

УДК [621.314.26+621.316.94+621.317.757]:621.311.1

Александр Аркадьевич Николаев

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Ильдар Галиевич Гилемов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

Михаил Викторович Буланов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Владимир Сергеевич Ивекеев

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: vivekeev@yandex.ru

Анализ эффективности способов обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов с активными выпрямителями в условиях реального производства¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. При эксплуатации электроприводов на базе преобразователя частоты с активным выпрямителем возможно существенное ухудшение качества напряжения во внутривзаводской сети в случае наложения высокочастотных гармоник тока электропривода на резонансную область частотной характеристики сети. В связи с активным внедрением в последние десятилетия таких электроприводов на металлургических заводах используются различные способы обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты с питающей сетью. Целью настоящего исследования является анализ эффективности способов обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов с активными выпрямителями в условиях реального производства.

Материалы и методы. Проверка эффективности различных способов улучшения показателей качества электроэнергии в распределительной системе электроснабжения предприятия осуществлена на разработанной комплексной имитационной модели системы электроснабжения и электроприводов прокатного стана, которая учитывает параметры основных элементов электротехнического комплекса, а также данные экспериментальных исследований, полученные с помощью анализаторов качества электроэнергии Fluke 435 и ELSPEC G4430.

Результаты. Рассмотрены два способа обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты с активным выпрямителем. Установлено, что применение усовершенствованных алгоритмов широтно-импульсной модуляции активного выпрямителя позволяет снизить величину суммарного коэффициента гармонических составляющих в точке общего присоединения K_U на 40,1 % (до 8,08 %), установка специализированного пассивного фильтра мощностью 9000 кВАр позволяет достичь значительно большего технического эффекта ($K_U = 0,42$ %).

Выводы. Полученные результаты показывают, что для рассматриваемого предприятия оптимальным вариантом обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии является применение специализированного пассивного фильтра. Однако данный вариант потребует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Адекватность имитационной модели подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, резонанс токов, специализированный пассивный фильтр

¹ Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-19-20069).
The project is supported by the Grant of the Russian Research Foundation (project no. 22-19-20069).

Alexander Arkadyevich Nikolaev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Il'dar Galievich Gilemov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

Mikhail Viktorovich Bulanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Vladimir Sergeevich Ivekееv

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: vivekeev@yandex.ru

Analysis of the effectiveness of methods for ensuring electromagnetic compatibility of electric drives with active rectifiers in real production conditions

Abstract

Background. A significant degradation of voltage quality of the in-plant network is possible during operation of electric drives based on a frequency converter with an active rectifier, due to the superposition of high-frequency harmonics of the electric drive current on the resonance region of the network frequency response. Due to the active introduction of such electric drives recently at metallurgical plants, various methods are implemented to ensure electromagnetic compatibility of the frequency converter and the power supply network. The purpose of this study is to analyze the efficiency of methods to ensure electromagnetic compatibility of electric drives and active rectifiers under industrial production.

Materials and methods. The effectiveness of various methods to improve the power quality in the power distribution system of the enterprise has been evaluated using the developed complex simulation model of the power supply system and electric drives of the hot strip mill. It considers the parameters of the main elements of the electrical complex, as well as the data of experimental studies obtained using the Fluke 435 and ELSPEC G4430 power quality analyzers.

Results. Two methods of ensuring electromagnetic compatibility of the frequency converters with active rectifiers are considered. The use of improved algorithms of the active rectifier PWM allows us to reduce the value of the total harmonics distortions at the point of common coupling THD_U by 40,1 % to 8,08 %. The installation of a specialized passive filter 9000 kVAr allows us to achieve a significantly greater technical effect ($THD_U = 0,42$ %).

Conclusions. The obtained results show that for the enterprise under consideration the optimal option for ensuring the required power quality is the use of specialized passive filter. However, this option will require significant capital and operating costs. The adequacy of the simulation model has been previously confirmed by experimental data and previous studies.

