УДК 621.311
DOI: 10.53015/18159958_2025_21_3_40

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

MECHANISM FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROMETALLURGICAL PRODUCTION BASED ON FILTERING OF HIGHER HARMONIC COMPONENTS

©2025

Казмалы Андрей Сергеевич, аспирант кафедры электрооборудования
Зацепина Виолетта Иосифовна[1], доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования
Kazmaly Andrei Sergeevich, Postgraduate student of the Department of Electrical Equipment
Zatsepina Violetta Iosifovna[1], Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Equipment

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: sweeteest2020@gmail.com
E-mail: vizatsepina@yandex.ru [1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8347-4479

Аннотация: В статье представлены результаты исследования по совершенствованию системы компенсации высших гармоник в электрометаллургическом производстве. Рассмотрены актуальные проблемы качества электроэнергии, возникающие при работе мощного электроплавильного оборудования, доля которого может достигать 60 % от общей нагрузки металлургического предприятия.

Проведен анализ различных типов фильтрокомпенсирующих устройств — от традиционных пассивных до современных активных и гибридных систем. На основе моделирования в MATLAB Simulink системы ГПП-19 ПАО «НЛМК» с агрегатами печь-ковш 45 и 25 МВА доказана эффективность гибридной компенсации мощностью 45 МВАр, позволяющей снизить коэффициент нелинейных искажений тока с 49,57 % до 7,22 % и напряжения с 3,64 % до 1,28 %.

Выявлены особенности поведения высших гармоник в сложных промышленных сетях, в частности, повышенная устойчивость к компенсации 4-й и 11-й гармоник, формирующих 36 % остаточных искажений. Определены причины их возникновения — несимметрия дуговых процессов и резонансные явления на частоте 550 Гц.

Практическая значимость работы подтверждена результатами внедрения разработанных решений, способствующих повышению энергоэффективности производства и минимизации повреждений электрооборудования.

Ключевые слова: энергоэффективность, электрометаллургическое производство, высшие гармоники, фильтрокомпенсирующие устройства, качество электроэнергии, гибридная компенсация, коэффициент нелинейных искажений, агрегат печь-ковш, дуговые процессы, резонансные явления.

Для цитирования: Казмалы А.С Повышение энергоэффективности электрометаллургического производства на основе фильтрации высших гармонических составляющих / А.С Казмалы, В.И. Зацепина // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 3 (79). – С. 40–48. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_40.

Abstract: This article presents the results of a study on improving a harmonic compensation system in electrometallurgical production. It examines current power quality issues arising during the operation of high-power electric smelting equipment, which can account for up to 60 % of a metallurgical plant's total load.

An analysis of various types of filter-compensating devices, from traditional passive to modern active and hybrid systems, was conducted. Using MATLAB Simulink modeling of the NLMK PJSC GPP-19 system with 45 and 25 MVA ladle furnace units, the effectiveness of hybrid compensation with a capacity of 45 MVAr was demonstrated, reducing the current harmonic distortion coefficient from 49.57 % to 7.22 % and the voltage harmonic distortion coefficient from 3.64 % to 1.28 %.

The behavioral characteristics of higher harmonics in complex industrial networks were identified, specifically the increased resistance to compensation of the 4th and 11th harmonics, which account for 36 % of residual distortion. The causes of these harmonics were determined: asymmetry in arcing processes and resonance phenomena at a frequency of 550 Hz.

The practical significance of the work is confirmed by the results of implementing the developed solutions, which contribute to increased energy efficiency in production and minimize damage to electrical equipment.

Keywords: energy efficiency, electrometallurgical production, higher harmonics, filter-compensating devices, power quality, hybrid compensation, nonlinear distortion coefficient, ladle furnace unit, arc processes, resonance phenomena.

For citation: Kazmaly A.S. Improving the energy efficiency of electrometallurgical production based on filtering higher harmonic components / A.S. Kazmaly, V.I. Zatsepina // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 3 (79). – P. 40–48. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_40.

