

Гусев Юрий Павлович,
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой электрических станций,
e-mail: GusevYP@mpei.ru
Gusev Yuri Pavlovich,
National Research University «Moscow State Power Engineering University»
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Department of Electrical Stations,
e-mail: GusevYP@mpei.ru

Шелковой Евгений Владимирович,
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
инженер кафедры электрических станций,
e-mail: ShelkovoyYV@mpei.ru
Shelkovoy Evgeny Vladimirovich,
National Research University «Moscow State Power Engineering University»
Engineer of the Department of Electrical Stations,
e-mail: ShelkovoyYV@mpei.ru

УДК 621.372.632

Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривоздушной сети

А.А. Николаев, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, А.С. Денисевич
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Мощные электроприводы современных прокатных станков создаются на основе двигателей переменного тока среднего напряжения (асинхронных и синхронных) и преобразователей частоты с активными выпрямителями. Такие электроприводы являются источником высших гармоник, в связи с этим актуальным является вопрос об их электромагнитной совместимости с внутривоздушной распределительной сетью. В частности, данный вопрос актуален на предприятиях, в системах внутривоздушного электроснабжения которых используются протяженные кабельные линии 6–35 кВ, суммарное значение распределенной емкости в которых может достигать нескольких микрофард. В результате взаимодействия индуктивности трансформатора главной понижающей подстанции и суммарной емкости кабельных линий в частотной характеристике сети экстремум резонанса токов может расположиться на частотах гармоник, генерируемых преобразователями частоты. В этом случае возникают сильные искажения напряжения на общих секциях распределительных устройств, что может приводить к выходам из строя электрооборудования. Существующие способы снижения негативного влияния резонансных явлений на качество электроэнергии во внутривоздушных сетях сводятся к установке специальных фильтров и требуют соответствующих экономических затрат, в связи с этим актуальной задачей является исследование альтернативных способов устранения сильных искажений, вызываемых преобразователями частоты.

Материалы и методы. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ осуществляется в программном продукте MATLAB с приложением Simulink на основе созданной имитационной модели, учитывающей реальную частотную характеристику внутривоздушной сети АО «Северсталь – Сортовой завод Балаково» и параметры преобразователя частоты с активным выпрямителем.

Результаты. Разработан усовершенствованный алгоритм широтно-импульсной модуляции, адаптирующийся к резонансным явлениям во внутривоздушных сетях благодаря изменению углов включения вентилей активного выпрямителя в зависимости от нахождения экстремума частотной характеристики. Создана имитационная модель, учитывающая реальные частотные характеристики и параметры преобразователя частоты. На модели получены кривые напряжения сети при исходном и усовершенствованном алгоритме ШИМ, проведен их сравнительный анализ. Установлено, что использование адаптивного ШИМ уменьшает коэффициент суммарных гармонических искажений кривой напряжения сети в 2,5 раза.

Выводы. Достоверность полученного результата подтверждается адекватностью использованной математической модели предмету исследования, а также реальностью исходных данных для моделирования. Предложенный алгоритм ШИМ позволяет улучшать электромагнитную совместимость преобразователя частоты с сетью без применения специальных фильтрующих цепей. Полученные результаты могут применяться при проектировании преобразователей частоты с активными выпрямителями среднего напряжения.

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

Development of an advanced PWM algorithm for active rectifier with adaptation to current resonances in internal power supply system

A.A. Nikolaev, M.V. Bulanov, M.Yu. Afanasyev, A.S. Denisevich
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Abstract

Background. Powerful electric drives of modern rolling mills are based on AC medium voltage motors (asynchronous and synchronous) and frequency converters with active rectifiers. Such electric drives are the source of higher harmonics, which makes the problem of their electromagnetic compatibility with the internal distribution network an important issue. In particular, this issue is relevant to enterprises with systems of internal power supply using extended 6–35 kV cable lines, in which the total value of distributed capacity can reach several microfarads. As a result of the interaction of the transformer inductor of the main stepdown substation and the total capacity of the cable lines, the current resonance extremum in the network frequency response can be located at the frequencies of frequency converter harmonics. This causes strong voltage distortions in the common sections of the switchgear, which can lead to electrical equipment failures. The existing ways of minimizing the negative impact of resonant phenomena on the electricity quality in the internal power networks are reduced to the installation of special filters and require certain economic costs, which makes it an urgent task to investigate alternative ways of eliminating strong distortions caused by frequency converters.

Materials and methods. An improved PWM algorithm has been developed in the MATLAB software with a Simulink application based on the created imitation model taking into account the actual frequency response of the internal power network AO «Severstal – Grading Plant Balakovo» and the parameters of the frequency converter with an active rectifier.