Key words: electromagnetic compatibility, frequency converter, active rectifier, pulse wide modulation, current resonance, specialized passive filter

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.067-074

Введение. Активное внедрение мощных частотно-регулируемых электроприводов на металлургических предприятиях в последние десятилетия выявило наличие существенных проблем с электромагнитной совместимостью (ЭМС) таких электроприводов с внутривоздушной питающей сетью [1–3]. Наложение высших гармонических составляющих токов, потребляемых преобразователями частоты (ПЧ), на резонансную область частотной характеристики питающей сети приводит к существенному

искажению напряжения на шинах точки общего присоединения. В результате этого возможны ухудшение режимов работы, аварийные отключения и выходы из строя чувствительных электроприемников.

Особенно остро проблема ЭМС ПЧ с питающей сетью проявляется при наличии в составе преобразователя активного выпрямителя (АВ). Применение АВ позволяет обеспечить возможность рекуперации электрической энергии в питающую сеть, работу с единичным коэффициентом мощности и

удаление или подавление ряда гармонических составляющих токов при использовании специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [4–6]. В силу наличия данных особенностей преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) вытесняют традиционные ПЧ с неуправляемыми выпрямителями в электроприводах значительной мощности с частыми динамическими режимами. Современные главные электроприводы прокатных станов выполняются на базе ПЧ-АВ.

Применение в АВ специальных алгоритмов ШИМ, например ШИМ с удалением выделенных гармоник, позволяет улучшить гармонический состав потребляемого ПЧ тока. Однако при пуско-наладочных работах инженеры компаний, производящих преобразовательную технику, как правило, не учитывают наличие резонансных явлений в питающей сети и производят настройку контроллеров ШИМ на обеспечение максимального технического эффекта в отношении снижения величины суммарного коэффициента гармонических составляющих K_U (или THD_U) в соответствии с действующими стандартами, т.е. до 40-й (50-й) гармоники². При этом происходит значительное усиление оставшихся в гармоническом спектре составляющих, попадающих в более высокочастотную область.

Расположение экстремума основного резонанса частотной характеристики относительно шин главной заводской подстанции зависит в основном от величин индуктивности сетевых понизительных трансформаторов и суммарной емкости кабельных линий, подключенных к данным шинам. В случае наличия реакторов в фидерах подстанции частотная характеристика приобретает более сложный характер – с наличием множества дополнительных резонансов с меньшей величиной экстремума [10].

В случае попадания даже относительно небольших гармонических составляющих токов ПЧ-АВ на такие участки частотной характеристики питающей сети величины падения напряжения на шинах секций заводской подстанции на данных частотах достигают существенных значений. Это приводит к искажению формы напряжения, что отражается на работе остальных электроприемников.

Для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью и исключения проблем с работой чувствительных потребителей электроэнергии в условия производства возможны следующие варианты:

- 1) применение и корректная настройка специальных алгоритмов ШИМ АВ для исключения или минимизации величин гармоник, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети;
- 2) применение специальных пассивных фильтров (СПФ) для коррекции частотной характеристики внутризаводской распределительной сети;
- 3) создание отдельной «грязной» секции для питания ПЧ-АВ;
- 4) изменение конфигурации системы внутризаводского электроснабжения – подключение кабельных линий к другим секциям для коррекции частотной характеристики питающей сети.

В условиях уже действующего производства целесообразно использовать в первую очередь варианты 1 и 2 из-за меньшей величины капитальных вложений. Варианты 3 и 4 необходимо использовать при проектировании новых предприятий.

Методы исследования. С описанной проблемой столкнулись на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция), где при эксплуатации ПЧ-АВ электроприводов стана горячей прокатки происходили многочисленные выходы из строя чувствительных электроприемников, отключения источников бесперебойного питания систем автоматизации. Коллектив авторов был привлечен к данным исследованиям для устранения проблем ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью.

На рис. 1 показана однолинейная схема электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки.