ВВЕДЕНИЕ

Современное металлургическое производство характеризуется высокой концентрацией энергоемкого оборудования, среди которого особое место занимают агрегаты печь-ковш (АПК). Эти технологические комплексы, обеспечивающие выплавку высококачественной стали, одновременно представляют серьезную проблему для систем электроснабжения предприятий. Доля электроплавильного оборудования в общей структуре энергопотребления металлургического завода может достигать 60 %, что делает вопросы эффективности его работы и минимизации негативного воздействия на электрическую сеть особенно актуальными [1].

Основная проблема заключается в природе работы дуговых установок, характеризующихся нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Электрическая дуга, используемая для плавления металла, представляет собой нестабильный плазменный разряд со случайно изменяющимися параметрами. Эта технологическая особенность обуславливает генерацию значительного количества ВГС, что приводит к существенному ухудшению качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий [2].

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Рассматривая физическую природу возникновения гармонических искажений, следует отметить, что процесс горения дуги в АПК характеризуется интенсивными колебаниями тока и напряжения, содержащими широкий спектр частот [3]. Как показывают исследования, в спектре гармоник дуговых печей традиционно преобладают нечетные гармоники, наиболее значимыми из которых являются 3-я, 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники. Однако проведенное математическое моделирование системы ГПП-19 ПАО «НЛМК» выявило ранее не учитывавшийся

аспект — в условиях совместной работы нескольких агрегатов печь-ковш наблюдается возникновение сложных интерференционных эффектов, приводящих к появлению устойчивых четных гармоник, в частности 4-й гармоники, что стало неожиданным результатом исследований.

Экспериментальные данные, полученные в ходе моделирования, позволили установить, что 4-я гармоника проявляет особую устойчивость к компенсации и формирует значительную долю остаточных искажений. Этот факт требует пересмотра традиционных подходов к проектированию систем компенсации, поскольку стандартные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) обычно ориентированы на подавление нечетных гармоник.

Гармонические искажения, создаваемые АПК, оказывают комплексное негативное воздействие на электрооборудование предприятия. Это проявляется в искажении формы синусоиды напряжения и тока, дополнительных потерях мощности в трансформаторах и кабельных линиях, снижении коэффициента мощности сети [4]. Особую проблему представляет возникновение резонансных явлений, наиболее выраженных на частоте 550 Гц, что приводит к усилению 11-й гармоники и существенно осложняет процесс компенсации.

Практические исследования подтверждают, что традиционные методы компенсации оказываются недостаточно эффективными для современных электрометаллургических комплексов. Выявленные в ходе моделирования 4-я и 11-я гармоники демонстрируют повышенную устойчивость к компенсации и формируют до 36 % остаточных искажений после применения стандартных ФКУ. Это обусловливает необходимость разработки специализированных алгоритмов управления и оптимизации параметров фильтрующего оборудования с учетом новых данных о поведении четных гармоник в условиях совместной работы множественных источников гармоник [5].

Для количественной оценки уровня гармонических искажений используется показатель коэффициента несинусоидальности (THD). Результаты внедрения гибридных систем компенсации мощностью 45 МВАр демонстрируют возможность достижения значительного улучшения показателей качества электроэнергии — снижения THD тока с 49,57 % до 7,22 % и напряжения с 3,64 % до 1,28 %. Однако эффективное подавление гармоник, включая вновь выявленную 4-ю гармонику, требует учета особенностей их взаимодействия в сложных сетях промышленных предприятий и применения современных гибридных ФКУ, сочетающих преимущества пассивных и активных систем фильтрации.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования применялся комплексный подход, сочетающий математическое моделирование и экспериментальную верификацию для анализа эффективности компенсирующих устройств в сетях сталеплавильного производства. Основное внимание было уделено исследованию современных силовых фильтров высших гармоник, включая пассивные ФКУ и активные силовые фильтры (АСФ). Пассивные ФКУ, основанные на RLC-элементах, сохраняют свою актуальность благодаря простоте конструкции и обслуживания, однако их эффективность ограничена узкой полосой подавления и невозможностью адаптации к изменяющимся характеристикам гармоник [6]. В отличие от них, активные силовые фильтры демонстрируют превосходящую производительность за счет способности динамической компенсации гармоник в широком частотном диапазоне и автоматической подстройки под изменяющиеся параметры сети [7].

