,
профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ya_sychev@mail.ru*

Аладьин Максим Евгеньевич

*аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: m.aladyin@gmail.com*

Холодович Ульяна Александровна

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: s200311@stud.spmi.ru*

Сериков Владимир Александрович

*кандидат технических наук,
ассистент кафедры электроэнергетики и электромеханики,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: serikov.va@bk.ru*

Предмет исследования: показатели качества электроэнергии, несинусоидальные режимы в системах электроснабжения.

Цель исследования: оценка составляющих коэффициента мощности при несинусоидальных режимах для условий промышленных систем электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками.

Методы и объекты исследования: имитационное моделирование электрических систем в среде Matlab Simulink, анализ сложных несинусоидальных режимов.

Основные результаты исследования: разработана компьютерная имитационная модель промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, а также с наличием гармонических искажений со стороны питающей сети. Получены зависимости составляющих коэффициента мощности при несинусоидальных режимах от вариации сопротивления энергосистемы и длины питающей линии, соединяющей источник и узел нагрузки.

Ключевые слова: коэффициент мощности, несинусоидальный режим, высшие гармоники, нелинейная нагрузка, качество электроэнергии.

THE EVALUATION OF TOTAL POWER FACTOR COMPONENTS UNDER NON-SINUSOIDAL CONDITIONS OF INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS WITH LINEAR AND NONLINEAR LOAD

Yuri A. Sychev

*Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Electrical
Power Engineering and Electromechanics,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: ya_sychev@mail.ru*

Maxim E. Aladyin

*postgraduate student of the Department of Electrical
Power Engineering and Electromechanics,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: m.aladyin@gmail.com*

Ulyana A. Kholodovich

*St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: s200311@stud.spmi.ru*

Vladimir A. Serikov

*Candidate of Technical Sciences,
Assistant at the Department of Electrical
Power Engineering and Electromechanics,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: serikov.va@bk.ru*

Subject of research: power quality indicators, non-sinusoidal modes in power supply systems.

Purpose of research: assessment of power factor components under non-sinusoidal modes for the conditions of industrial power supply systems with linear and nonlinear loads.

Methods and objects of research: simulation modeling of electrical systems in the Matlab Simulink environment, analysis of complex non-sinusoidal modes.

Main results of research: a computer simulation model of an industrial power supply system with linear and nonlinear loads, as well as the presence of harmonic distortions from the supply network, has been developed. The dependences of the power factor components in non-sinusoidal modes on variations in the resistance of the power system and the length of the supply line connecting the source and the load node were obtained.

Keywords: factor, power, non-sinusoidal, mode, harmonics, non-linear, load.

Введение

Актуальность проблемы обеспечения качества электрической энергии обоснована и раскрыта во многих отечественных и зарубежных публикациях [1, 2]. Ненадлежащий уровень качества электроэнергии связан с возникновением несинусоидальных режимов, обусловленных наличием высших гармоник, как со стороны питающей сети, так и со стороны подключенной нагрузки. Это приводит к росту потерь в элементах энергосистем и электрооборудо-

вании, ложному срабатыванию систем релейной защиты, сокращению срока службы электроустановок. Основными показателями качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013 являются суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения [3], при этом аналогичные показатели по току не нормируются, в отличие от международной нормативной базы [2, 3].

При применении различных технических средств и решений, направленных на обеспечения качества электроэнергии, включая пассивные, активные и гибридные фильтрокомпенсирующие устройства, оценка эффективности их работы производится, как правило, по степени снижения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения. Однако эффективность активных и гибридных фильтров, являющихся многофункциональными устройствами повышения качества электроэнергии, должна оцениваться также по ряду дополнительных показателей, к числу которых относятся составляющие коэффициента мощности при несинусоидальных режимах. Помимо этого указанные устройства могут быть использованы для компенсации реактивной мощности, которая при несинусоидальных режимах создается как на частоте основной составляющей, так и на частоте высших гармоник. В последнем случае подобные составляющие в отечественной и зарубежной научно-технической литературе принято именовать неактивными составляющими полной мощности [2]. Кроме того, вариация составляющих коэффициента мощности может служить косвенным показателем эффективности работы фильтрокомпенсирующих устройств различной структуры и алгоритмов управления, а также причины и характера возникновения несинусоидального режима.

