УДК 621.372.632

Александр Аркадьевич Николаев
ФГБОУВО «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
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Карина Асламбековна Шахбиева
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: karina.shahbieva@yandex.ru

Разработка адаптивного алгоритма ШИМ активного выпрямителя и способа диагностики резонансных явлений во внутризаводских сетях

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время регулируемые электроприводы среднего напряжения чаще всего выполняются на основе преобразователей частоты с активными выпрямителями. В случаях, когда сеть среднего напряжения имеет протяженные кабельные линии, в сети могут возникать неблагоприятные резонансные явления, из-за чего при наложении значимых гармоник тока ПЧ с АВ на резонансную область возникают критические искажения напряжения в распределительной сети. Решением этой проблемы может быть установка специальных фильтров, корректирующих частотную характеристику сети. Однако это требует экспериментального определения частотной характеристики для всех возможных режимов электроснабжения, что на практике является сложной технической задачей. В связи с этим актуальным является исследование адаптивного способа снижения искажений напряжения, вызываемых работой ПЧ, в сетях с резонансными явлениями.
Материалы и методы. При разработке метода диагностики резонансных явлений и усовершенствованного алгоритма ШИМ проанализированы существующие алгоритмы ШИМ, применяемые фирмами-производителями электроприводов с АВ, и использованы известные способы математического моделирования ПЧ и систем электроснабжения. Главным допущением модели является представление инвертора источником тока.
Результаты. Разработан адаптивный способ снижения искажений в сетях с резонансными явлениями, представляющий собой усовершенствованный алгоритм ШИМ, позволяющий исключить из гармонического ряда кривой напряжения АВ группы гармоник, входящих в резонансную область. На имитационной модели системы ПЧ с АВ – сеть среднего напряжения проведен сравнительный анализ работы ПЧ с неадаптивным и адаптивным ШИМ. Установлено, что применение адаптивного алгоритма ШИМ существенно снижает искажения в сети при наличии резонансных явлений.
Выводы. Предложенный способ может быть применен для диагностики резонанса в разных частотных диапазонах в условиях меняющихся режимов электроснабжения. Адаптивный алгоритм может найти применение при проектировании ПЧ с АВ.

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

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

Mikhail Viktorovich Bulanov
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Postgraduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Karina Aslambekovna Shakhbieva
Nosov Magnitogorsk State Technical University, master student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: karina.shahbieva@yandex.ru

© Николаев А.А., Буланов М.В., Шахбиева К.А., 2020.
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 4, с. 44–54.

Development of adaptive PWM algorithm for an active rectifier and a method for diagnosing resonant phenomena in in-plant networks

Abstract

Background. Currently, adjustable medium voltage electric drives are mostly based on frequency converters with active rectifiers. In cases where the medium voltage network has extended cable lines, adverse resonance phenomena can occur in the network, due to which, when significant harmonics of the FC with AR are applied to the resonance region, critical voltage distortions occur in the distribution network. The solution to this problem can be the installation of special filters that correct the frequency response of the network. However, this requires experimental determination of the frequency response for all possible modes of power supply, which is a difficult technical task in practice. Therefore, it is relevant to study an adaptive method of reducing voltage distortions caused by the operation of a FC in networks with resonant phenomena.
Materials and methods. When developing a method for diagnosing resonance phenomena and an improved PWM algorithm, the existing PWM algorithms used by manufacturers of electric drives with AR has been analyzed and the well-known methods of mathematical modeling of frequency converters and power supply systems has been used. The main assumption of the model is representation of the inverter as a current source.
Results. An adaptive method for reducing distortion in networks with resonant phenomena based on improved PWM algorithm that allows excluding from the harmonic series of the voltage curve of the frequency converter the group of harmonics included in the resonance region has been developed. A comparative analysis of the FC with non-adaptive and adaptive PWM has been performed using simulation model of the FC system with AR – medium voltage network. It has been found that the use of the adaptive PWM algorithm significantly reduces the distortion in the network in the presence of resonance phenomena.
Conclusions. Method proposed can be applied to detect in-plant networks resonance in different frequency ranges when power supply mode is changing. Adaptive algorithm can be applied in the design of FC with AR.