Results. We have developed an advanced pulse width modulation algorithm that adapts to resonant phenomena in internal power networks due to the changes in the angles of rectifier valve activation depending on the frequency extremum position. We have also developed a simulation model taking into account frequency characteristics and frequency converter parameters. With this model, we were able to obtain the network voltage curves by applying the original and the improved PWM algorithms, and to compare the results. It has turned out that adaptive PWM reduces the coefficient of total harmonic distortions of the network voltage curve by 2,5 times.

Conclusions. The reliability of the obtained result is confirmed by the ability of the applied mathematical model to adequately describe the research subject, as well as by the real-world nature of the initial data used for modeling. The proposed PWM algorithm makes it possible to improve the electromagnetic compatibility of the frequency converter with the network without using special filter circuits. The results obtained can be used in the design of frequency converters with active medium voltage rectifiers.

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

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.047-056

Введение. Электроприводы современных прокатных станов создаются на основе двигателей переменного тока высокого напряжения (асинхронных и синхронных) и преобразователей частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ), выполненных по многоуровневой схеме. Схема силовой части АВ идентична схеме автономного инвертора напряжения (АИН). Силовая часть АВ выполнена на полностью управляемых вентилях (IGCT-тиристоры, IGBT, IEGT-транзисторы) [1, 2]. Применение ПЧ с многоуровневым АВ позволяет улучшить гармонический состав токов, потребляемых из сети, корректировать коэффициент мощности, а также рекуперировать энергию в питающую сеть. Особенностью ПЧ с АВ является генерирование высокочастотных гармоник тока, что обусловлено применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления вентилями [3].

В процессе эксплуатации таких электрических приводов могут быть выявлены различные проблемы их электромагнитной совместимости (ЭМС) с питающей сетью среднего напряжения. В частности, проблемы с ЭМС возникают в распределительных сетях с протяженными кабель-

ными линиями. Такие схемы электроснабжения используются в комплексных мини-заводах, таких как АО «Северсталь – Сортной завод Балаково» (г. Балаково) [4].

Из-за высокого значения электрической емкости кабельных линий резонанс токов в сети среднего напряжения может сместиться в область потребления/генерирования значимых гармоник преобразователей частоты, что, в свою очередь, может значительно исказить форму питающего напряжения. Если эти искажения превысят критический уровень, то может существенно снизиться срок эксплуатации или выйти из строя электрооборудование, питание которого осуществляется той же сетью.

В целях исключения подобных режимов работы электрооборудования рассмотрена возможность изменения алгоритма ШИМ активных выпрямителей на оптимальный при данной частотной характеристике сети. Для определения оптимального алгоритма ШИМ в программном продукте *MATLAB* с приложением *Simulink* была разработана имитационная модель комплекса «питающая сеть – активный выпрямитель», учи-

тывающая реальную частотную характеристику внутривоздушной сети.

Материалы и методы. Основой проведенных исследований являются материалы исследования резонансных явлений во внутривоздушных сетях среднего напряжения на примере АО «Северсталь – Сортовой завод Балаково».

На рис. 1 приведена схема электроснабжения главных приводов сортового стана АО «Северсталь – Сортовой завод Балаково». Трансформаторы Т15 – Т18 10/3.55 кВ (табл. 1) питают преобразователи частоты ТМЕИС скоростных проволочных блоков (СПБ) №1–3 (2500 кВт, 2500 кВт и 6800 кВт). Преобразователи ТМЕИС (табл. 2) состоят из выпрямителя и инвертора, выполненных по трехуровневой схеме (рис. 2) – звено постоянного тока представляет собой последовательное соединение двух конденсаторов со средней точкой. Каждая фаза активного выпрямителя выполнена в виде последовательного соединения четырех высоковольтных IEGT транзисторов. Их средний зажим присоединен к вторичной обмотке трансформатора, два крайних – к положительной и отрицательной шинам звена постоянного тока, а два промежуточных зажима с помощью двух диодов присоединены к средней точке конденсаторов. Подобное решение позволяет при использовании транзисторов класса 4500 В поддерживать напряжение в звене постоянного тока на уровне $2 \times 2430 \text{ В} = 4860 \text{ В}$ за счет того, что к каждому транзистору прикладывается лишь половина этого напряжения [5].

Трехуровневая схема подразумевает наличие в кривой фазного напряжения (относительно

средней точки конденсаторов) наличие трех уровней: -2430 В , 0 В и $+2430 \text{ В}$. Увеличение числа уровней напряжения, по сравнению с традиционными двухуровневыми схемами, дает улучшение в 2 раза гармонического состава тока, потребляемого из сети. Это особенно актуально для мощных ПЧ, у которых низкая частота переключения ключей $5 \times 50 \text{ Гц} = 250 \text{ Гц}$ (частота ШИМ), поскольку при такой частоте ШИМ кривая тока сильно искажена по отношению к синусоиде.