Результаты и обсуждение

Известно следующее выражение для определения составляющих коэффициента мощности λ при несинусоидальных режимах [4, 5]:

$$\lambda = \lambda_1 k_S (1 + k_h), \quad (1)$$

где: λ_1 – коэффициент мощности по первой гармонике ($\cos\varphi_1$), $k_S = S_1/S$ – коэффициент, отражающий степень завышения полной мощности S сетевого оборудования из-за потерь, обусловленных возникновением высших гармоник, относительно полной мощности основной составляющей S_1 ; k_h – коэффициент, отражающий наличие неактивных составляющих полной мощности из-за присутствия высших гармоник тока и напряжения.

При этом вариация коэффициента λ_1 отражает степень эффективности компенсации реактивной мощности по основной составляющей [6], коэффициента k_S – степень снижения потерь в элементах системы электроснабжения по результатам компенсации высших гармоник [7], коэффициента k_h – степень эффективности компенсации высших гармоник различными фильтрокомпенсирующими устройствами [8].

В рамках проведенного исследования рассматривались следующие пути формирования несинусоидальных режимов:

- подключение линейной и нелинейной нагрузок к питающей сети без искажений напряжения;
- подключение линейной и нелинейной нагрузок к питающей сети с искажениями напряжения;
- подключение нелинейной нагрузки к питающей сети без искажений напряжения;
- подключение линейной нагрузки к питающей сети с искажениями напряжения;
- подключение нелинейной нагрузки к питающей сети с искажениями напряжения.

Разработана компьютерная имитационная модель промышленной системы электроснабжения с нелинейной и линейной нагрузками в среде Simulink системы Matlab. Упрощенная структура указанной модели приведена на рисунке 1, детальная структура в среде Simulink системы Matlab представлена на рисунке 2.

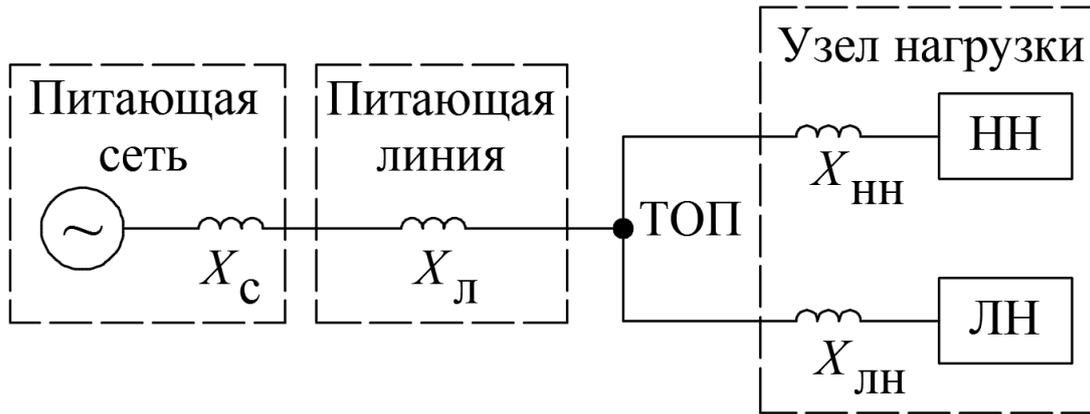


Рисунок 1 – Упрощенная структура имитационной модели промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками (ТОП – точка общего присоединения, НН – нелинейная нагрузка, ЛН – линейная нагрузка)