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

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.044-054

Введение. Электромагнитная совместимость (ЭМС) мощных электроприводов переменного тока среднего напряжения с преобразователями частоты (ПЧ), такими как главные привода современных прокатных станов в металлургическом производстве, является важной задачей, от решения которой зависит надежность электрооборудования и непрерывность технологического процесса.

ПЧ современных электроприводов прокатных станов имеют, как правило, в своем составе активный выпрямитель (АВ). Применение АВ позволяет улучшить гармонический состав токов (THD_i) за счет использования специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), поддерживать заданное значение напряжения в звене постоянного тока, а также рекуперировать энергию торможения в питающую сеть, повышая общую энергоэффективность технологического процесса.

Использование многопульсных схем выпрямления (12, 18, 24 – пульсации за период пытающего напряжения), которые получают применением фазосдвигающих трансформаторов, также способствует улучшению ЭМС благодаря изменению ряда генерируемых гармоник. Если в классической 6-пульсной схеме ряд гармоник описывается выражением $6n\pm1$, где n – ряд натуральных чисел, то в 12-пульсной схеме ряд гармоник имеет вид $12n\pm1$, в 18-пульсной – $18n\pm1$, в 24-пульсной – $24n\pm1$.

Для улучшения THD_i в электроприводах среднего напряжения с АВ большинство фирм производителей применяют многоуровневую топологию универсальных силовых модулей, которые используются и в выпрямителях и инверторах. Чаще всего применяется трехуровневая топология.

При проектировании мощных электроприводов с АВ также выбирают различные фильтры высших гармоник в зависимости от конфигурации питающей сети. Однако в процессе эксплуатации конфигурация распределительной сети может измениться, например при проведении оперативных переключений на электрической подстанции завода, при проведении модернизаций и реконструкций, а также при

подключении новых приемников электрической энергии.

В сетях среднего напряжения с протяженными кабельными линиями (несколько десятков километров) в результате взаимодействия эквивалентной емкости кабелей и индуктивности сетевого трансформатора могут возникать условия для возникновения резонансных явлений в области гармоник, генерируемых АВ. Чем больше суммарная длина кабельных линий, тем выше шанс появления резонанса в области значимых гармоник. Появление этих резонансов может привести к сильным искажениям напряжения в точке подключения ПЧ [3].

Традиционными способами обеспечения ЕМС в таких ситуациях являются организационные мероприятия, такие как выделение одной секции заводской подстанции для питания нелинейных потребителей электрической энергии (ПЧ), отключение неиспользуемых кабельных линий 6–35 кВ от шин распределительных устройств, грамотное проведение оперативных переключений на главной понизительной подстанции, исключающие одновременное включение ПЧ и протяженных кабельных линий.

Также для обеспечения ЭМС могут быть применены специальные фильтры, состоящие из конденсаторных батарей и малой индуктивности реактора, которые обеспечивают смещение резонансной области в низкочастотную область и уменьшение экстремума частотной характеристики сети [1, 3].

Альтернативным способом обеспечения ЭМС ПЧ с питающей сетью может являться использование адаптивных алгоритмов ШИМ АВ, исключающих из кривой тока, потребляемого АВ из сети, гармоники, расположенные в резонансной области частотной характеристики сети.

Для корректного функционирования адаптивных алгоритмов ШИМ необходимо разработать способ диагностики резонансных явлений во внутризаводских сетях 6–35 кВ, позволяющий осуществлять быстрое и точное определение расположения резонанса за счет тестовых воздействий АВ на питающую сеть.

Материалы и методы. Наиболее часто применяемая в ПЧ большой мощности трехуровневая топология АВ представлена на рис. 1. Каждая фаза активного выпрямителя выполнена с помощью последовательного соединения четырех высоковольтных вентилей (на рис. 1 в качестве вентилей изображены транзисторы), средняя точка которых подключается к вторичной обмотке согласующего трансформатора, крайние точки – к положительной и отрицательной шинам звена постоянного тока, при этом промежуточные точки с помощью двух дополнительных диодов присоединены к средней точке двух конденсаторов. Подобное решение позволяет использовать вентили класса $U_d/2$ за счет того, что к каждому вентилю прикладывается лишь половина номинального напряжения звена постоянного тока.