Ключевым вопросом обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты на базе активного выпрямителя с питающей сетью является возможность применения различных методов ШИМ. В преобразователях фирмы ТМЕИС серии ТМdrive-70 напряжением на 3550 В применяется метод ШИМ с фиксированными значениями углов переключения (Fixed Pulse Pattern Control).

При использовании данного алгоритма углы переключения силовых ключей (транзисторов) рассчитываются заранее, т.е. не в режиме реального времени, как это происходит в классическом методе ШИМ, и хранятся в памяти контроллера. Критериями, по которым производится расчет углов переключения, является минимизация потерь в IEGT-транзисторах и ограничение высших гармоник тока, генерируемых в сеть (*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (IEEE 519)).

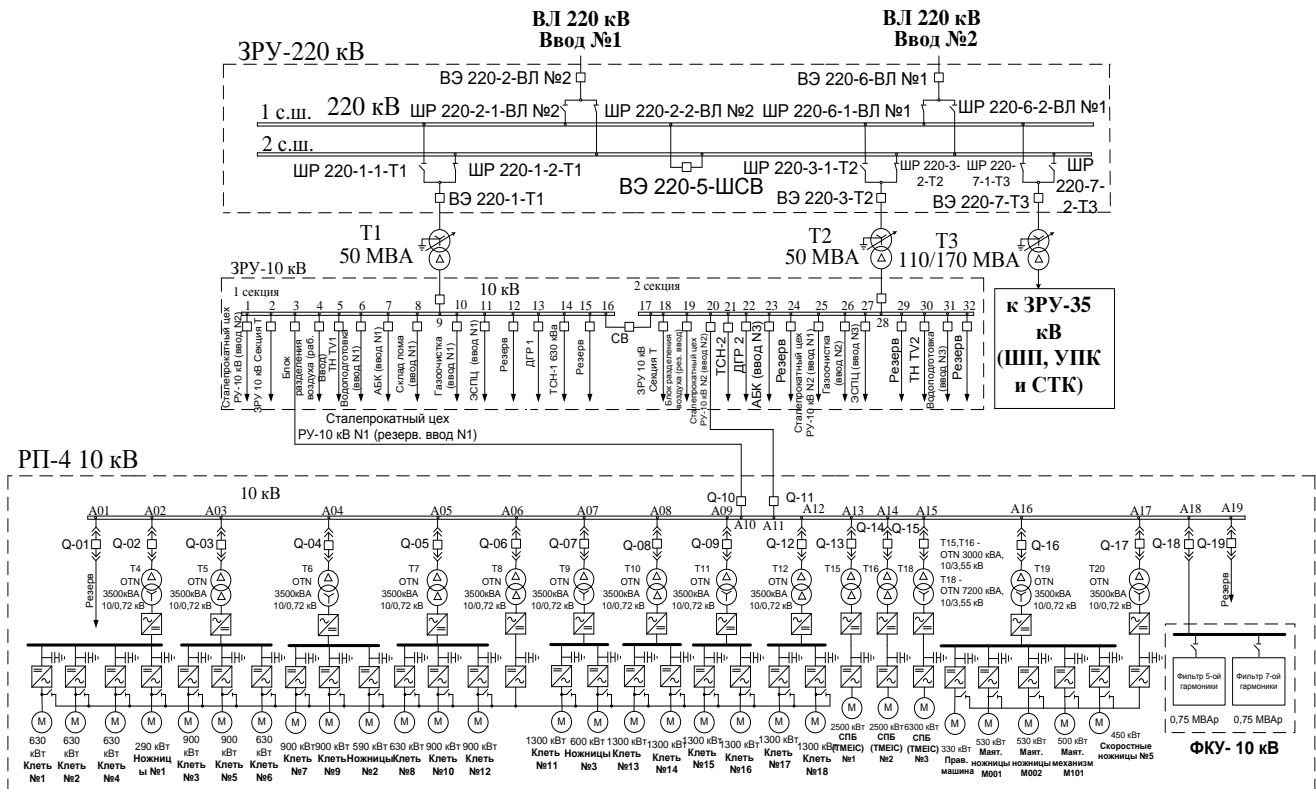


Рис. 1. Схема электроснабжения электроприемников 10 кВ сортопрокатного цеха

Таблица 1. Основные технические данные преобразовательных трансформаторов Т15, Т16 и Т18

Наименование	Величина	Единица измерения
Т15, Т16 (СПБ №1 и №2)		
Тип	OTN	
Номин. мощность	3000	кВА
Частота	50	Гц
Обмотка $U_{ВН}$	$10 \pm 2 \times 2,5\%$	кВ
Обмотка $U_{НН}$	3,55	кВ
Группа соединения	Dd0	
Напряжение КЗ	14,94	%
Т18 (СПБ №3)		
Тип	OTN	
Номин. мощность	7200	кВА
Частота	50	Гц
Обмотка $U_{ВН}$	$10 \pm 2 \times 2,5\%$	кВ
Обмотка $U_{НН}$	3,55	кВ
Группа соединения	Dd0	
Напряжение КЗ	14,87	%

Важной особенностью системы внутриводского электроснабжения электроприемников 10 кВ является большое количество кабельных линий, подключенных к общему ЗРУ-10 кВ. Суммарная длина линий, подключенных к ЗРУ-10 кВ (секции №1 и №2), с учетом КЛ, отходящих от цеховых РП, превышает 18 км.