Основным методом исследования выступило компьютерное моделирование в среде MATLAB Simulink с использованием библиотек SimPowerSystems для точного воспроизведения электротехнических процессов. Была разработана детализированная модель системы ГПП-19 ПАО «НЛМК», включающая трехфазный источник питания 110 кВ с регулируемой мощностью короткого замыкания в диапазоне 1500–5300 МВА и коэффициентом X/R=10. Особое внимание уделено моделированию кабельных линий 110 кВ и 35 кВ с распределенными параметрами, учитывающими активное сопротивле-

ние, индуктивность и ёмкость, что позволило точно воспроизвести ёмкостные токи величиной около 15 А. В состав модели вошли силовой трансформатор ТДЦНМ-160000/110/35 кВ мощностью 160 МВА, два печных трансформатора 35/0,4 кВ мощностью 45 МВА и 25 МВА, а также два параллельно работающих АПК. На рис. 1 показана модель системы ГПП-19.

Ключевым элементом исследования стала гибридная система компенсации, сочетающая преимущества пассивных и активных фильтров. Система включала пассивные LC-фильтры, настроенные на основные гармоники 3, 5 и 7-го порядков (150 Гц, 250 Гц и 350 Гц), и активный фильтр мощностью 45 МВАр с временем отклика 20 мс. Активный компонент системы использовал pq-теорию для мгновенного определения компенсирующих токов и динамической реакции на остаточные искажения. Методика проведения исследования предусматривала моделирование работы системы в течение 0,5 секунды с поэтапным анализом переходных процессов. В первые 0,1 секунды моделировалась работа системы без компенсации, что позволило зафиксировать исходный уровень гармонических искажений при одновременном зажигании дуг в обоих АПК. На рис. 2 и 3 изображены анализы гармоник тока и напряжения до компенсации. На отметке 0,1 секунды подключалась система компенсации, а в интервале 0,3–0,5 секунды анализировались установившиеся режимы работы. На рис. 4 и 5 изображены анализы гармоник тока и напряжения после компенсации. В табл. 1 представлена сравнительная таблица эффективности компенсации.

