

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

**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: bulanov.m.v@gmail.com

**Александр Сергеевич Маклаков**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-инновационного сектора, Россия, Магнитогорск, e-mail: alexandr.maklakov.ru@ieee.org

**Ильдар Галиевич Гилемов**

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

## **Разработка и исследование усовершенствованных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей с целью улучшения качества электроэнергии во внутризаводских электрических сетях 6–35 кВ<sup>1</sup>**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** В настоящее время для мощных регулируемых электроприводов переменного тока с частыми динамическими режимами стандартным решением стало применение преобразователей частоты с активными выпрямителями. К достоинствам данных преобразователей относят возможность рекуперации энергии торможения в питающую сеть, а также, как заявлено производителями преобразовательной техники, лучшую электромагнитную совместимость с питающей сетью. Данное утверждение верно лишь отчасти, поскольку производителями преобразователей частоты с активными выпрямителями не учитываются возможные резонансные явления во внутризаводской распределительной сети 6–35 кВ, вызванные взаимодействием реактивных элементов системы электроснабжения. При наложении на резонансную область значимых гармоник тока преобразователей частоты с активными выпрямителями могут возникнуть опасные искажения напряжения 6–35 кВ. Традиционные способы обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты с активными выпрямителями в этом случае могут не иметь должного эффекта. В связи с этим актуальным является разработка альтернативных технических решений, позволяющих обеспечить приемлемый уровень электромагнитной совместимости преобразователей частоты с активными выпрямителями. Одним из таких решений является применение в преобразователях частоты с активными выпрямителями усовершенствованных алгоритмов ШИМ, адаптирующихся к резонансным явлениям во внутризаводской сети 6–35 кВ.

**Методы и материалы.** Материалами для исследования послужили осциллограммы токов и напряжений на входе преобразователей частоты с активными выпрямителями, полученные экспериментально и с помощью математического моделирования. Экспериментальные данные получены на действующем оборудовании с преобразователями частоты с активными выпрямителями и на специальной лабораторной установке. При разработке усовершенствованных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей использован известный математический аппарат, описывающий зависимость отдельных гармоник от числа переключений и углов коммутации.

**Результаты.** Получены результаты, показывающие эффективность усовершенствованных алгоритмов ШИМ в плане снижения влияния преобразователей частоты с активными выпрямителями на питающую сеть и улучшения качества электроэнергии во внутризаводских сетях 6–35 кВ. Результаты исследования внедрены на ряде металлургических предприятий, благодаря чему удалось добиться снижения искажений напряжения 6–35 кВ и повысить устойчивость работы чувствительных электроприемников.

**Выводы.** Разработанные усовершенствованные алгоритмы ШИМ преобразователей частоты с активными выпрямителями позволяют значительно улучшить качество электроэнергии во внутризаводских электрических сетях 6–35 кВ без дополнительных капитальных затрат и установки дополнительного оборудования. На основании полученных результатов рекомендовано использование разработанных алгоритмов ШИМ на действующем оборудовании с преобразователями частоты с активными выпрямителями промышленных предприятий.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, резонанс токов, высшие гармоники

<sup>1</sup> 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

**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

**Alexander Sergeevich Maklakov**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Senior Researcher of R&D, Russia, Magnitogorsk, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

**Ildar Galievich Gilemov**

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

## Development and study of improved PWM algorithms of active rectifiers to achieve power quality in intra-factory electrical networks 6–35 kV

**Abstract**

**Background.** Currently, application of frequency converters with active front end rectifiers (FC-AFE) has become a standard solution for powerful adjustable AC drives with frequent dynamic modes. The advantages of these converters include the possibility of recuperation of braking energy to the supply network, as well as the best electromagnetic compatibility of electromagnetic capability (EMC) with the supply network as stated by the manufacturers of converter technology. This statement is only partly true, since FC-AFE manufacturers do not consider possible resonant phenomena in the 6–35 kV intra-factory distribution network caused by the interaction of reactive elements of the power supply system. When significant harmonics of the FC-AFE current are superimposed on the resonant region, dangerous voltage distortions of 6–35 kV may occur. Traditional methods of providing electromagnetic capability of FC-AFE in this case may not have the desired effect. Therefore, it is relevant to develop alternative technical solutions to ensure an acceptable level of electromagnetic capability of FC-AFE. One such solution is the use of advanced PWM algorithms in the FC-AFE adapting to resonant phenomena in the 6–35 kV intra-factory network.

**Materials and methods.** The materials for the study are the oscillograms of the currents and voltages at the input of the FC-AFE obtained experimentally and using mathematical modeling. Experimental data have been obtained on operating equipment with FC-AFE and on a special laboratory setup. When developing improved PWM algorithm of AFE, a well-known mathematical apparatus is used. It describes the dependence of individual harmonics on the number of switching and switching angles.

**Results.** The results obtained show the effectiveness of improved PWM algorithms in terms of reducing the effect of FC-AFE on the supply network and improving the quality of electricity in intra-factory networks of 6–35 kV. The results of the study are implemented at a number of metallurgical enterprises, thanks to which it is possible to reduce voltage distortions of 6–35 kV and increase the stability of the operation of sensitive electrical receivers.

**Conclusions.** The developed improved PWM algorithm of FC-AFE can significantly improve the quality of electricity in the in-house electrical networks of 6–35 kV without additional capital costs and installation of additional equipment. Based on the results obtained, it is recommended to use the developed PWM algorithms on the operating equipment with FC-AFE of industrial enterprises.

**Key words:** frequency converter, active rectifier, pulse width modulation, electromagnetic compatibility, power quality, current resonance, higher harmonics

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.069-081

**Введение.** На сегодняшний день в тяжелой промышленности для регулируемых электроприводов большой мощности (более 1 МВт) среднего напряжения (1–35 кВ) на основе синхронных и асинхронных двигателей все большее применение находят преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) отечественного и зарубежного производства. Основными преимуществами ПЧ-АВ, по сравнению с ПЧ на базе диодных или тиристорных выпрямителей, являются: встроенная функция рекуперации энергии торможения в питающую сеть, позволяющая сделать устройство более компактным, поскольку отпадает необходимость в

специальных модулях рекуперации или тормозных модулях; возможность работы ПЧ-АВ с единичным коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 1$  или даже с опережающим током [1].

Переключение силовых вентилях ПЧ-АВ осуществляется по законам широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет влиять на гармонический состав токов и напряжений в точке подключения ПЧ-АВ за счет специальных алгоритмов ШИМ АВ. Данный факт позволяет производителям преобразовательной техники заявлять о ПЧ-АВ как об устройствах, практически не влияющих на качество напряжения в питающей сети [2].

Однако проведенные исследования показывают, что при определенной конфигурации системы внутривозовского электроснабжения с ПЧ-АВ высока вероятность критического искажения синусоидальности кривой напряжения в точке общего подключения электроприемников [3]. Это связано с наличием резонансных участков в частотной характеристике внутривозовской сети 6–35 кВ, которые возникают в основном при взаимодействии эквивалентной емкости протяженных кабельных линий и индуктивности сетевого трансформатора на главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия. Данный резонанс является токовым, или параллельным, с величиной экстремума в десятки–сотни Гц.