Таблица 2. Основные технические данные преобразователя TMEIC

Наименование	Величина	Единица измерения
Номинальное напряжение звена постоянного тока	$2 \times 2430 = 4860$	В
Суммарная емкость (трех фаз, выпрямителя и инвертора) между средней точкой и положительной/отрицательной шиной	$(3+3) \times 2800 = 16800$	мкФ
IGBT-транзистор ток	2100	А
напряжение	4500	В
Обратный диод ток	1500	А
напряжение	4500	В

Большая протяженность линий обуславливает наличие значительной распределенной емкости (в случае АО «Северсталь – Сортовой завод Балаково» – около 7 мкФ), которая вместе с индуктивностью сетевого трансформатора 220/10 кВ может создать неблагоприятный резонанс токов (рис. 3), частота которого может совпасть с частотной областью генерирования гармоник ПЧ (рис. 4).

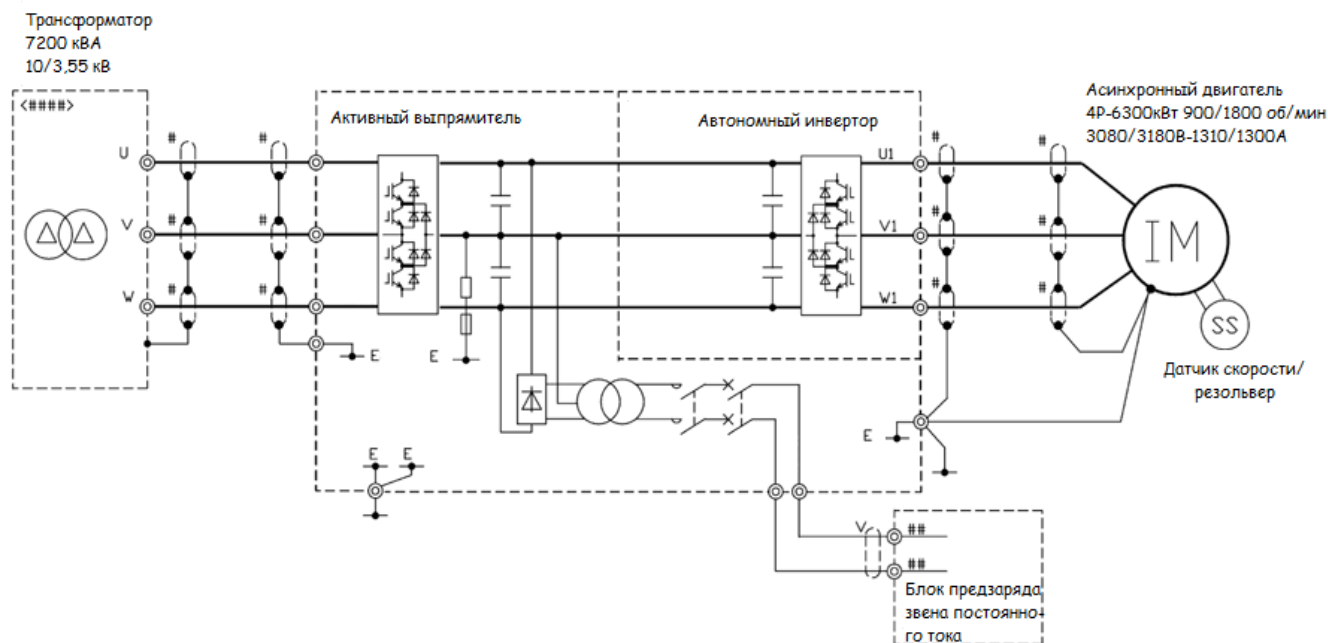


Рис. 2. Схема силовой части преобразователя частоты TMEIC

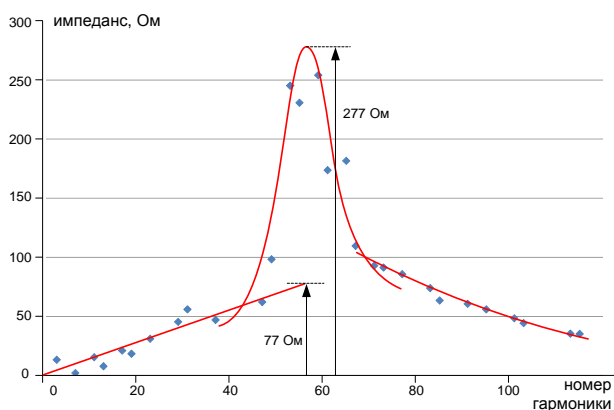


Рис. 3. Экспериментальная частотная характеристика сети 10 кВ

В этом случае на обмотках трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП) увеличивается падение напряжения на частотах гармоник, находящихся в области резонанса, что приводит к увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U (англоязычный аналог THD Total Harmonic Distortion – суммарные гармонические искажения) и появлению сильных высокочастотных помех (рис. 5).

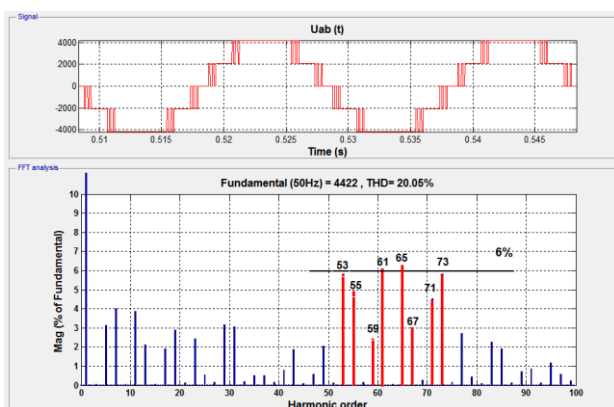


Рис. 4. Спектральный анализ линейного напряжения ПЧ ТМЕИС

Таковыми особенностями обладают системы внутризаводского электроснабжения небольших металлургических предприятий, где имеется одна ГПП с ЗРУ среднего напряжения, от которой получает питание по кабельным линиям большая часть электроприемников цехов. В этом случае вся емкость разветвленной сети среднего напряжения сосредоточена на секциях одного ЗРУ.