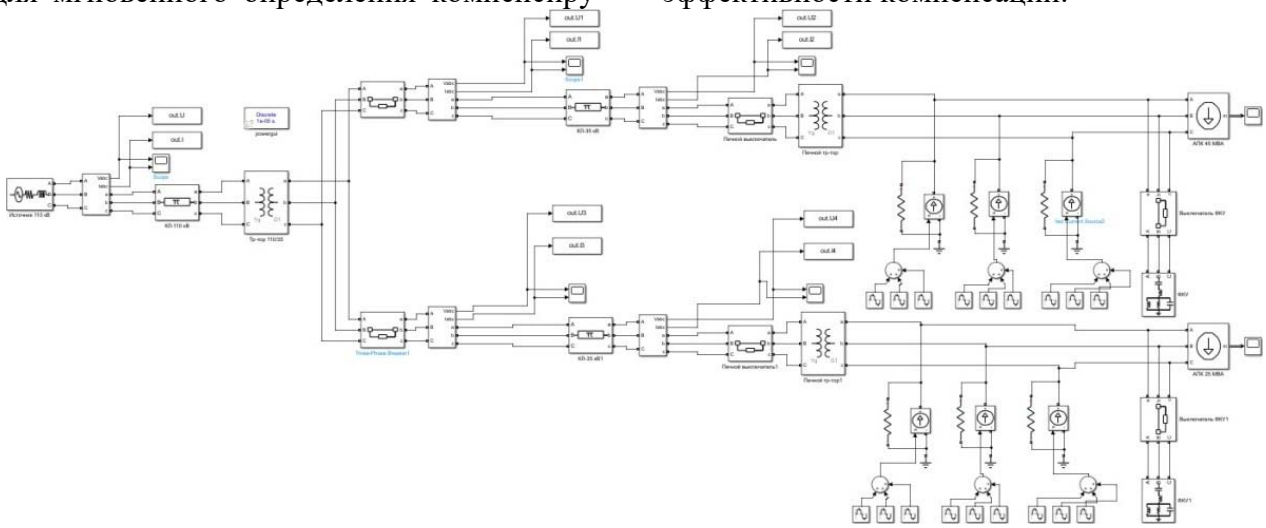

Рис. 1. Модель системы ГПП-19
Fig. 1. Model of the HPS-19 system

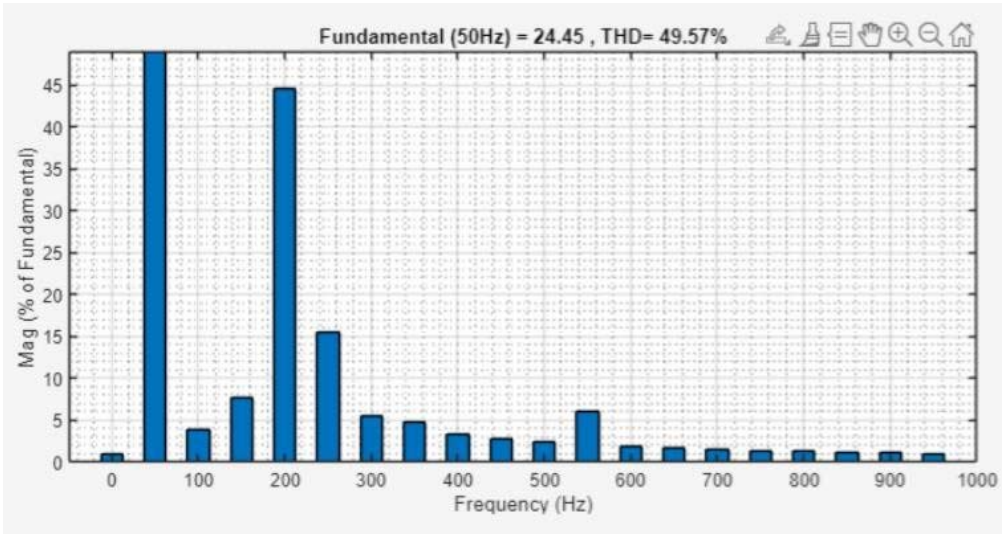

Рис.2. Анализ гармоник тока до компенсации
Fig. 2. Analysis of current harmonics before compensation

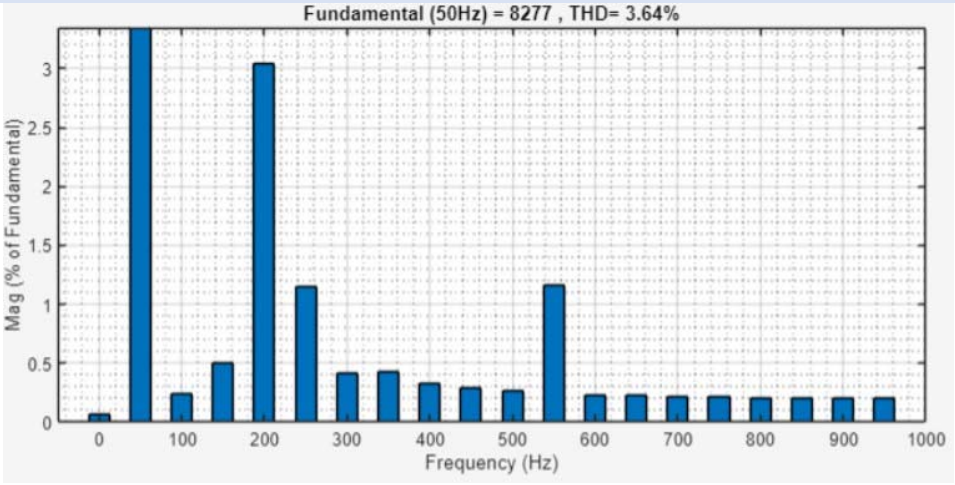

Рис.3. Анализ гармоник напряжения до компенсации
Fig. 3. Harmonic analysis of voltage before compensation