Высшие гармоники тока, потребляемые мощными ПЧ-АВ, могут совпадать по частоте с областью резонанса в питающей сети и приводить к возникновению сильных искажений напряжения в точке подсоединения других электроприемников. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  при этом может значительно превышать предел в 5 %, установленный ГОСТ 32144-2013. При этом возможна некорректная работа чувствительных к качеству напряжения электроприемников: отключение устройств бесперебойного питания систем автоматизации; выход из строя некоторых ПЧ с модулями рекуперации энергии; повышенное потребление тока системами освещения с газоразрядными лампами и другие проблемы [4].

Для улучшения качества электроэнергии в сетях с мощными ПЧ-АВ можно применить следующие организационные и технические решения: выделение грязной секции на ГПП для питания только мощных ПЧ-АВ; установка фильтрокомпенсирующих устройств для удаления

наиболее значимых гармоник ПЧ-АВ или для коррекции частотной характеристики сети; использование наиболее оптимальных режимов электроснабжения, когда влияние ПЧ-АВ на сеть минимально, и другие способы [5].

На практике перечисленные решения могут оказаться малоэффективными или требующими больших капитальных затрат. Альтернативой может быть изменение настроек ШИМ АВ для уменьшения уровня гармоник ПЧ-АВ, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети 6–35 кВ. Ниже предлагается описание усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ и анализ их эффективности на действующем оборудовании некоторых металлургических предприятий и на специализированной лабораторной установке.

**Методы исследования.** Основные результаты исследования получены экспериментальным методом на действующем оборудовании металлургических предприятий на территории Российской Федерации и Турецкой Республики, а также на специальном лабораторном комплексе. В частности, исследования качества напряжения и внедрение усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ было осуществлено на металлургическом предприятии ЧерМК ПАО «Северсталь» [6]. Проблемы с качеством напряжения наблюдались после реконструкции комплекса холодной прокатки и замены главных приводов прокатного стана с двигателями постоянного тока и тиристорными преобразователями на синхронные двигатели и ПЧ-АВ серии ASC6000 фирмы АВВ. Принципиальная однолинейная схема системы электроснабжения (ГПП) ЧерМК и схема главных электроприводов прокатного стана представлены на рис. 1.

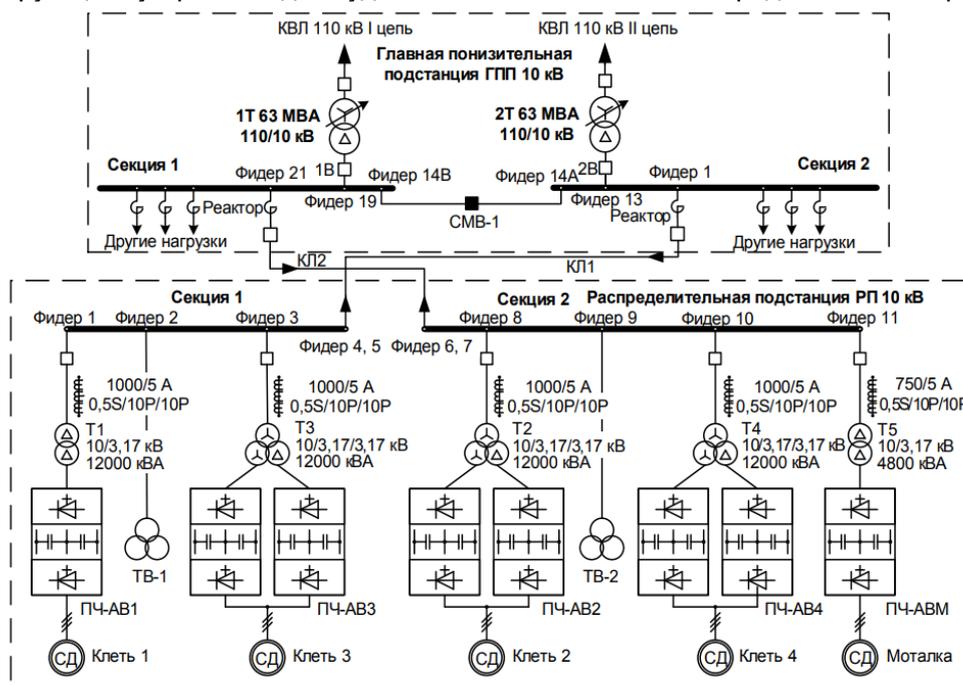


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения 10 кВ прокатного стана ЧерМК и схема электроприводов на базе ПЧ-АВ ASC6000 фирмы АВВ

Особенностью системы электроснабжения ЧерМК является наличие протяженных кабельных линий, суммарная длина которых превышает 90 км, а также наличие во всех ячейках ГПП токоограничивающих реакторов для снижения величины токов короткого замыкания. Данные особенности обуславливают сложную форму частотной характеристики сети в районе ГПП, поскольку каждая ячейка ГПП образует собственный контур с параллельным резонансом (рис. 2,б,  $Z_{ГПП}$ ).

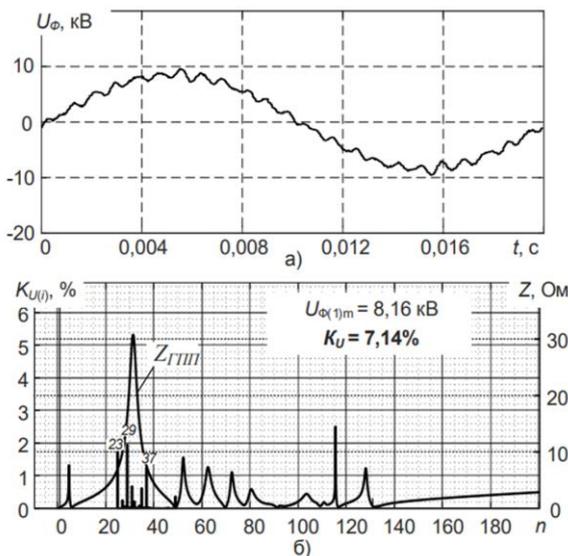


Рис. 2. Мгновенные значения напряжения 10 кВ (а), частотные характеристики и гармонический состав напряжения (б) на шинах РУ-10 кВ ГПП ЧерМК

При работе ПЧ-АВ стана наблюдались сильные искажения напряжения 10 кВ в точке общего подключения электроприемников, вызванные наложением высших гармоник ПЧ-АВ на резонансную область частотной характеристики сети. Значения  $K_U$  на секциях распределительного устройства РУ 10 кВ ГПП при этом, в зависимости от режима электроснабжения и режима работы ПЧ-АВ, находились в диапазоне 5,13–7,14 % (рис. 2).

На секциях распределительной подстанции РП, от которой непосредственно запитаны главные электроприводы с ПЧ-АВ, наблюдались еще большие искажения ( $K_U = 17,01$ – $27,05$  %). Следует отметить, что ПЧ-АВ здесь являются единственными электроприемниками и данные искажения не оказывали негативного влияния на их работу [7].