Необходимо отметить, что на расположение резонанса тока большое влияние оказывает удаленность мощной нелинейной нагрузки от ГПП. Чем меньше совокупная длина кабельных линий, отходящих от секции, от которой получает питание такая нагрузка, тем меньше их распределенная емкость. Последняя оказывает влияние на резонансную частоту, которая обратно пропорциональна суммарной емкости ка-

бельных линий. В соответствии с этим, уменьшение длины кабелей смещает резонансный максимум в область частот 6–10 кГц, где амплитуды высших гармоник ПЧ значительно меньше.

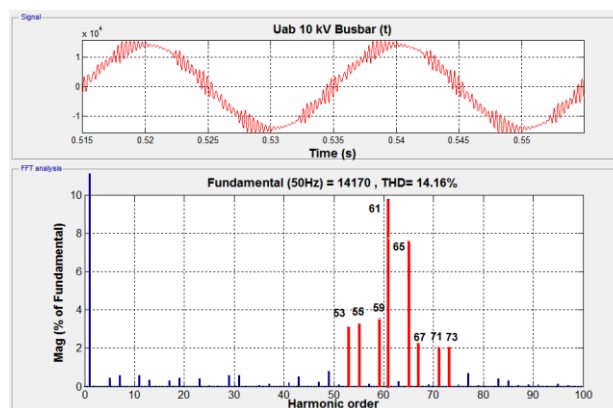


Рис. 5. Спектральный анализ линейного напряжения в распределительной сети 10 кВ

Таким образом, рациональным организационным решением, в котором не применяются дополнительные фильтры высших гармоник, являются следующие мероприятия [6]:

- грамотное проектирование системы электроснабжения предприятия, при котором расстояние между ГПП и местом установки преобразователей частоты большой мощности является минимальным (на рассматриваемом предприятии – не более 100 м);
- выделение одной секции (например, секции №1), от которой будут получать питание преобразователи частоты большой мощности;
- исключение питания ненагруженных кабельных линий 10 кВ;
- использование грамотных оперативных переключений на ГПП, исключающих одновременное включение электроприемников и протяженной кабельной трассы.

В случае неэффективности организационных мероприятий для обеспечения надежной работы электроприводов на базе ПЧ с АВ могут быть предусмотрены меры по установке специализированного фильтра, состоящего из высоковольтных батарей статического конденсатора, включенных последовательно, с малой индуктивностью (порядка $L_p \approx 100 \mu\text{Гн}$). В этом случае обеспечивается изменение зоны возникновения резонанса в частотной характеристике сети, тем самым исключаются сильные искажения напряжения при работе ПЧ с АВ [4, 7, 8].