Первый этап работы включал в себя экспериментальные исследования качества электроэнергии. Для исключения аварийных ситуаций во внутризаводской сети 34,5 кВ питание секции D главной понизительной подстанции (ГПП) 51EDM, от которой получают питание ПЧ-АВ электроприводов стана, осуществляется от отдельного трансформатора 380/34,5 кВ.

² ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.; EN 50160-2011, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. – 2010; Std. IEEE-519-2022, 1992, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. – 2022.

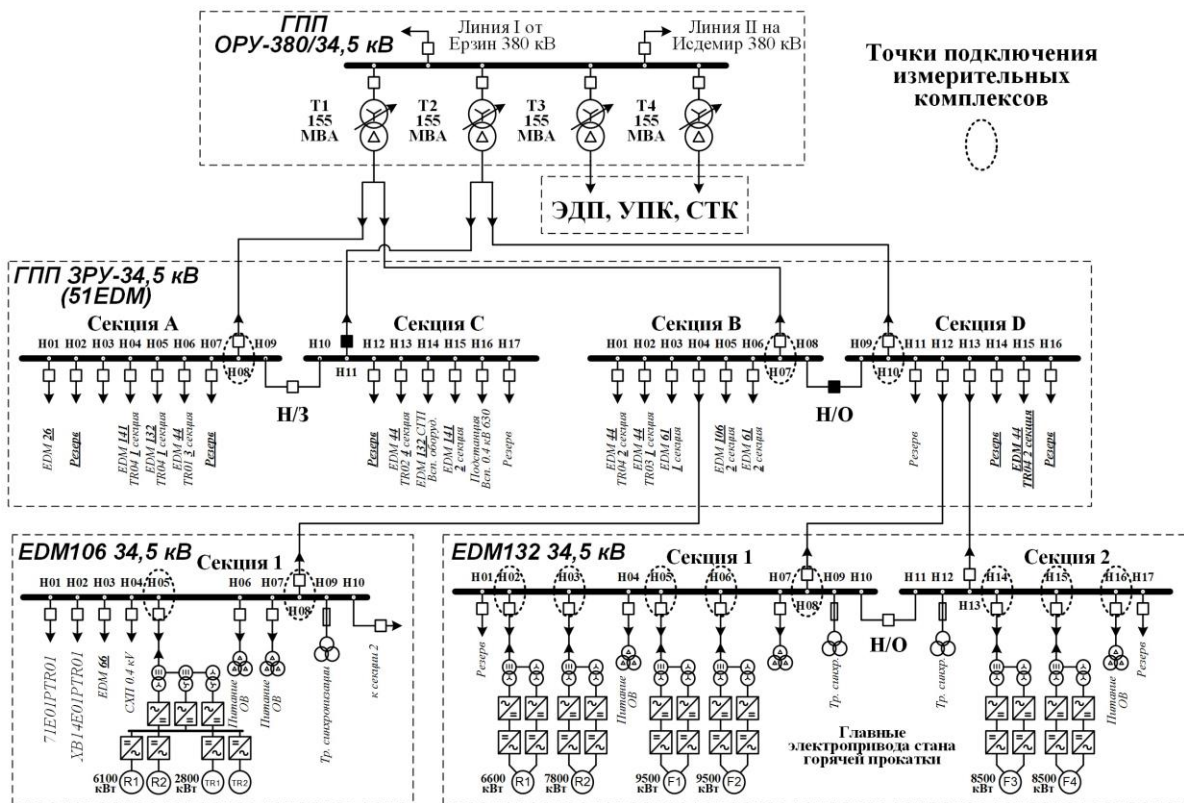


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки MMK Metalurji

Для экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии (ПКЭ) использовались следующие измерительные комплексы: 1) анализатор качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота дискретизации до 5 кГц); 2) анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4430 (частота дискретизации для каждого канала: напряжение – 1024 измерений/цикл 52 кГц, ток – 512 измерений/цикл 12 кГц); 3) сервер быстрых архивов IBA (с периодом дискретизации менее 10 мс).