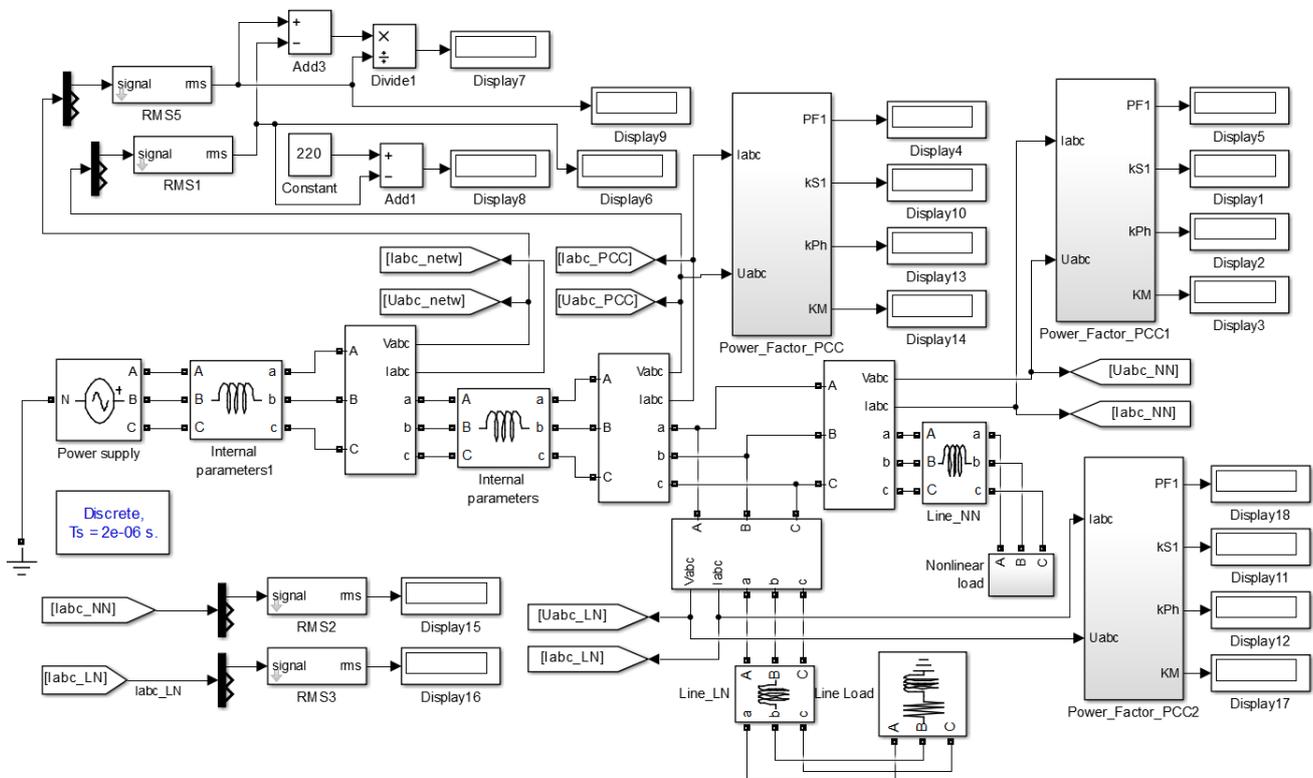


Рисунок 2 – Имитационная модель промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками

При имитационном моделировании упомянутых выше путей формирования несинусоидальных режимов были приняты следующие основные допущения и ограничения [9, 10]:

- питающая сеть представлена в виде источника напряжения с возможностью генерации высших гармоник с внутренним индуктивным сопротивлением X_c ;
- линейная нагрузка представлена в виде активно-индуктивного сопротивления;
- нелинейная нагрузка представлена в виде неуправляемого диодного выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой на стороне постоянного тока;
- питающая линия от источника до узла нагрузки представлена в виде индуктивного сопротивления X_l ;
- вариация внутреннего сопротивления питающей сети X_c производилась с учетом допустимого уровня отклонения напряжения на источнике и нагрузке (не более $\pm 10\%$ согласно требованиям ГОСТ 32144-2013);

- линейная и нелинейная части узла нагрузки приняты одинаковой мощности (токи линейной и нелинейной нагрузки одинаковы);
- линии, идущие от точки общего присоединения к линейной и нелинейной нагрузке, приняты одинаковой длины с учетом допустимой потери напряжения (не более 5 %);
- вариация внутреннего сопротивления питающей сети X_c осуществлялась в относительных единицах, при этом за базис принято сопротивление энергосистемы бесконечной мощности.

На рисунках 3-6 приведены графики зависимостей составляющих коэффициента мощности от вариации внутреннего сопротивления питающей сети X_c и длины питающей линии от источника до узла нагрузки, влияющей на уровень потерь напряжения в линии. Данные зависимости получены для наиболее распространенного несинусоидального режима, при котором присутствует линейная и нелинейная нагрузки, а также искажения со стороны питающей сети. Для остальных режимов – закономерности аналогичные.