Альтернативным способом снижения негативного влияния резонансных явлений на сеть может стать адаптивный алгоритм ШИМ, исключающий из кривой тока, потребляемого активными выпрямителями, гармоники, совпадающие с областью резонанса в частотной характеристике.

Для разработки адаптивного ШИМ в программном продукте *MATLAB* с приложением *Simulink*

была создана имитационная модель системы «сеть 10 кВ – активный выпрямитель» (рис. 6).

Для упрощения модели сети в схеме (рис. 1) был оставлен только один трансформатор ГПП и одна секция 10 кВ. Это соответствует схеме, при которой наблюдается резонанс токов в области 53–67 гармоник.

Для реализации управления транзисторами используется блок Pulse system, реализованный по методу ШИМ Fixed Pulse Pattern Control, который применяется в преобразователях ТМЕИС. Кривая фазного напряжения при использовании Fixed Pulse Pattern Control обладает симметрией на положительной и отрицательной полуволне (рис. 6). Однако она не обладает симметрией относительно середины положительного или отрицательного полупериода. В связи с этим совокупность углов переключений содержит два набора: $\alpha_1-\alpha_5$ – для первой половины полупериода, $\beta_1-\beta_5$ – для второй половины полупериода (табл. 3) [9, 10]. Однако отмеченная несимметрия не оказывает существенного влияния на форму кривой напряжения АВ и при разработке усовершенствованного алгоритма учитываться не будет.

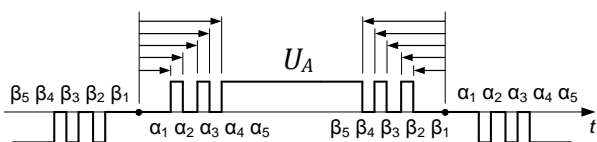


Рис. 6. Фазное напряжение активного выпрямителя по методу ШИМ Fixed Pulse Pattern Control

Для адаптации ПЧ к резонансным явлениям было предложено изменять наборы углов переключения транзисторов АВ в зависимости от расположения экстремума частотной характеристики сети.

Экстремум частотной характеристики можно определить с помощью FFT-анализа (быстрое преобразование Фурье) кривых напряжения и тока сети 10 кВ.

Таблица 3. Исходные углы переключения транзисторов активного выпрямителя ТМЕИС по методу ШИМ Fixed Pulse Pattern Control

Углы, эл. градусы	22,3	19,9	16,6	14,1	11,8	14,7	16,7	20,6	22,4
Обозначения	β_5	β_4	β_3	β_2	$\beta_1 = \alpha_1$	α_2	α_3	α_4	α_5

При обнаружении резонанса токов в области частот тока, потребляемого АВ, происходит переключение наборов углов коммутации транзисторов на наиболее оптимальный.

Оптимальные наборы переключений были получены на основе алгоритма ШИМ с исключением выделенных гармоник [9]. Путем решения системы нелинейных уравнений (1) подбираются такие углы переключения вентиляей, чтобы в

суммарной кривой напряжения не было нескольких гармоник. Первая гармоника при этом остается на уровне, заданном коэффициентом модуляции μ , который для алгоритма с фиксированными углами переключений постоянен и равен 0,9579:

$$F(\alpha) = \begin{cases} \mu - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(\alpha_i), \\ 0 - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_1 \alpha_i), \\ 0 - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_2 \alpha_i), \\ \dots \\ 0 - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_N \alpha_i), \end{cases} \quad (1)$$

где N – количество импульсов за полупериод (для ТМЕИС $N = 4$).

Следовательно, для исследуемого АВ можно подобрать углы переключения, которые исключают четыре соседние гармоники.

Решения системы уравнений (1) для гармоник с номерами 53,55,59,61; 59,61,65,67; 65,67,71,73 найдены с помощью встроенной функции solve в пакете MATLAB. Полученные наборы переключений представлены в табл. 4.

Для выбора действующего набора углов переключения была модернизирована система управления вентилями (рис. 7).

Таблица 4. Углы переключения транзисторов активного выпрямителя с усовершенствованным алгоритмом ШИМ

Номера гармоник, подлежащих исключению	Углы переключения, град.				
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
Исходные	11,84	14,71	16,69	20,61	22,41
53;55;59;61	5,59	10,82	14,81	18,94	24,21
59;61;65;67	8,07	12,98	17,14	20,85	26,00
65;67;71;73	7,48	11,97	15,87	19,19	24,01

Блок Amplitude служит для задания в модели среднего значения амплитуды двух соседних гармоник (53+55; 59+61; 65+67; 71+73), выраженного в относительных единицах. Сигнал, пропорциональный амплитуде высших гармоник, берется из блока, реализующего алгоритм Fast Fourier transform (FFT).