Исследование качества напряжения на ЧерМК проводилось с помощью измерительного комплекса на основе регистраторов электрических сигналов РЭС-3 (частота дискретизации сигналов 10 кГц), National Instruments (до 100 кГц), а также с помощью анализатора показателей качества электрической энергии ELSPEC G4420 (512 измерений/цикл). Фотографии измерительного комплекса представлены на рис. 3.



Рис. 3. Фотографии измерительного комплекса, применяемого при исследованиях на действующем оборудовании ЧерМК.

Аналогичные исследования проводились на металлургическом предприятии ЗАО «ММК Metalurji» [8], г. Дертюл, Турецкая Республика, (группа ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат») (рис. 4).



Рис. 4. Фотография измерительного комплекса, применяемого при исследованиях на действующем оборудовании ММК Metalurji

При исследованиях использовались: анализатор качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота дискретизации до 5 кГц); анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4430 (частота дискретизации для каждого канала: по напряжению – 50 кГц, по току – 25 кГц); сервер быстрых архивов IBA (с периодом дискретизации менее 10 мс).

Проведенные исследования показали, что при запуске стана горячей прокатки 1750 и реверсивного стана холодной прокатки 1750 обнаружилась невозможность работы в штатном режиме электроснабжения, когда электроприводы двух станов и второстепенные электроприемники запитаны от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ, поскольку низкое качество напряжения в точке общего подключения потребителей электроэнергии приводило к аварийной работе чувствительных электроприемников. Осциллограмма и спектральный анализ напряжения 34,5 кВ представлены на рис. 5.

По этой причине главные электроприводы стана горячей прокатки были переведены на питание от резервного трансформатора с отдельной секции ГПП 51EDM (рис. 6).

Создание «грязной» секции позволило устранить проблемы с работой чувствительных электроприемников, однако проект системы электроснабжения завода предусматривал наличие одного трансформатора в качестве горячего резерва, благодаря чему осуществля-

лась возможность проведения ремонтных мероприятий и обслуживания трансформаторов. В связи с этим необходима реализация иного способа обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) ПЧ-АВ с внутривзаводской системой электроснабжения [9].

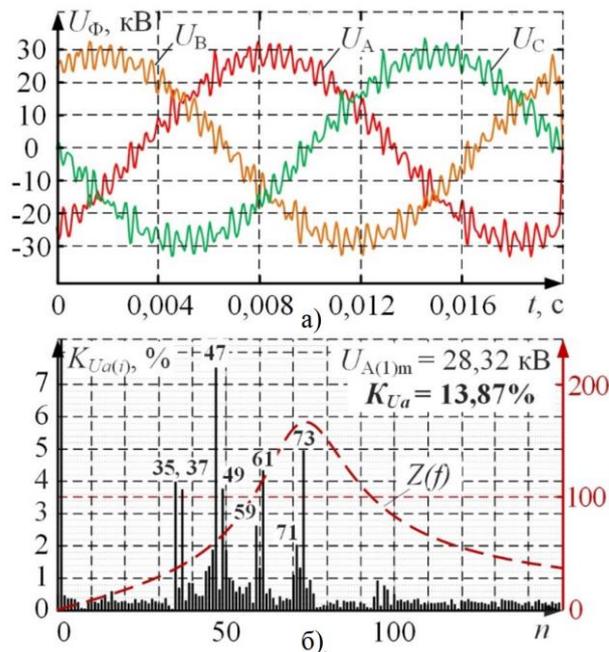


Рис. 5. Мгновенные значения напряжения 34,5 кВ (а), частотные характеристики и гармонический состав напряжения (б) на шинах РУ-10 кВ ГПП 51EDM

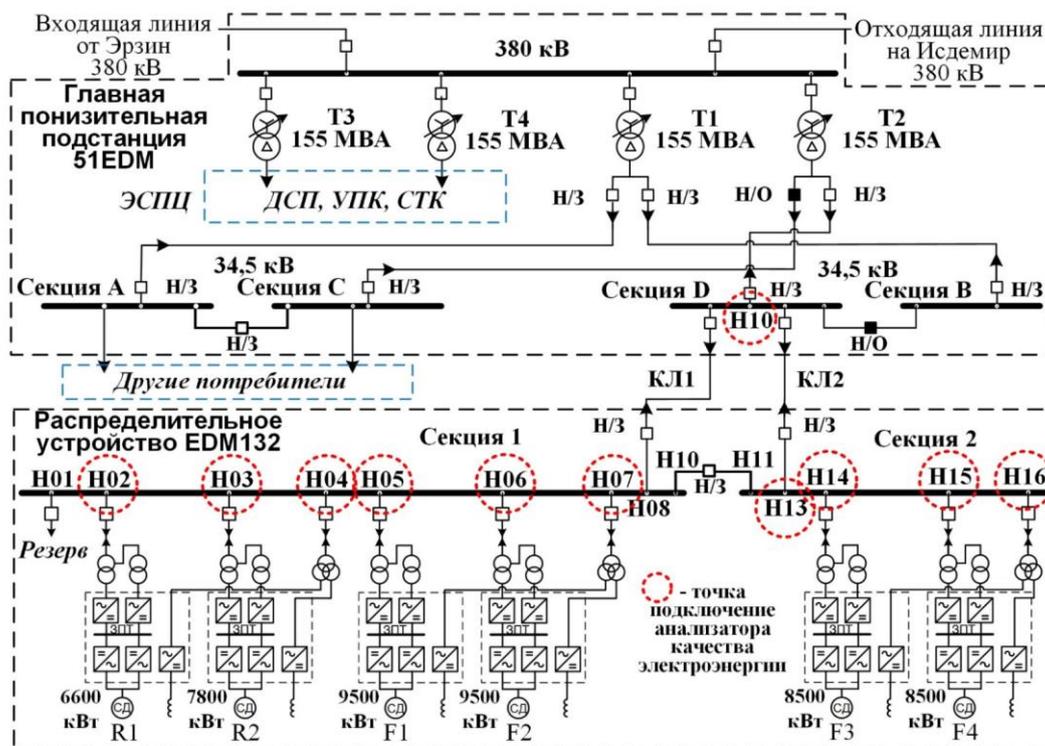


Рис. 6. Однолинейная схема системы электроснабжения 34,5 кВ прокатных станов MMK Metalurji и схема электроприводов на базе ПЧ-АВ ASC6000 фирмы ABB

Последующий анализ показал, что столь сильные искажения напряжения при штатном включении РУ EDM132 объясняются наличием в сети 34,5 кВ резонансных явлений (см. рис. 5,б), возникающих по описанному выше механизму.

Для решения проблемы ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью были проведены изменения системы управления ПЧ-АВ, позволившие реализовать усовершенствованные алгоритмы ШИМ с адаптацией к резонансным явлениям [10].

Для исследования возможного эффекта от применения усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ на специализированной лабораторной установке (рис. 7) были воссозданы условия, наблюдавшиеся на действующем оборудовании.

Лабораторная установка состоит из многоуровневых полупроводниковых модулей (максимальный ток 30 А, класс напряжения 600 В), позволяющих задавать необходимое число переключений и алгоритмы ШИМ в широких пределах. В качестве нагрузки выступает асинхронный двигатель мощностью 1,5 кВт.