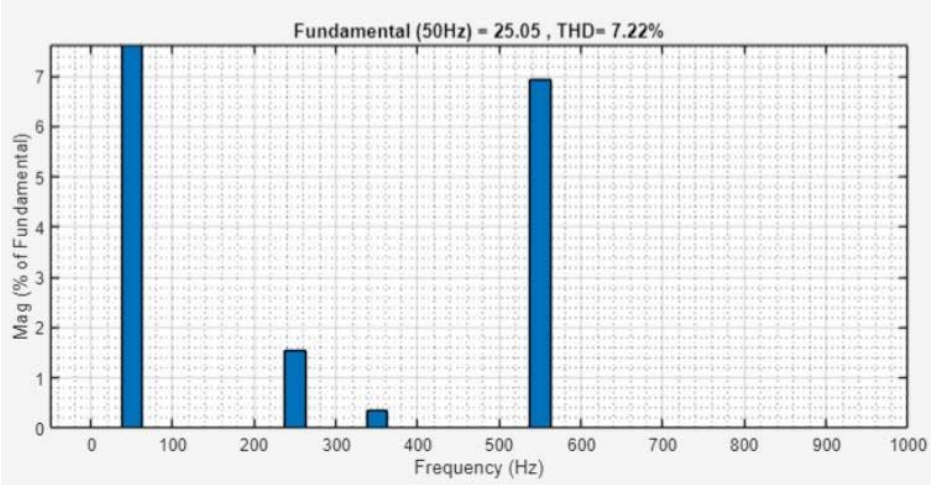

Рис.4. Анализ гармоник тока после компенсации
Fig. 4. Analysis of current harmonics after compensation

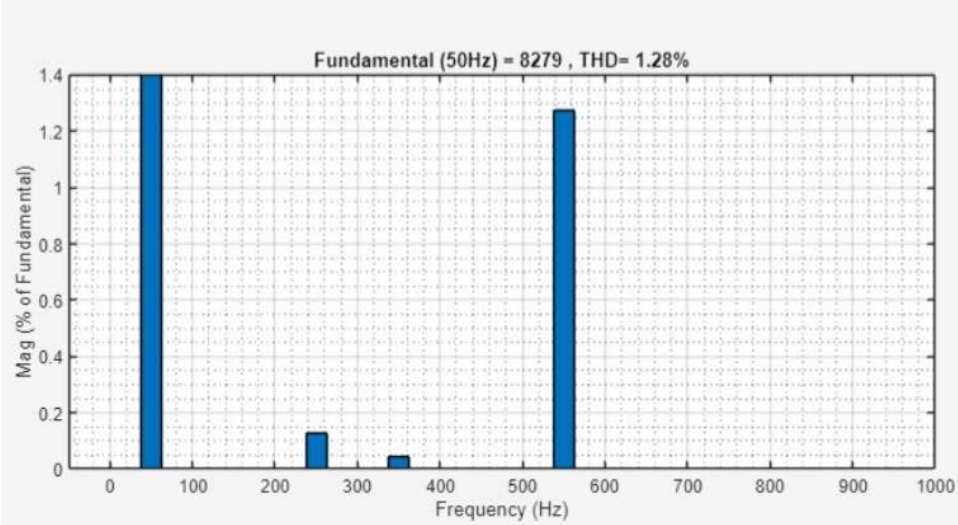

Рис.5. Анализ гармоник напряжения после компенсации
Fig. 5. Analysis of voltage harmonics after compensation

Таблица 1

Сравнительная таблица эффективности компенсации

Table 1

Comparative compensation efficiency table

Номер гармоники	Ток	Напряжение
3	2,3 раза	4,2 раза
4	1,8 раза	2,2 раза
5	2,3 раза	4,5 раза
7	2 раза	4 раза
11	2,1 раза	2,7 раза
Общий THD	6,9 раза	2,84 раза

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Система с двумя параллельно работающими агрегатами демонстрирует сложную картину гармонических искажений. Анализ исходных данных выявил существенную разницу между характеристиками тока и напряжения. Для тока наблюдается высокий уровень нелинейных искажений с THD 49,57 %, где доминируют гармонические составляющие: 3-я – 12 %, 4-я – 5,8 %, 5-я – 7 % и 7-я – 4 %. Напряжение характеризуется значительно меньшим THD 3,64 % с аналогичными, но менее выраженными гармоническими составляющими. Особого внимания заслуживают 4-я – 2,1 % и 11-я – 3,2 % гармоники тока, которые существенно влияют на качество электроэнергии.