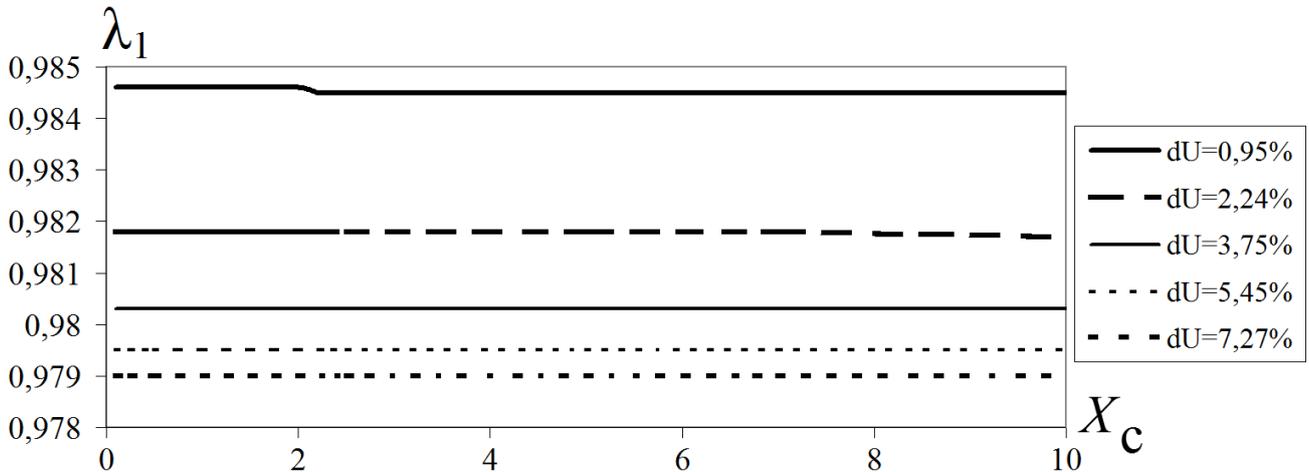


Рисунок 3 – Зависимости λ_1 от X_c при вариации X_l в соответствии с различными уровнями потерь напряжения dU

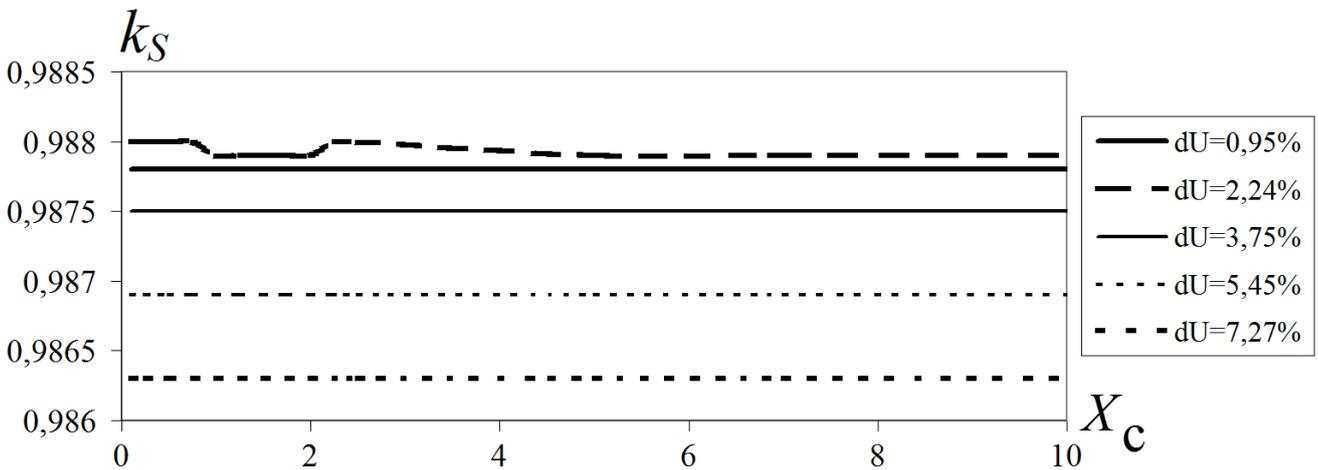


Рисунок 4 – Зависимости k_S от X_c при вариации X_l в соответствии с различными уровнями потерь напряжения dU