Управление силовыми ключами ПЧ-АВ осуществляется через интерфейс между платформой управления и персональным компьютером с установленной программной средой MATLAB SIMULINK (рис. 8).

Для воссоздания резонансных явлений используются трехфазный трансформатор 380/380 В и параллельно включенные батареи

статических конденсаторов с высоким допустимым коэффициентом гармонических составляющих тока  $K_{\text{max}} \approx 45\%$ . Данное решение позволяет моделировать простой резонанс токов с возможностью изменения резонансной частоты.



Рис. 7. Фотография специализированной лабораторной установки для исследования ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью

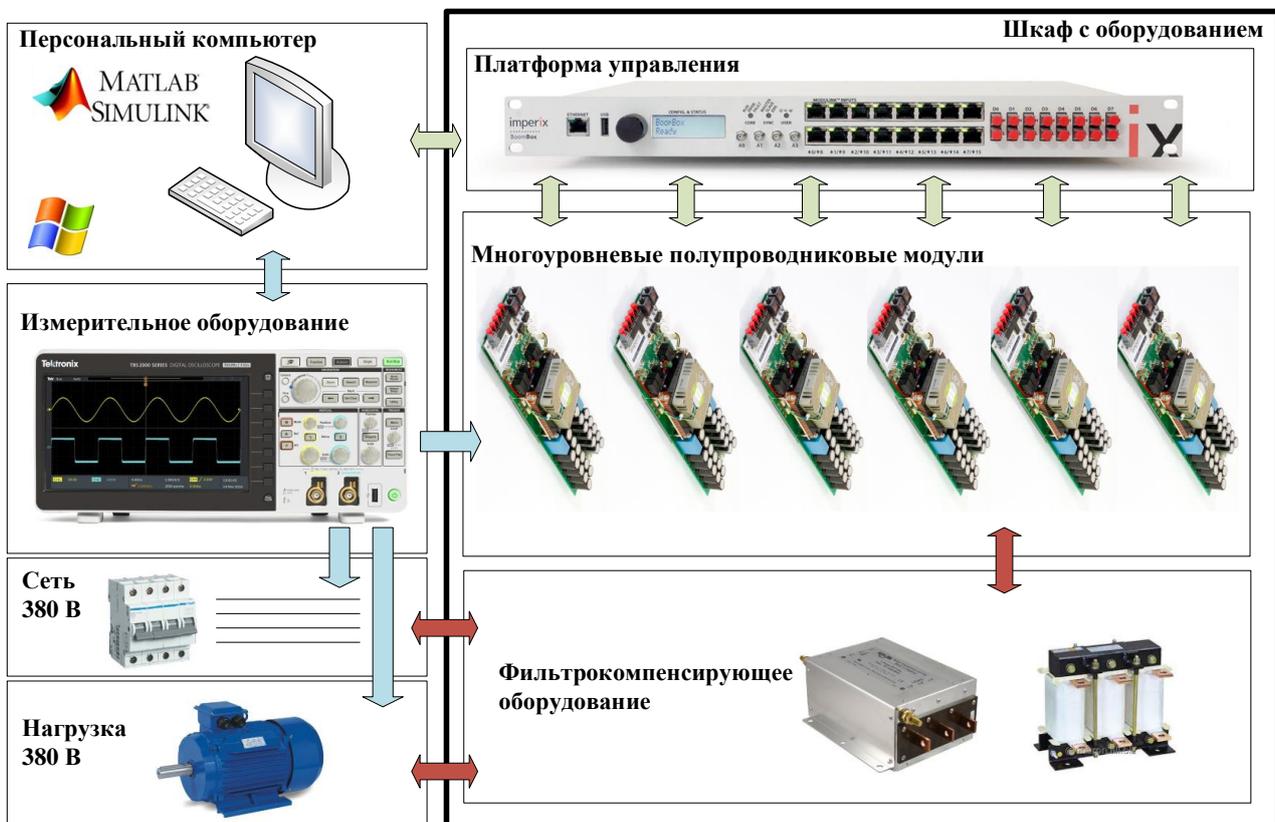


Рис. 8. Структура специализированного лабораторного стенда с ПЧ-АВ

Усовершенствованные алгоритмы ШИМ базируются на известных алгоритмах с удалением (Selective Harmonics Elimination SHEPWM) или ослаблением выделенных гармоник (Selective Harmonics Mitigation SHMPWM). Данные методы ШИМ позволяют подобрать некоторые углы переключения вентилей АВ в целях ослабления высших гармоник тока, потребляемого ПЧ-АВ, в резонансной области. Осциллограммы фазного напряжения и тока на входе ПЧ-АВ при SHE/SHM PWM, полученные на лабораторном стенде, представлены на рис. 9. Система уравнений, по которым проводился расчет углов переключения, рассматривается в [11–26].

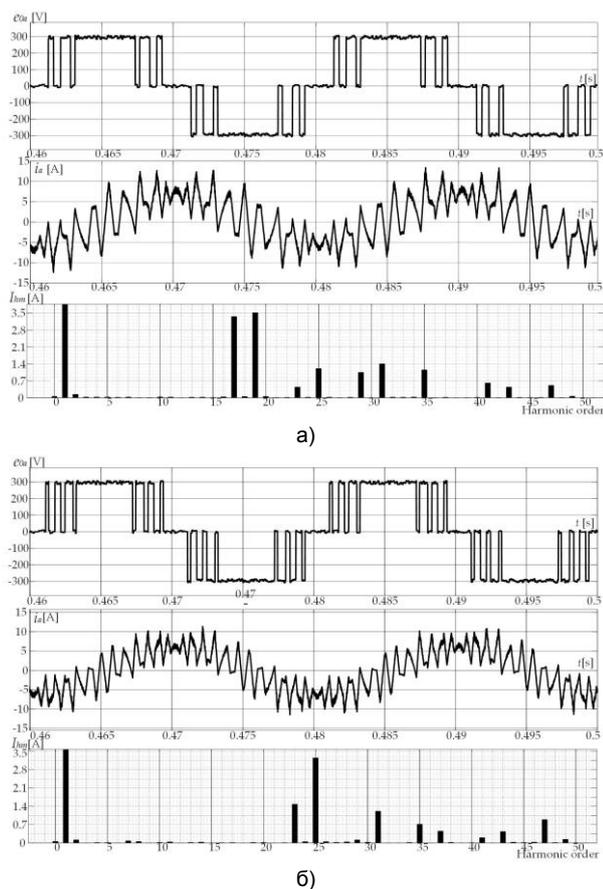


Рис. 9. Формы фазного напряжения и тока на входе ПЧ-АВ по методу SHE/SHM PWM с пятью (а) и семью (б) углами переключения, полученные на специализированном лабораторном стенде

Как правило, удалению/ослаблению подлежат наиболее значимые гармоники, имеющие невысокий порядок (5 и 7; 11 и 13; 17 и 19 и т.д.). Такой подход оправдан, если питающая сеть имеет линейную частотную характеристику в диапазоне до 100-й гармоники без влияния суммарной емкости кабельных линий. В этом случае импеданс частотной характеристики имеет величину, недостаточную для возникновения серьезных падений напряжения при протекании высокочастотного тока. На практике же сети 6–35 кВ на металлургических предприятиях имеют высокую протяженность и, как следствие, высокую эквивалентную емкость, что приводит к появлению в

частотной характеристике высокоомных, резонансных участков.