Для формирования научно-обоснованных рекомендаций и проверки эффективности различных вариантов улучшения ПКЭ была разработана комплексная имитационная модель системы электроснабжения завода и электроприводов стана на базе ПЧ-АВ. При ее разработке учитывались параметры сетевых трансформаторов, главных электроприводов стана горячей прокатки, кабельных линий, значения токов короткого замыкания по линиям 380 кВ, а также экспериментальные данные. Проверка адекватности имитационной модели осуществлялась путем сравнения полученных на ней частотных характеристик с расчетными экспериментальными данными, а также путем сравнения значений K_U на

секциях заводской подстанции. Величина допустимых отклонений составила 5 %.

Результаты исследования. Одним из менее затратных способов обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью является применение усовершенствованных алгоритмов ШИМ. На рис. 2 показаны осциллограмма (а) и гармонический состав (в) напряжения на секции D заводской подстанции, а также частотная характеристика для данной точки системы электроснабжения, полученные при проведении экспериментальных исследований. Анализ частотной характеристики показывает, что область подъема импеданса расположена в значительном диапазоне частот ($f_{рез} = 2450–4850$ Гц).

Анализ токов ПЧ-АВ [11] показал, что в АВ применяется алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ), настроенный на отсутствие в гармоническом спектре потребляемого тока гармоник с номерами 11, 13, 23, 25. Из-за этого усиливаются гармонические составляющие с более высокими номерами 35, 37, 47, 49 и т.д. Их наложение на область подъема импеданса вызывает существенные искажения формы напряжения на шинах секции D (рис. 2, в), величина K_U при расчете до 200-й гармоники достигает 13,49 %.