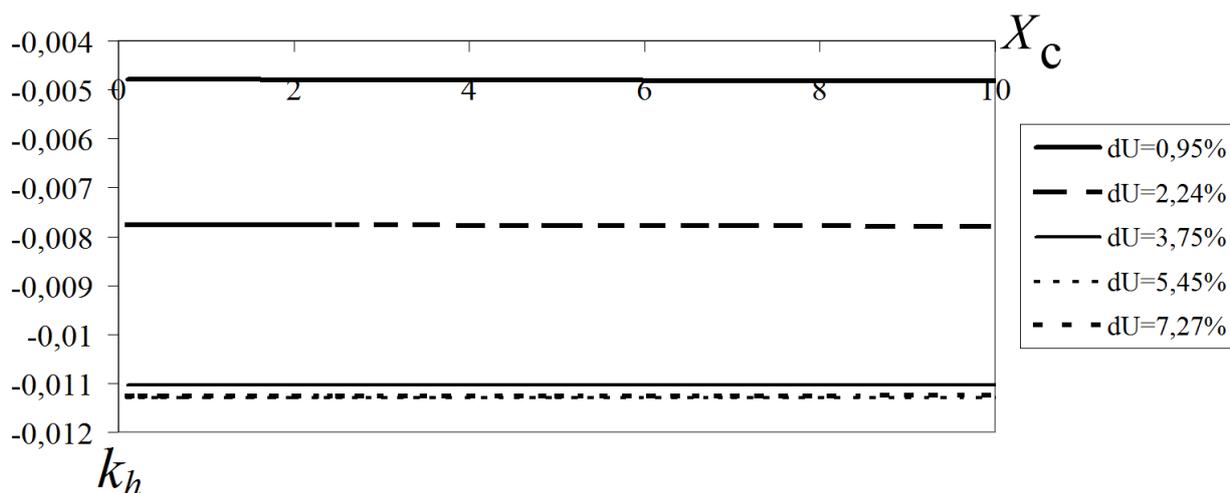


Рисунок 5 – Зависимости k_h от X_c при вариации X_l в соответствии с различными уровнями потерь напряжения dU

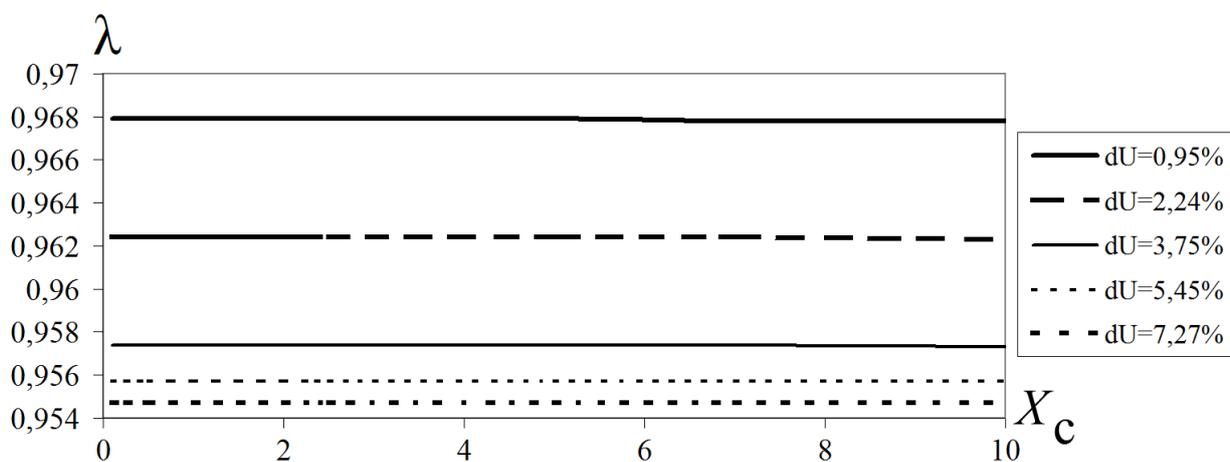


Рисунок 6 – Зависимости λ от X_c при вариации X_l в соответствии с различными уровнями потерь напряжения dU

По результатам имитационного моделирования выявлены следующие особенности и закономерности, характеризующие различные пути формирования несинусоидальных режимов:

- изменение длины питающей линии до узла нагрузки (уровень потерь напряжения) оказывает более существенное влияние на составляющие коэффициента мощности, нежели вариация внутреннего сопротивления питающей сети;
- во всех исследуемых режимах на зажимах узла нагрузки (в точке общего присоединения) коэффициент k_h принимает отрицательные значения, при этом на зажимах линейной и нелинейной нагрузки он может менять знак;
- в области малых значений потерь напряжения (длина питающей линии незначительна) при наличии линейной и нелинейной нагрузок, как при отсутствии, так и наличии искажений со стороны питающей сети коэффициент k_h принимает отрицательные значения на зажимах линейной нагрузки и положительные значения на зажимах нелинейной нагрузки;
- также в области малых значений потерь напряжения (длина питающей линии незначительна) при наличии искажений со стороны питающей сети и присутствии только линейной нагрузки коэффициент k_h принимает отрицательные значения, аналогичная ситуация справедлива и для другого режима, когда присутствует только нелинейная нагрузка, а искажения со стороны сети отсутствуют;

- положительные значения k_h приводят к увеличению суммарного коэффициента мощности согласно выражению (1), а отрицательные – к его снижению, однако практически во всех исследуемых режимах суммарный коэффициент мощности на зажимах нелинейной нагрузки меньше аналогичного значения на зажимах линейной нагрузки и в точке общего присоединения.