**Результаты исследования.** Для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с сетью 6–35 кВ следует изменить углы переключения вентилей АВ для ослабления гармоник тока в окрестностях сетевого резонанса. Изменение углов переключения АВ может быть затруднительно, поскольку может потребоваться помощь представителей фирмы производителя ПЧ-АВ. Для решения описанных выше проблем на ЧерМК привлекались специалисты фирмы АВВ, вносящие изменения в контроллер ШИМ ПЧ-АВ по выданным рекомендациям в виде готовых таблиц углов переключения в зависимости от коэффициента модуляции [6, 7, 9]. Таблицы углов рассчитаны по методу SHEPWM для удаления гармоник в окрестностях основного резонанса (23-37 гармоники).

Предварительная проверка эффективности предложенного способа обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью проведена на специализированном лабораторном стенде. Результаты внедрения разработанного усовершенствованного алгоритма ШИМ для адаптации к резонансным явлениям на действующем оборудовании ЧерМК представлены на рис. 10.

В табл. 1 представлены результаты повторных измерений показателей качества электроэнергии в сети 10 кВ ГПП при различных режимах работы прокатного стана. Показаны результаты измерения при совместной работе секций ГПП. Данный режим электроснабжения является основным для ЧерМК.

После изменения настроек ШИМ ПЧ-АВ в соответствии с предложенными рекомендациями во внутризаводской распределительной сети района ГПП был получен технический эффект в виде улучшения формы кривой напряжения 10 кВ и снижения  $K_U$  на 47,4–82,3 %, в зависимости от режима электроснабжения и режима работы стана (рис. 10, б, г).

Таблица 1. Результаты повторных измерений показателей качества электроэнергии в сети 10 кВ ГПП ЧерМК

| Режим работы ПЧ-АВ | $K_U$ на секциях ГПП |
|--------------------|----------------------|
| На холостом ходу   | 3,06 (↓47,8%)        |
| Под нагрузкой      | 1,30 (↓82,3%)        |

Аналогично были проведены исследования возможности улучшения ЭМС ПЧ-АВ с сетью 34,5 кВ на предприятии ММК Metalurji. На специализированном лабораторном стенде и на имитационной модели, разработанной в программной среде MATLAB SIMULINK, были воспроизведены условия, наблюдавшиеся при получении экспериментальных данных на действующем оборудовании, а именно форма резонанса в сети 34,5 кВ и алгоритмы ШИМ ПЧ-АВ.

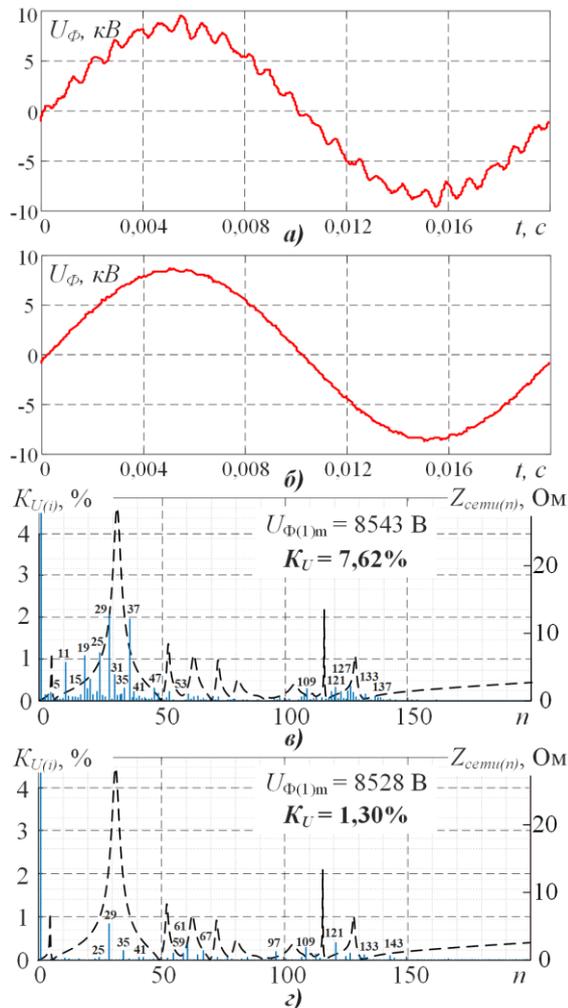


Рис. 10. Мгновенные значения напряжения 10 кВ (а, б), частотные характеристики (в, г) состав напряжения на шинах РУ-10 кВ ГПП-2 ЧерМК до (а, в) и после (б, г) изменения алгоритма ШИМ ПЧ-АВ

Анализ режимов работы стана горячей прокатки ММК Metalurji показал, что значительную часть времени ПЧ-АВ работает в режиме холостого хода или с нагрузкой меньше номинальной. Данный факт позволил применить подход с несколькими таблицами углов переключения вентилей ПЧ-АВ. При этом на холостом ходу и с нагрузкой меньше номинальной предложено использовать большую частоту коммутации вентилей. Использование большего числа переключений (большей частоты коммутации) вентилей ПЧ-АВ позволяет уменьшить  $K_U$  на входе ПЧ-АВ за счет удаления/ослабления дополнительных гармоник тока.

При применении таблиц углов переключения с увеличенной частотой коммутации вентилей ПЧ-АВ при работе электропривода со сниженной нагрузкой важно правильное определение значений тока АВ, при которых должен происходить переход с одной таблицы на другую. Увеличение частоты коммутации силовых ключей

вызывает их усиленный нагрев. Для обеспечения устойчивой работы преобразователя необходимо выполнение условия сохранения теплового баланса выделяемой на силовых вентилеях энергии и энергии, отводимой системой охлаждения. Некорректные значения граничных токов для каждой таблицы могут привести либо к аварийной остановке ПЧ-АВ по перегреву, либо к недоиспользованию возможностей усовершенствованного алгоритма ШИМ с динамическим выбором таблиц углов переключения вентилей.

Граничные значения токов были определены по графикам максимально допустимого значения тока IGCT-тиристора 5SHY 55L450, применяемого в ПЧ-АВ прокатного стана, в зависимости от частоты коммутации (рис. 11): линия I – при температуре окружающей среды  $T_{окр} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуре корпуса тиристора  $T_{тир} < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; линия II – при  $T_{окр} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{тир} < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; линией III отображено ограничение по мощности источника питания драйвера тиристора  $P_{др.макс} = 130\text{ Вт}$ .