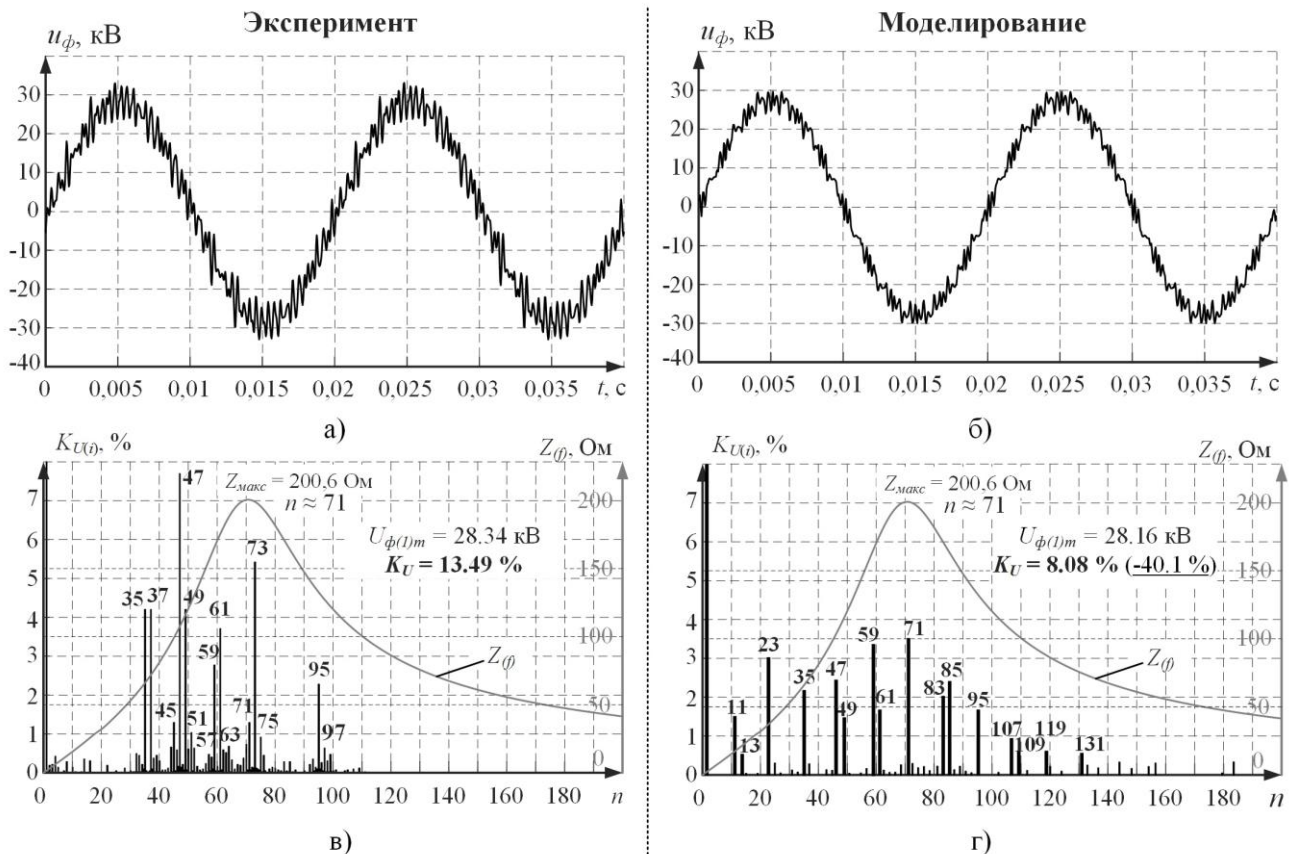


Рис. 2. Сравнительный анализ эффективности применения усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ в отношении ПКЭ в точке общего присоединения

В подобных случаях целесообразно применение ШИМ с подавлением выделенных гармоник (ШИМ с ПВГ) [5, 12, 13]. Данный алгоритм, в отличие от ШИМ с УВГ, позволяет воздействовать на величины большего числа гармонических составляющих токов ПЧ-АВ, что в условиях широкого резонанса позволяет достичь большего технического эффекта (рис. 2,б,г). Имитационное моделирование с применением в АВ ШИМ с ПВГ, настроенным на подавление гармоник в области подъема импеданса, позволило снизить величину K_U на 40,1 %. Проблемы с работой чувствительных электроприемников на предприятиях возникают при превышении величины K_U при расчете до 200-й гармоники значения в 5 % [10]. Поэтому данное решение в условиях рассматриваемого завода является недостаточным.

Другой способ обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с внутризаводской сетью среднего напряжения связан с применением специализированных пассивных фильтров (СПФ) [3,14], которые обеспечивают коррекцию частотной характеристики сети за счет сдвига основного резонанса тока в низкочастотный диапазон.

В качестве основы СПФ взят одночастотный фильтр с высокой добротностью (более 1000 о.е.), который отличается дешевизной и простотой в исполнении, в отличие от сложных широкополосных или двухчастотных традиционных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), а также активных ФКУ. Применение же более простых ФКУ в виде одночастотных фильтров, настроенных на фильтрацию определенной группы гармоник потребляемого ПЧ-АВ тока, как правило, не позволяет достичь требуемых ПКЭ в системе электроснабжения из-за генерации ПЧ-АВ высших гармоник в широком диапазоне.

В рамках настоящего исследования был проведен ряд имитационных моделирований работы электротехнического комплекса предприятия при установке СПФ мощностью от 1000 до 9000 кВАр на секции Д ГПП 51EDM (рис. 3). На рис. 4 показаны полученные осциллограммы напряжения и их гармонический состав при использовании СПФ мощностью 1000 кВАр (рис. 4,в,г), и 9000 кВАр (рис. 4, д,е).