Заключение и выводы

Полученные закономерности и выявленные особенности необходимо учитывать при обосновании выбора того или иного технического средства или решения по компенсации высших гармоник, включая параллельные и последовательные активные фильтры, гибридные фильтрокомпенсирующие устройства, статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ), динамические компенсаторы искажения напряжения [11, 12].

Предметом дальнейших исследований является оценка влияния фильтрокомпенсирующих устройств различной структуры, в частности, параллельных и последовательных активных фильтров, а также гибридных фильтров на составляющие коэффициента мощности при несинусоидальных режимах [13, 14].

Исследования, приведенные в данной статье, выполнены в рамках реализации гранта МД 1536.2022.4 «Создание систем комбинированного электроснабжения для особо ответственных технологических и стратегических объектов».

Литература

1. Ляхомский, А. В. Анализ гармонического состава напряжения в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт / А. В. Ляхомский, Л. А. Плащанский, С. Н. Решетняк, М. Ю. Решетняк. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2021. – № 10. – С. 32–41.
2. Осипов, Д. С. Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования / Д. С. Осипов, А. Г. Лютаревич, В. А. Ткаченко, Ч. Ю. Логунова. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 38–47.
3. Бабокин, Г. И. Исследование качества электроэнергии очистного забоя угольной шахты / Г. И. Бабокин, Ю. В. Шевырëв, Н. Ю. Шевырева. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2021. – № 7. – С. 80–85.
4. Сычев, Ю. А. К вопросу о способе определения коэффициента мощности при несинусоидальных режимах / Ю. А. Сычев, М. С. Ковальчук, А. В. Кривенко, В. А. Сериков. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 473–482.
5. Sychev Y. A., Aladin M. E., Abramovich B. N. The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions. В сборнике: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. 2020. С. 904-908.
6. Осипов, Д. С. Идентификация резонансных режимов при наличии нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий / Д. С. Осипов, В. Н. Горюнов, Д. В. Коваленко. – Текст : непосредственный // В сб.: Ученые Омска – региону. Материалы IV Региональной научно-технической конференции. – 2019. – С. 42–47.
7. Ощепков, В. А. Расчет резонансных режимов систем электроснабжения и разработка мероприятий по фильтрации высших гармоник / В. А. Ощепков, Д. С. Осипов, Д. В. Коваленко, Б. Ю. Киселëв. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2018. – № 9. – С. 10–16.
8. Шевырев, Ю. В. Обоснование схемы активного фильтра гармоник на основе гибридного каскадного инвертора / Ю. В. Шевырев, До Тхань Лич. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 105–114.

9. Шевырева, Н. Ю. Актуальные аспекты обеспечения качества электроэнергии на открытых горных работах / Н. Ю. Шевырева, Ю. В. Шевырёв, А. В. Пичуев. – Текст : непосредственный // В сб.: Пром-Инжиниринг: труды VI Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск, 2020. – С. 246–251.

10. Гуляев, И. В. Результаты экспериментальных исследований системы активной фильтрации электроэнергии / И. В. Гуляев, Е. В. Бычков, Р. Б. Туганов. – Текст : непосредственный // Автоматизация и IT в энергетике. – 2023. – № 5 (166). – С. 6–14.

11. Дюдяков, А. А. Анализ эффективности работы гибридного фильтра в условиях ухудшенного качества электроэнергии питающей сети / А. А. Дюдяков, С. А. Янченко. – Текст : непосредственный // В сб.: Фёдоровские чтения – 2022. LI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, с элементами научной школы для молодежи. – 2022. – С. 167–175.

12. Дюдяков, А. А. Разработка экспериментального прототипа параллельного активного фильтра / А. А. Дюдяков, С. А. Янченко // В сб.: Фёдоровские чтения – 2021. LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. – 2021. – С. 231–239.

13. Байков, Д. В. Анализ способов обеспечения параллельной работы преобразователей частоты / Д. В. Байков, И. В. Гуляев, Д. Ю. Теплухов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 1. – С. 9–17.

14. Ляхомский, А. В. Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт / А. В. Ляхомский, Л. А. Плащанский, С. Н. Решетняк, М. Ю. Решетняк. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 7. – С. 207–213.