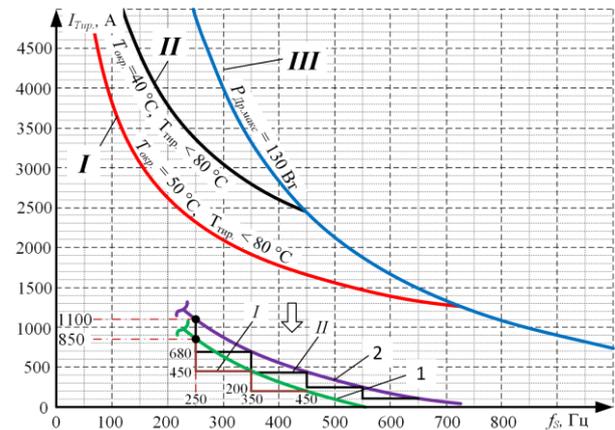


Рис. 11. Графики максимально допустимого тока IGCT-тиристора 5SHY 55L4500 в зависимости от частоты коммутации и определение граничных значений токов для таблиц усовершенствованной СУ АВ электроприводов стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

Кривые 1 и 2 (рис. 11), повторяющие характер зависимости максимально-допустимого тока IGCT-тиристора от частоты коммутации, были проведены через точки, соответствующие номинальным режимам работы АВ. С использованием указанных кривых графическим способом были определены граничные значения токов АВ для различных частот коммутации и построены зависимости I, II. Полученные значения представлены в табл. 2.

Для оценки эффективности усовершенствованной системы управления АВ с динамическим выбором таблиц было проведено имитационное моделирование с учетом токов АВ за цикл работы прокатного стана (рис. 12).

Таблица 2. Результаты определения граничных значений токов для таблиц усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ электроприводов стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

| Параметр                       | ПЧ-АВ черновых клетей | ПЧ-АВ чистовых клетей |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Номинальный ток при 250 Гц, А  | 850                   | 1100                  |
| Максимальный ток при 350 Гц, А | 450                   | 680                   |
| Максимальный ток при 450 Гц, А | 200                   | 440                   |
| Максимальный ток при 550 Гц, А | –                     | 240                   |
| Максимальный ток при 650 Гц, А | –                     | 200                   |

Применение усовершенствованных алгоритмов ШИМ позволяет снизить среднюю величину  $K_U$  для точки общего подключения – шин секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM ММК Metalurji – за цикл работы стана горячей прокатки на 59,7 %. При этом важно отметить, что улучшение значения указанного показателя качества электроэнергии происходит для всех режимов работы электроприводов стана, по сравнению с исходным вариантом.

Также на рис. 12 показан график изменения величины  $K_U$  при использовании одного набора углов с 5 переключениями за 1/4 периода, рассчитанного по методу SHEPWM с учетом резонансных явлений в частотной характеристике сети. Данная таблица углов переключений [6, 7, 9] обеспечивает более высокие показатели ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью, чем исходный вариант, что позволяет достичь уменьшения  $K_U$  примерно на 6,5 %. Однако указанный положительный технический эффект

является незначительным по сравнению с эффектом от применения усовершенствованного ШИМ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения.

Эта же таблица углов переключений применяется и в усовершенствованном алгоритме ШИМ АВ при работе преобразователей с номинальными значениями нагрузки. При прокатке сляба станом некоторые электроприводы клетей работают со сниженными значениями нагрузки. Усовершенствованный алгоритм ШИМ АВ этих электроприводов использует таблицы с увеличенной частотой коммутации. В результате чего величина  $K_U$  ниже, чем при работе с одним набором углов переключения. Также стоит отметить, что работа ПЧ-АВ электроприводов клетей стана с различными таблицами вызывает эффект активной фильтрации, что приводит к еще большему снижению  $K_U$ . Суть эффекта заключается в том, что высшие гармоники тока отдельных ПЧ-АВ при работе АВ с разными наборами углов переключения могут иметь различную величину и фазу, отличающуюся на 180°. В результате чего в суммарном сетевом токе группы ПЧ-АВ присутствует взаимная компенсация отдельных гармоник, приводящая к снижению величины  $K_U$  и  $K_V$  в точке общего присоединения на общих секциях заводской ГПП.

Для удобства сравнения в табл. 3 представлены основные результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования работы электротехнического комплекса ММК Metalurji при использовании усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ.

Сравнение формы напряжения при использовании усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ с экспериментальными данными представлено на рис. 13.

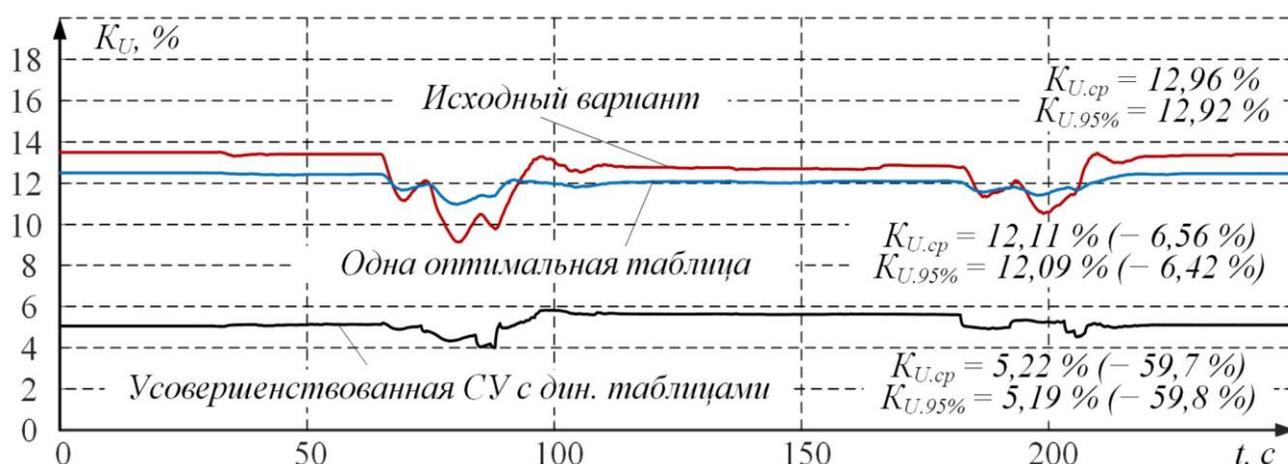


Рис. 12. График изменения коэффициента  $K_U$  за цикл работы прокатного стана для секции D ЗРУ-34,5 кВ 51EDM ЗАО «ММК Metalurji»

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования позволили определить причину сильных искажений напряжения на общих секциях шин 6–35 кВ при работе мощных ПЧ-АВ,

которые наблюдались на металлургических предприятиях ЧерМК и ММК Metalurji и которые приводили к нарушению нормальной работы чувствительных электроприемников. Причина

данных искажений заключается в совокупности нескольких факторов: наличие резонансных явлений во внутривозвратной распределительной сети 6–35 кВ, вызванных взаимодействием реактивных элементов системы электроснабжения (кабельных линий, трансформаторов, реакторов); наличие в токе, потребляемом ПЧ-АВ, высших гармонических составляющих, совпадающих по частоте с высокоомной областью в окрестностях сетевого резонанса.