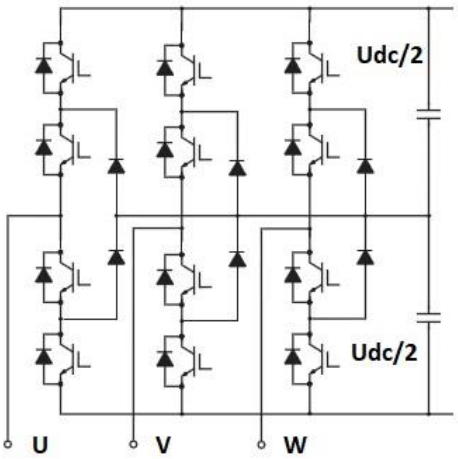

Рис. 1. Электрическая схема универсального силового модуля ПЧ с АВ

В таких ПЧ с АВ применяются специальные алгоритмы ШИМ, например ШИМ с фиксированными углами переключения вентилей FixedPulsePatternControl (FPPPWM) или ШИМ с удалением выделенных гармоник SelectiveHarmonicElimination (SHEPWM).

Особенностью FixedPulsePatternControl является минимизация суммарного коэффициента искажения кривой тока (THD_i), благодаря чему отсутствует необходимость во входном фильтре и возможно применение простой 6-пульсной схемы выпрямления. При этом присутствуют гармоники в напряжении АВ в областях 5–13 и 53–73 гармоник.

Особенностью алгоритма Selective HarmonicElimination является формирование таких углов переключения вентилей, при которых удаляются некоторые значимые гармоники в напряжении. Каждое дополнительное переключение вентилей АВ позволяет убрать из спектра одну гармонику. Например, при 6-пульсной схеме выпрямления и частоте коммутации 250 Гц

(пять переключений за четверть периода питающего напряжения) можно удалить 5, 7 и 11, 13 гармоники. Преобразователи, использующие данный алгоритм ШИМ, часто выполняются по многопульсной схеме выпрямления, с числом пульсаций 12, 18, 24 импульса за период питающего напряжения. В таких схемах гармонический состав потребляемых токов будет описываться выражением $P{\cdot}n(\pm1)$, где P – число пульсаций за период питающего напряжения.

Способ диагностики резонансных явлений во внутризаводских сетях 6–35 кВ за счет тестовых воздействий ПЧ с АВ. Для определения наличия резонансных явлений в распределительных сетях 6–36 кВ необходим анализ частотной характеристики сети. Частотная характеристика представляет собой зависимость полного комплексного сопротивления (импеданса) сети от частоты (номера гармоники). Указанную зависимость возможно получить двумя способами: расчетным путем, опираясь на параметры сетевого трансформатора, кабельных линий и т.д., а также экспериментальным путем. Во втором случае среди потребителей, подключенных к исследуемой сети, должен присутствовать активный элемент, генерирующий в сеть высшие гармоники тока, под действием которых с учетом нелинейного импеданса возникают высшие гармоники напряжения. Их соотношение позволяет экспериментально определить частотную характеристику сети $Z(f)$.

В нашем случае в качестве такого активного элемента выступает преобразователь частоты с АВ. С помощью АВ можно сделать тестовое воздействие на питающую сеть при отсутствии нагрузки на преобразователь (в режиме холостого хода). В результате воздействия несинусоидального тока АВ в напряжении сети должен появиться отклик соответствующего гармонического состава, благодаря чему возможно экспериментально восстановить частотную характеристику питающей сети путем нахождения отношений

$$Z_{(i)} = \frac{U_{m(i)}}{I_{m(i)}}, \qquad (1)$$

где $Z_{(i)}$ – значение импеданса питающей сети на частоте i-й гармоники; $U_{m(i)}$, $I_{m(i)}$ – амплитуды напряжения и тока на частоте i-й гармоники.

Для повышения точности анализа частотной характеристики необходимо уменьшение безтоковых интервалов в ряде Фурье, что можно достичь за счет использования только одного 6-пульсного выпрямительного модуля. Однако такой источник высших гармоник содержит неполный спектр нечетных гармоник напряжения, описываемый по формуле $6{\cdot}n(\pm1)$, т.е. в нем отсутствуют гармоники, кратные трем. Кроме того, некоторые гармоники либо отсутствуют (например, при SelectiveHarmonicElimination), либо их амплитуда очень мала (некоторые гармоники при FixedPulsePatternControl), что затрудняет нахождение значений импеданса сети $Z_{(i)}$ на данных частотах (рис. 2, 3). По причине этого точность экспериментального определения частотной характеристики сети будет невысокой.