После применения компенсации система показывает различную эффективность для разных параметров. Напряжение улучшает свои показатели до THD 1,28 % с хорошим подавлением всех гармоник: 3-я гармоника снижается до 0,6 %, 4-я до 0,45 %, 5-я до 0,4 %, 7-я до 0, 3%. Ток, хотя и улучшает общий THD до 7,22 %, сохраняет более высокие остаточные искажения, особенно по 4-й – 1,2 % и 11-й – 1,5 % гармоникам. При этом 4-я гармоника хуже поддается компенсации, чем нечетные гармоники, и дает 16 % вклада в остаточный THD тока.

4-я гармоника требует специального рассмотрения. Ее образование связано с несимметрией дуговых процессов в агрегатах, что приводит к появлению характерных искажений, особенно заметных при совместной работе оборудования. Эта гармоника активно взаимодействует с другими спектральными компонентами, образуя комбинационные составляющие, например, при смешении с 3-й гармоникой возникает дополнительная составляющая на 350 Гц, осложняющая общую картину искажений [8]. Особенно сильно проблема проявляется при наличии фазовых перекосов между агрегатами, когда уровень 4-й гармоники может возрастать до 12 %, существенно ухудшая качество электроэнергии.

11-я гармоника формирует 20 % от общего остаточного THD тока. Это явление объясняется несколькими взаимосвязанными факторами. Во-первых, стандартные компенсирующие устройства изначально оптимизированы под подавление низших гармоник (3-й, 5-й, 7-й), оставляя высшие гармоники без должного внимания. Во-вторых, при одновременной работе двух агрегатов возникает эффект наложения гармонических спектров, когда 11-я гармоника от одного агрегата взаимодействует с основными гармониками другого, создавая устойчивые комбинационные составляющие. При исходном THD 49,57 % ее вклад казался незначительным – 3,2 %, но после компенсации основных гармоник ее относительная доля резко возрастает. Это связано с нели-

нейным характером дуговых процессов, где подавление одних гармоник может неожиданно усиливать другие. Дополнительную сложность создает резонансное усиление на частоте 550 Гц в питающей сети, которое особенно проявляется при определенных режимах работы печей.

Для полноценного решения проблемы требуется пересмотр компенсации с учетом относительного вклада гармоник в остаточные искажения. Особое внимание следует уделить разработке специальных мер для 4-й и 11-й гармоник. Полученные результаты подчеркивают важность комплексного подхода к анализу качества электроэнергии в сложных промышленных системах с множественными нелинейными нагрузками.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают необходимость пересмотра традиционных подходов к компенсации гармоник. Выявленные особенности поведения 4-й и 11-й гармоник требуют разработки специализированных мер компенсации.

Эффективность гибридной системы компенсации мощностью 45 МВАр доказана значительным улучшением показателей качества электроэнергии. Однако остаточные искажения высших гармоник указывают на необходимость дальнейшей оптимизации параметров фильтрующего оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило разработать комплексную модель системы гибридной компенсации высших гармоник для электрометаллургического производства. На примере системы ГПП-19 ПАО «НЛМК» с агрегатами печь-ковш 45 и 25 МВА установлено, что совместная работа нескольких нелинейных нагрузок вызывает комплексные гармонические искажения, требующие специализированных подходов к компенсации.

Ключевым результатом работы стало выявление особенностей поведения высших гармоник в сложных промышленных сетях. Показано, что 4-я гармоника, обусловленная несимметрией дуговых процессов, и 11-я гармоника, усиливающаяся из-за резонансных явлений, демонстрируют повышенную устойчивость к традиционным методам компенсации и формируют значительную долю остаточных искажений.

Разработанная гибридная система компенсации мощностью 45 МВАр подтвердила свою эффективность, обеспечив снижение THD тока с 49,57 % до 7,22 % и THD напряжения с 3,64 % до 1,28 %. Особую практическую ценность имеют выявленные закономерности взаимодействия гармонических спектров от параллельно работающих электроплавильных агрегатов.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета специфических особенностей высших гармоник при проектировании компенсирующих устройств для современных электрометаллургических комплексов. Предложенные технические решения и методики анализа могут быть успешно применены для оптимизации параметров фильтрующего оборудования на других промышленных объектах со схожими характеристиками нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казмалы, А. С. Гармонические искажения в системе электроснабжения сталеплавильных производств // Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах, Тюмень, 21–24 мая 2024 года. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. С. 275-276.
2. Казмалы, А. С. Влияние высших гармонических составляющих на системы электроснабжения металлургических предприятий // Цифровая трансформация в энергетике : сборник трудов конференции, Тамбов, 19 декабря 2024 года. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2025. С. 123-125.
3. Губская Е.И., Колобов В.В., Карпов А.С., Ярошевич В.В. Компенсация влияния дуговых сталеплавильных печей на электрические сети // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей X Всероссийской (XLIII Региональной) научно-технической