Таблица 3. Результаты сравнительного анализа эффективности применения усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ в электроприводах стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

| Показатель   | Исходный вариант | Усовершенствованный алгоритм ШИМ |
|--|------------------|----------------------------------|
| Среднее значение $K_U$ за цикл работы стана, %           | 12,96            | 5,22<br>(↓59,7 %)                |
| Среднее значение $K_U$ в течение 95%-ного интервала, %   | 12,92            | 5,19<br>(↓59,8 %)                |
| Минимальное значение $K_U$ за цикл работы стана, %       | 9,15             | 3,99<br>(↓56,4 %)                |
| Максимальное значение $K_U$ за цикл работы стана, %      | 13,5             | 5,81<br>(↓57,0 %)                |
| Среднее значение $K_U$ при работе ЭП под нагрузкой, %    | 12,84            | 5,65<br>(↓56,0 %)                |
| Среднее значение $K_U$ при работе ЭП на холостом ходу, % | 13,48            | 5,09<br>(↓62,2 %)                |

Для решения данных проблем были разработаны усовершенствованные алгоритмы ШИМ АВ, позволяющие уменьшать гармоники тока, потребляемого ПЧ-АВ из сети, в непосредственной близости от опасной области в частотной характеристике внутривозвратной сети 6–35 кВ. Разработанные алгоритмы базируются на известных ШИМ с удалением/ослаблением выделенных гармоник. Различие заключается в условиях для определения углов переключения вентилей АВ: в классическом подходе удалению/ослаблению подлежат гармоники с наиболее низким порядком (минимизация  $K_U$  на входе ПЧ-АВ), в усовершенствованных ШИМ ослабляются гармоники, вносящие наибольший вклад в искажения напряжения во внутривозвратной сети 6–35 кВ.

Эффективность данных алгоритмов была проверена на специализированном лабораторном стенде, позволяющем воспроизводить работу ПЧ-АВ и моделировать сеть с резонансными явлениями. Также разработанные алгоритмы ШИМ были успешно внедрены на действующее электрооборудование прокатного

стана ЧерМК, где был достигнут технический эффект в виде снижения  $K_U$  в точке общего подключения электроприемников на 47,8–82,3 %, в зависимости от режима работы стана, благодаря чему удалось обеспечить устойчивую работу чувствительных электроприемников.

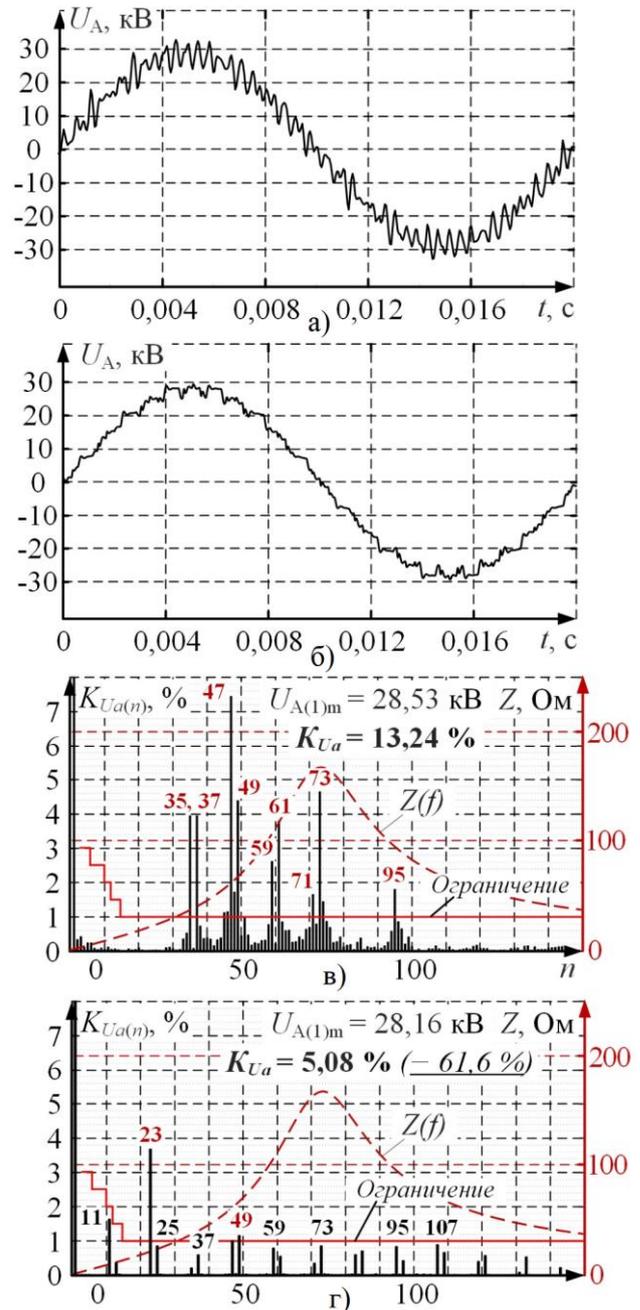


Рис. 13. Мгновенные значения напряжения 34,5 кВ (а, б), частотные характеристики и гармонический состав напряжения (в, г) на шинах РУ-34,5 кВ ГПП ММК Metalurji до (а, в) и после (б, г) изменения алгоритма ШИМ ПЧ-АВ.

Разработанные на специализированном лабораторном стенде усовершенствованные алгоритмы ШИМ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения силовых вентилей АВ были предложены в качестве решения по обеспечению

печению ЭМС ПЧ-АВ прокатного стана с питающей сетью 34,5 кВ на предприятии ММК Metalurji. Результаты моделирования показали, что наличие нескольких таблиц углов переключения позволяет уменьшить  $K_U$  в сети 34,5 кВ на 56,0–62,2 %, в зависимости от режима работы стана горячей прокатки. Эффективность данных алгоритмов ШИМ определяется более высокой частотой коммутации вентилей ПЧ-АВ при работе с нагрузкой меньше номинальной.

Результаты проведенных исследований показали эффективность разработанных алгоритмов ШИМ АВ в плане улучшения качества электрической энергии во внутривозовских сетях 6–35 кВ. Результаты исследований рекомендуются для внедрения на действующем оборудовании с ПЧ-АВ промышленных предприятий.