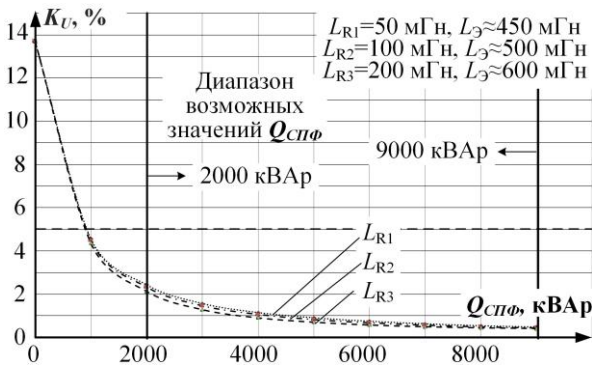


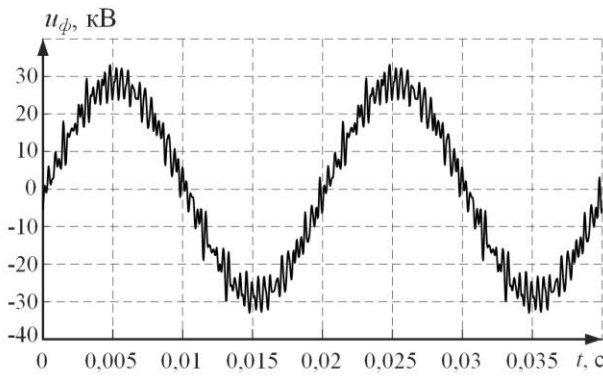
Рис. 3. Сравнение величины K_U на секции D ГПП в зависимости от мощности СПФ при разных индуктивностях реактора

Приемлемую величину K_U в точке общего присоединения обеспечивает установка

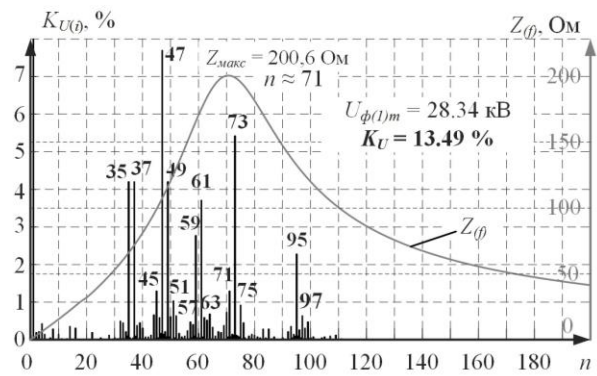
СПФ мощностью 1000 кВАр (4,16 %); наилучший технический эффект достигается при мощности СПФ 9000 кВАр ($K_U = 0,42$ %).

Можно заметить, что увеличение мощности СПФ приводит не только к смещению экстремума резонанса в более низкочастотную область, но и к уменьшению его амплитуды.

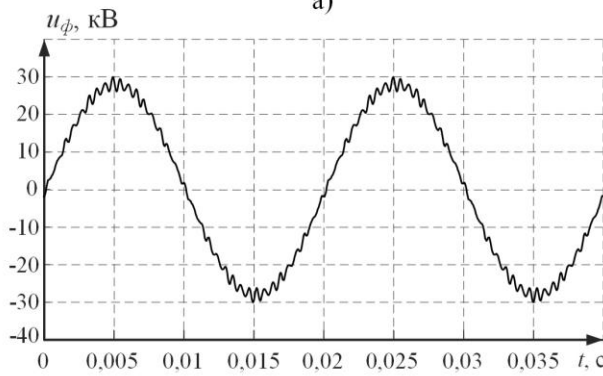
В СПФ предусматривается использование конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком в целях обеспечения возможности продолжительной работы при повышенных величинах суммарного коэффициента гармонических составляющих тока фильтра K_I (вплоть до 45 %).



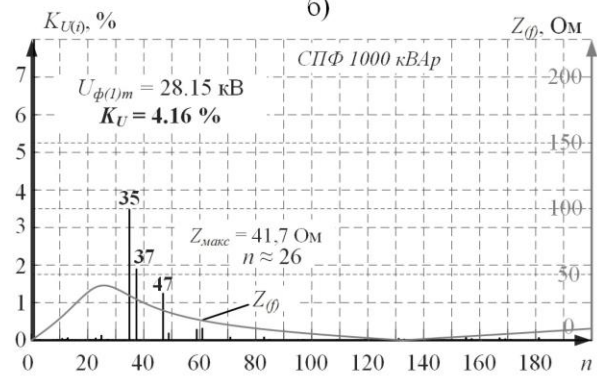
а)