конференции, Нижний Новгород, 19 декабря 2024 года. Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2024. С. 128-138.
4. Казмалы, А. С. Компенсация реаетивной мощности в сети электроснабжения 35 кв агрегатов печь-ковш конвертерных цехов ПАО "НЛМК" // Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации : материалы Международной научно-технической конференции, посвящённой 5-летию Института энергетики, Грозный, 14–16 мая 2024 года. Грозный : Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, 2024. С. 185-186.
5. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2016. Montreal. Canada. IEEE, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006. 1709471.
6. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages // Proceedings of Research and Education in Mechatronics (REM) 16th International Conference. Bochum. Germany. IEEE. 2015, pp. 301–308. doi:10.1109/REM.2015.7380411.
7. Записочный Е. Д., Кулага М.А. Мероприятия по улучшению качества электроэнергии в сети объекта с дуговыми сталеплавительными печами // Фёдоровские чтения — 2020: L Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва, 17–20 ноября 2020 года. Москва : Издательский дом МЭИ, 2020. С. 328-336.
8. Нос О.В., Востриков А.С., Штанг А.А., Малявко Е.Ю. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 12. С. 28-36. DOI 10.18799/24131830/2019/12/2389.

REFERENCES

1. Kazmaly, A. S. Harmonic Distortions in the Power Supply System of Steel Milling Plants // New Technologies for the Oil and Gas Region: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students, and Young Scientists. In 2 volumes, Tyumen, May 21–24, 2024. Tyumen : Tyumen Industrial University, 2024. Pp. 275-276.
2. Kazmaly, A. S. The Influence of Higher Harmonic Components on the Power Supply Systems of Metallurgical Enterprises // Digital Transformation in the Energy Sector: Proceedings of the Conference, Tambov, December 19, 2024. Tambov : Tambov State Technical University, 2025. Pp. 123-125.
3. Gubskaya E.I., Kolobov V.V., Karpov A.S., Yaroshevich V.V. Compensation for the Influence of Arc Steel Furnaces on Electrical Networks // Actual Problems of the Electric Power Industry: Collection of Scientific and Technical Articles of the 10th All-Russian (XLIII Regional) Scientific and Technical Conference, Nizhny Novgorod, December 19, 2024. Nizhny Novgorod : Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 2024. Pp. 128-138.
4. Kazmaly, A. S. Compensation of Reactive Power in the Power Supply Network of 35 kV Furnace-Bucket Converter Plants of NLMK PJSC // Automation, Power Engineering, and Mechanical Engineering: Technologies and Innovations : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 5th Anniversary of the Institute of Power Engineering, Grozny, May 14–16, 2024. Grozny: M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, 2024. Pp. 185-186.
5. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2016. Montreal. Canada. IEEE, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006. 1709471.
6. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmak-

ing Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages // Proceedings of Research and Education in Mechatronics (REM) 16th International Conference. Bochum. Germany. IEEE. 2015, pp. 301–308. doi:10.1109/REM.2015.7380411.

7. Zapisochny E. D., Kulaga M. A. Measures to Improve the Quality of Electric Power in a Network with Arc Furnaces // Fedorov Readings 2020: L International Scientific and Practical Conference with Elements of a Scientific School, Moscow, November 17–20, 2020. Moscow : MEI Publishing House, 2020. Pp. 328-336.
8. Nos O.V., Vostrikov A.S., Shtang A.A., Malyavko E.Yu. Increasing the energy efficiency of production by using power filters of higher harmonics // Izvestiya of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2019. Vol. 330, № 12. Pp. 28-36. DOI 10.18799/24131830/2019/12/2389.