### Список литературы

- 1. Возможности** компенсации реактивной мощности в сети посредством высокоомощного рекуперативного электропривода переменного тока / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, С.А. Линьков, Т.А. Лисовская // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18, № 3-4. – С. 65–74.
- 2. Network-Friendly Low-Switching-Frequency Multipulse High-Power Three-Level PWM Rectifier** / J.A. Pontt, J.R. Rodríguez, A. Liendo, et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, No. 4. – P. 1254–1262.
- 3. Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Афанасьев М.Ю.** Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутривозовского электроснабжения промышленных предприятий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 51–62.
- 4. 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.
- 5. 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.
- 6. 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.
- 7. Николаев А.А., Гилемов И.Г., Буланов М.В.** Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 5. – С. 41–50.
- 8. Nikolaev A.A., Gilemov I.G.** The Dynamic Operation Investigation of an Active Rectifier Control System with IGCT-Thyristor Switching Angle Table Selection Function // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). – Sochi, 2022. – P. 492–497.
- 9. Current Electromagnetic Compatibility Problems of High-Power Industrial Electric Drives with Active Front-End Rectifiers Connected to a 6–35 kV Power Grid: A Comprehensive Overview** / A.A. Nikolaev, A.S. Maklakov, M.V. Bulanov, et al. // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – P. 293.
- 10. Разработка** усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривозовской сети / А.А. Николаев, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, А.С. Денисевич // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6 – С. 47–56.
- 11. 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.
- 12. Celanovic N., Boroyevich D.** A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – P. 637–641.
- 13. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 3–7.
- 14. Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П.** Расчет электромагнитных процессов в трехфазном трехуровневом инверторе напряжения // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – Вып. 1. – С. 221.
- 15. Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В.** Энергосберегающий электропривод на базе двухзвонного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30.
- 16. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 3–9.
- 17. Endrejat F., Pillay P.** Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System // IEEE International Electric Machines & Drives Conference. – 2007. – С. 736–741.
- 18. Alawasa K.M., Moamed R.I., Xu W.** Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – P. 121–134.
- 19. Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В.** Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–69.
- 20. Экспериментальные** исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 4 – С. 96–103.
- 21. Blooming T.M., Carnovale D.J.** Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits // Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. – 2006. – P. 1–9.
- 22. 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.

23. **A hybrid PWM strategy for three-level inverter with unbalanced DC links** / X. Wu, G. Tan, G. Yao, et al. // IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. – 2018. – Vol. 6. – P. 1–15.

24. **Steczek M., Chudzik P., Szlag A.** Combination of SHE- and SHM-PWM techniques for VSI DC-link current harmonics control in railway applications // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2017. – Vol. 64. – P. 7666–7678.

25. **Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation** / K. Zhou, Y. Yang, F. Blaabjerg, D. Wang // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2015. – Vol. 62. – P. 1220–1230.

26. **Selective harmonic mitigation based self-elimination of triplen harmonics for single-phase five-level inverters** / M. Sharifzadeh, H. Vahedi, R. Portillo, et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2019. – Vol. 34. – P. 86–96.

## References

1. Maklakov, A.S., Nikolaev, A.A., Lin'kov, S.A., Lisovskaya, T.A. Vozможности kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v seti posredstvom vysokomoshchnogo rekuperativnogo elektroprivoda peremennogo toka [Reactive Power Compensation Using a High-Power Regenerative AC Drive]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2022, vol. 18, no. 3–4, pp. 65–74.

2. Pontt, J.A., Rodríguez, J.R., Liendo, A., Newman, P., Holtz, J., San Martín, J.M. Network-Friendly Low-Switching-Frequency Multipulse High-Power Three-Level PWM Rectifier. IEEE Transactions on Industrial Electronics, April 2009, vol. 56, no. 4, pp. 1254–1262.

3. Nikolaev, A.A., Khrumshin, T.R., Afanas'ev, M.Yu. Issledovanie rezonansnykh yavleniy v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh srednego napryazheniya sistem vnutrizavodskogo elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Study of Resonant Phenomena in Medium Voltage Distribution Networks of Industrial Power Supply Systems]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 51–62.

4. 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.

5. 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 IGÉU*, 2023, issue 1, pp. 41–52.

6. 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 pitayushchey 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.

7. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V. Otsenka vliyaniya rezhimov raboty elektroprivodov prokatnogo stana s PCh-AV na kachestvo napryazheniya

pitayushchey seti 10 kV [Assessment of influence of rolling mill FC-AR electric drive operation mode on 10 kV supply network voltage quality]. *Vestnik IGÉU*, 2021, issue 5, pp. 41–50.

8. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G. The Dynamic Operation Investigation of an Active Rectifier Control System with IGCT-Thyristor Switching Angle Table Selection Function. Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). Sochi, 2022, pp. 492–497.

9. Nikolaev, A.A., Maklakov, A.S., Bulanov, M.V., Gilemov, I.G., Denisevich, A.S., Afanas'ev, M.Yu. Current Electromagnetic Compatibility Problems of High-Power Industrial Electric Drives with Active Front-End Rectifiers Connected to a 6–35 kV Power Grid: A Comprehensive Overview. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 1, p. 293.

10. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Afanas'ev, M.Yu., Denisevich, A.S. Razrabotka usovershenstvovannogo algoritma ShIM aktivnogo vypryamitelya s adaptatsiyey k rezonansnym yavleniyam vo vnutrizavodskoy seti [Development of an advanced PWM algorithm for active rectifier with adaptation to current resonances in internal power supply system]. *Vestnik IGÉU*, 2018, issue 6, pp. 47–56.

11. 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.

12. Celanovic, N., Boroyevich, D. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters. IEEE Trans. Ind. Appl., Mar. 2001, vol. 37, no. 2, pp. 637–641.

13. Khrumshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' silovoy skhemy glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7.

14. Khrumshin, T.R., Khrumshin, R.R., Kornilov, G.P. Raschet elektromagnitnykh protsessov v trekhfaznom trekhurovnevom invertore napryazheniya [Calculation of electromagnetic processes in a three-phase three-level voltage inverter]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы»*. Vyp. 1 [Interuniversity proceedings of scientific papers «Electrical systems and complexes». Issue 1]. Magnitogorsk: MGTU, 2010, p. 221.

15. Maklakov, A.S., Gasiyarov, V.R., Belyy, A.V. Energoberegayushchiy elektroprivod na baze dvukhzhennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem i avtonomnym invertorom napryazheniya [Energy-saving electric drive on the basis of back-to-back converter]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 23–30.

16. Khrumshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' aktivnogo vypryamitelya v nesimmetrichnykh rezhimakh raboty [Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9.

17. Endrejat, F., Pillay, P. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Antalya, 2007, pp. 736–741.

18. Alawasa, K.M., Moamed, R.I., Xu, W. Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, vol. 29, no. 1, pp. 121–134.

19. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Bulanov, M.V. Issledovanie parallel'noy raboty avtomatizirovannykh elektroprivodov prokatsnogo stana i dugovoy staleplavil'noy pechi [Investigation of parallel work of rolling mill's automated electric drives and an electric arc furnace]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 59–69.

20. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khrumshin, T.R., Nikiforov, G., Mutallapova, F.F. Eksperimental'nye issledovaniya elektromagnitnoy sovmestimosti sovremennykh elektroprivodov v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of industrial enterprises]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–103.

21. Blooming, T.M., Carnovale, D.J. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits. Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006, pp. 1–9.

22. 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.

23. Wu, X., Tan, G., Yao, G., Sun, C., Liu, G. A hybrid PWM strategy for three-level inverter with unbalanced DC links. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 2018, vol. 6, pp. 1–15.

24. Steczek, M., Chudzik, P., Szelag, A. Combination of SHE- and SHM-PWM techniques for VSI DC-link current harmonics control in railway applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2017, vol. 64, pp. 7666–7678.

25. Zhou, K., Yang, Y., Blaabjerg, F., Wang, D. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2015, vol. 62, pp. 1220–1230.

26. Sharifzadeh, M., Vahedi, H., Portillo, R., Franquelo, L.G., Al-Haddad, K. Selective harmonic mitigation based self-elimination of triplen harmonics for single-phase five-level inverters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2019, vol. 34, pp. 86–96.