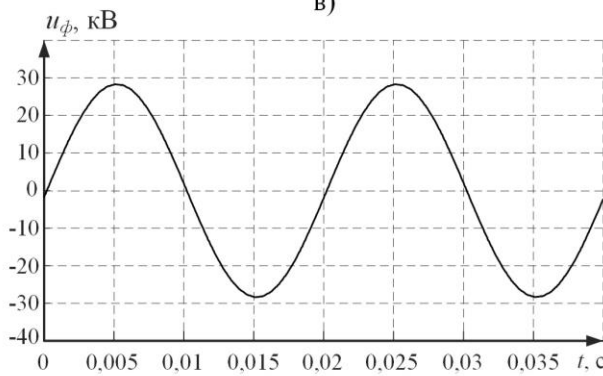
б)



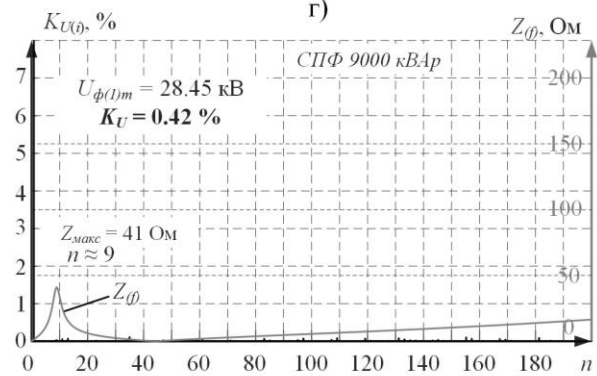
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Сравнительный анализ эффективности применения СПФ на секции D 51EDM мощностью 1000 кВАр (в, г), мощностью 9000 кВАр (д, е) в отношении ПКЭ по сравнению с экспериментальными данными (а, б)

Превышение данной величины может привести к токовой перегрузке конденсаторов фильтра. Это условие выполнялось только при применении СПФ мощностью выше 5000 кВАр и индуктивностях реактора 50, 100, 200 мГн для режимов работы электроприводов стана как при холостом ходе, так и при работе под нагрузкой.

Проведенные исследования показали, что наиболее предпочтительным вариантом является установка СПФ мощностью 9000 кВАр и индуктивностью реактора 200 мГн или двух СПФ мощностью 4500 кВАр и индуктивностью реактора 400 мГн.

Следует отметить, что предложенный способ обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с внутриводской сетью отличается от первого рассмотренного выше способа значительными капитальными затратами. Стоимость каждого 1 МВАр СПФ составляет около 4 млн рублей.

Выводы. Рассмотренные способы улучшения ПКЭ на шинах точки общего присоединения позволяют сделать следующие выводы.

1. Первый способ – применение усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ – обеспечивает снижение величины K_U на 40,1 % (с 13,49 % до 8,08 %). Однако технический эффект является недостаточным для нормализации работы чувствительных электроприемников.

2. Второй способ – коррекция частотной характеристики питающей сети за счет установки СПФ – в условиях ЗАО «ММК Metalurji» является наиболее оптимальным вариантом при применении СПФ мощностью 9000 кВАр и индуктивностью реактора 200 мГн. Значение K_U в точке общего присоединения в данном случае составляет 0,42 %, что позволяет гарантировать нормальную работу всех заводских потребителей электроэнергии.

3. В случае, когда частотная характеристика сети имеет резонансную область с меньшим частотным диапазоном (шириной резонанса), наиболее эффективным вариантом решения проблемы ЭМС ПЧ-АВ может стать использование усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ, что будет являться мероприятием без капитальных затрат [10].

Список литературы

1. **Retrofit** of a Hot Rolling Mill Plant with Three-Level Active Front End Drives / G.A. Orcajo, J.R. Diez, J.M.C. Rodriguez, et al. // *IEEE Transactions on Industry*

Applications. – May-June 2018. – Vol. 54, no. 3. – P. 2964–2974. DOI: 10.1109/TIA.2018.2808159.