Блок MAX harmonics реализует сложение амплитуд двух соседних пар гармоник и выбор диапазона гармоник, подлежащих исключению, с помощью простого сравнения. Выходом блока является двоичный код, указывающий на набор углов, который необходимо применить.

Блок Pulse sets содержит наборы углов. Его выходом являются значения углов, которые отправляются в блок формирования импульсов.

Блок Pulse for (A,B,C) формирует импульсы для одной фазы АВ.

Блок Subsystem управляет вентилями трехуровневого АВ.

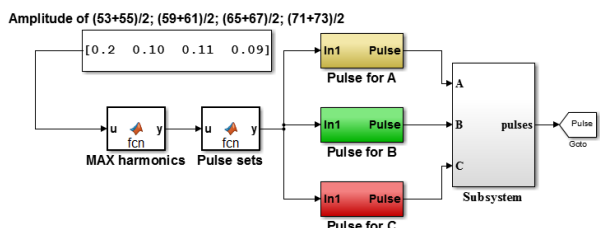


Рис. 7. Модель, реализующая усовершенствованный алгоритм ШИМ

Результаты исследования. На рис. 8 представлен спектральный анализ линейного напряжения ПЧ при использовании усовершенствованного ШИМ.

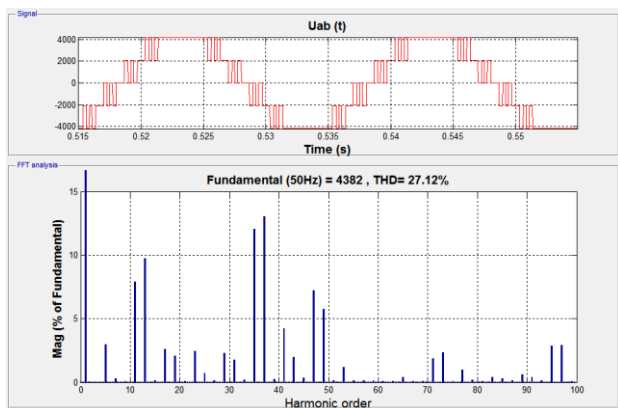


Рис. 8. Спектральный анализ линейного напряжения ПЧ с усовершенствованным ШИМ

Из-за применения адаптивного алгоритма ШИМ существенно возрос THD кривой напряжения АВ (26,79 % против 20,01 % у неадаптивной ШИМ). Однако гармонический ряд, находящийся на пике резонанса токов в распределительной сети, был устранен. Благодаря этому форма кривой напряжения в сети 10 кВ (рис. 9) при работе ПЧ существенно улучшилась (THD 14,16 % против 5,12 % при использовании адаптивного ШИМ).

На основании ГОСТ⁵ 32144-2013, в табл. 5, 6 представлено сравнение показателей качества электрической энергии в сети 10 кВ при работе ПЧ с исходным и усовершенствованным ШИМ.

⁵ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

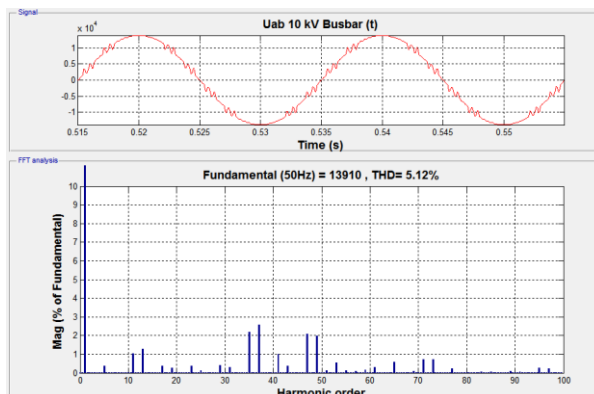


Рис. 9. Спектральный анализ линейного напряжения в распределительной сети 10 кВ

Таблица 5. Сравнение показателей качества электрической энергии в сети 10 кВ при работе ПЧ с неадаптивным ШИМ с допустимыми (ГОСТ 32144-2013) значениями

Показатель качества	Предельно допустимое значение	Фактическое значение
THD,%	8	12,62
Коэффициент гармонических составляющих для гармоник порядка >25		
53	1	2,81
55		3,05
59		2,96
61		8,82
65		6,75
67		2,01
71		1,81
73	1,92	

Таблица 6. Сравнение показателей качества электрической энергии в сети 10 кВ при работе ПЧ с адаптивным ШИМ с допустимыми (ГОСТ 32144-2013) значениями

Показатель качества	Предельно допустимое значение	Фактическое значение
THD, %	8 %	5,12 %
Коэффициент гармонических составляющих для гармоник порядка >25		
35	1%	2,21 %
37		2,56 %
47		2,05 %
49		1,92 %
53		1<%
55		1<%
59		1<%
61		1<%
65		1<%
67		1<%
71	1<%	
73	1<%	

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие предельно допустимые, согласно ГОСТ [11].