2. **Маклаков А.С.** Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

3. **Resonances** in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / J. Pontt, G. Alzamora, R. Huerta, N. Becker // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2005. – P. 482–488.

4. **O'Brien K., Teichmann R., Bernet S.** Active rectifier for medium voltage drive systems // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. – 2001. – P. 557–562.

5. **Franquelo L.G., Nápoles J.** A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – December 2007. – Vol. 54, no. 6.

6. **Jing T., Maklakov A., Radionov A.** Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10 kV Grid with Three-Level NPC Inverter // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – Magnitogorsk, 2019. – P. 75–79. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915413.

7. **Обеспечение** электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов и др. // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 65–74.

8. **Экспериментальные** исследования качества электроэнергии в сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, С.А. Линьков, М.С. Светлаков // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2022. – № 3(56). – С. 44–53. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53.

9. **Moeini A., Zhao H., Wang S.** A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers // *IEEE Trans. Ind. Electronics*. – 2018. – Vol. 65. – P. 727–737.

10. **Optimal** selective harmonic control for power harmonics mitigation / K. Zhou, Y. Yang, F. Blaabjerg, D. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2015. – Vol. 62, no. 2. – P. 1220–1230.

11. **Повышение** качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станов с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров / А.А. Николаев, М.Ю. Афанасьев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов // *Вестник ИГЭУ*. – 2023. – Вып. 1. – С. 41–52. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052.

References

1. Orcajo, G.A., Diez, J.R., Rodriguez, J.M.C., Norniella, J.G. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant with Three-Level Active Front End Drives. *IEEE Transactions*

on Industry Applications, 2018 May–June, vol. 54, no. 3, pp. 2964–2974. DOI: 10.1109/TIA.2018.2808159.

2. Maklakov, A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tolstolistovogo stana 5000 [Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 3, pp. 16–25.

3. Pontt, J., Alzamora, G., Huerta, R., Becker, N. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, April 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.

4. O'Brien, K., Teichmann, R., Bernet, S. Active rectifier for medium voltage drive systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE*, 2001, pp. 557–562.

5. Franquelo, L.G., Nápoles, J. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007 December, vol. 54, no. 6.

6. Jing, T., Maklakov, A., Radionov, A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10 kV Grid with Three-Level NPC Inverter. *2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. Magnitogorsk, Russia, 2019, pp. 75–79. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915413.

7. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V., Afanas'ev, M.Yu., Shakhbieva, K.A., Laptova, V.A. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti moshchnykh elektroprivodov chetyrekhklet'evogo stana PPP KhP CherMK PAO «Severstal» s pitay-

ushchey set'yu 10 kV [Protection of the electromagnetic coating of electric drives of the four-stand mill PPP KHP CherMK PJSC “Severstal” with a 10 kV supply network]. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 65–74.

8. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Lin'kov, S.A., Svetlakov, M.S. Eksperimental'nye issledovaniya kachestva elektroenergii v seti 34,5 kV metallurgicheskogo zavoda ZAO «MMK Metalurji» [Experimental Studies of Power Quality in the 34,5 kV Network at MMK “Metalurji”]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2022, no. 3(56), pp. 44–53. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53.

9. Moeini, A., Zhao, H., Wang, S. A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers. *IEEE Trans. Ind. Electronics*, 2018, vol. 65, pp. 727–737.

10. Zhou, K., Yang, Y., Blaabjerg, F., Wang, D. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 1220–1230.

11. Nikolaev, A.A., Afanas'ev, M.Yu., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V. Povyshenie kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya prokatnykh stanov s ispol'zovaniem preobrazovateley chastoty s aktivnymi vypryamitelyami za schet primeneniya spetsializirovannykh passivnykh fil'trov [Improvement of power quality in power supply systems of rolling mills using frequency converters with active rectifiers due to use of specialized passive filters]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 41–52. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052.