Выводы. С ростом строительства комплексных мини-заводов актуальной становится проблема возникновения резонансных явлений в распределительных сетях среднего напряжения с протяженными кабельными линиями. Появление резонанса токов в области генерирования высших гармоник нелинейными потребителями электрической энергии (в том числе, ПЧ с АВ) может привести к критическому снижению показателей качества электрической энергии в распределительной сети.

Существующие способы обеспечения ЭМС сети с электроприемниками принципиально сводятся к двум: грамотное проектирование и эксплуатация электрических сетей и использование различных фильтрокомпенсирующих устройств.

Использование предложенного способа обеспечения ЭМС ПЧ с АВ с питающей сетью с помощью применения адаптивного алгоритма ШИМ позволяет при любой конфигурации сети добиваться наилучшей ЭМС ПЧ с сетью, а также позволяет избежать выходов из строя электрооборудования из-за неправильных оперативных переключений.

Применение адаптивного ШИМ позволяет уменьшить коэффициент нелинейных искажений напряжения сети 10 кВ с 12,62 до 5,12 % благодаря исключению из напряжения ПЧ гармоник, находящихся в области резонансов тока. Следует отметить, что при использовании адаптивного ШИМ в кривой напряжения могут присутствовать высшие гармоники, величина которых находится за пределами, установленными ГОСТ 32144-2013. Однако в целом наблюдается значительное улучшение показателей качества электрической энергии в питающей сети (ТНД напряжения уменьшился в 2,5 раза).

Дальнейшими исследованиями могут являться комбинирование предложенного способа обеспечения ЭМС с существующими, а также анализ влияния усовершенствованного ШИМ на силовую часть ПЧ (нагрев трансформатора и вентилей преобразователя).

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Афанасьев М.Ю. Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего

напряжения систем внутривзаводского электропитания промышленных предприятий // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 51–62.

5. 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. – С. 557–562.

6. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электропитания 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.

7. 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. – С. 1–9.

8. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants / J. Pontt, J. Rodriguez, S. Martin, et. al. // *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*. – 2006. – С. 1298–1302.

9. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 48–52.

10. 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.

11. Маклаков А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 1. – С. 43–50.

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

13. Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30.

References

1. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' aktivnogo vypryamatelya v nesimmetrichnykh rezhimakh raboty [A mathematical model of the active rectifier in unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9.
2. Khramshin, 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.
3. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Bulanov, M.V. Issledovanie parallel'noy raboty avtomatizirovannykh

elektroprivodov prokatnogo stana i dugovoy staleplavil'noy pechi [Investigation into parallel work of rolling mill automated electric drives and an electric arc furnace]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 59–69.

4. Nikolaev, A.A., Khrushin, T.R., Afanas'ev, M.Yu. Issledovanie rezonansnykh yavleniy v raspredelitel'nykh elektrieskikh setyakh srednego napryazheniya sistem vntrizavodskogo elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [A study of resonant phenomena in medium voltage distribution networks of internal power supply systems]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2017, no. 4, pp. 51–62.

5. 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.

6. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khrushin, 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.

7. 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.

8. Pontt, J., Rodriguez, J., Martin, S., Aguilera, R., Bernal, R., Newman, P. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications

Conference Forty-First IAS Annual Meeting, 2006, pp. 1298–1302.

9. Khrushin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov [Evaluation of methods of rolling mill active rectifier voltage PWM]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 48–52.

10. Khrushin, T.R., Khrushin, 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]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2010, issue 1, pp. 221.

11. Maklakov, A.S. Analiz raboty aktivnogo vypryamitelya napryazheniya v rezhimakh kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Analysis of voltage active rectifier in modes of reactive power compensation]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 43–50.

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

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

Николаев Александр Аркадьевич,

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники,

e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Nikolaev Aleksandr Arkadyevich,

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Automated Electric Drive and Mechatronics Department,

e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Буланов Михаил Викторович,

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,

аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,

e-mail: bulanov.m.v@gmail.ru

Bulanov Mikhail Viktorovich,

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Post-Graduate Student of the Automated Electric Drive and Mechatronics Department,

e-mail: bulanov.m.v@gmail.ru

Афанасьев Максим Юрьевич

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,

аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,

e-mail: bulanov.m.v@gmail.ru

Afanasyev Maksim Yuryevich,

Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Post-Graduate Student of the Automated Electric Drive and Mechatronics Department,

e-mail: bulanov.m.v@gmail.ru

Денисевич Александр Сергеевич,
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,
e-mail: denisevich993@mail.ru
Denisevich Aleksandr Sergeyevich,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Post-Graduate Student of the Automated Electric Drive and Mechatronics Department,
e-mail: denisevich993@mail.ru