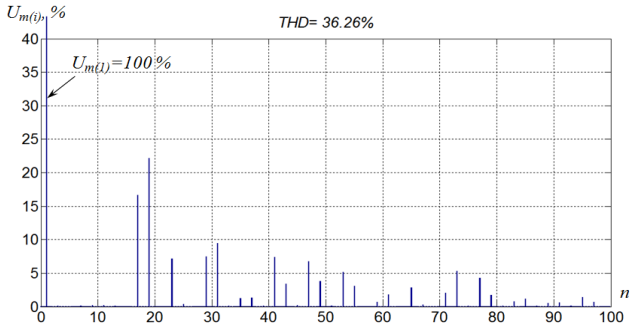

Рис. 2. Гармонический состав напряжения на входе АВ при использовании SelectiveHarmonic Elimination

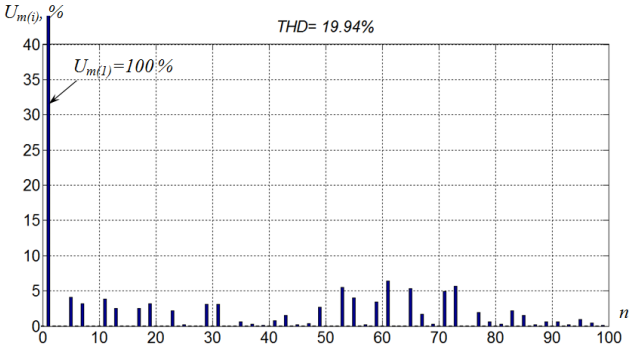

Рис. 3. Гармонический состав напряжения на входе АВ при использовании Fixed Pulse Pattern Control

Для более точного определения $Z(f)$ необходимо, чтобы гармонический состав напряжения АВ был более широким. Этого можно добиться изменением алгоритма коммутации вентилей. Если обеспечить перекос (несимметрию) фазных токов, например не подавая на вентили одной из фаз импульсы управления, либо коммутируя

вентили двух или одной фазы только на нулевую точку звена постоянного тока, можно получить в фазном токе высшие гармоники, кратные трем. Одновременно оптимальным решением будет уменьшить частоту коммутации АВ до 50 Гц (одно переключение за четверть периода) для обеспечения наибольшего THD_v (рис. 4).

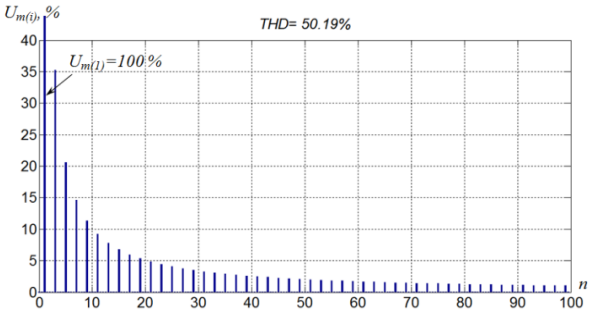

Рис. 4. Гармонический состав напряжения на входе АВ при частоте коммутации 50 Гц и перекосе фаз

В программном продукте MATLAB с приложение Simulink была создана имитационная модель системы сеть с резонансом – АВ. Было проведено моделирование тестового воздействия АВ на сеть с использованием стандартных алгоритмов ШИМ и модифицированного тестового алгоритма коммутации АВ для трех различных резонансов, с экстремумом на частотах гармоник с номерами n = 20, 50 и 80 (низкочастотная, среднечастотная и высокочастотная области) (рис. 5,а,б,в).

При использовании стандартных алгоритмов ШИМ был получен практически идентичный результат за исключением участков, где не наблюдается отклик в напряжении сети, усреднение которого представлено на рис. 6. При применении тестового алгоритма удалось снизить суммарное значение среднеквадратичной ошибки $\Delta z_{(f)}$ примерно в 1,5 раза (рис. 7):

$$\Delta z_{(f)} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N} (z_{Act(i)} - z_{Mod(i)})^2}, \qquad (2)$$

где N – общее число сравниваемых значений фактического $z_{Act(i)}$ и моделируемого $z_{Mod(i)}$ импедансов сети на различных участках, соответствующих i-му опыту.

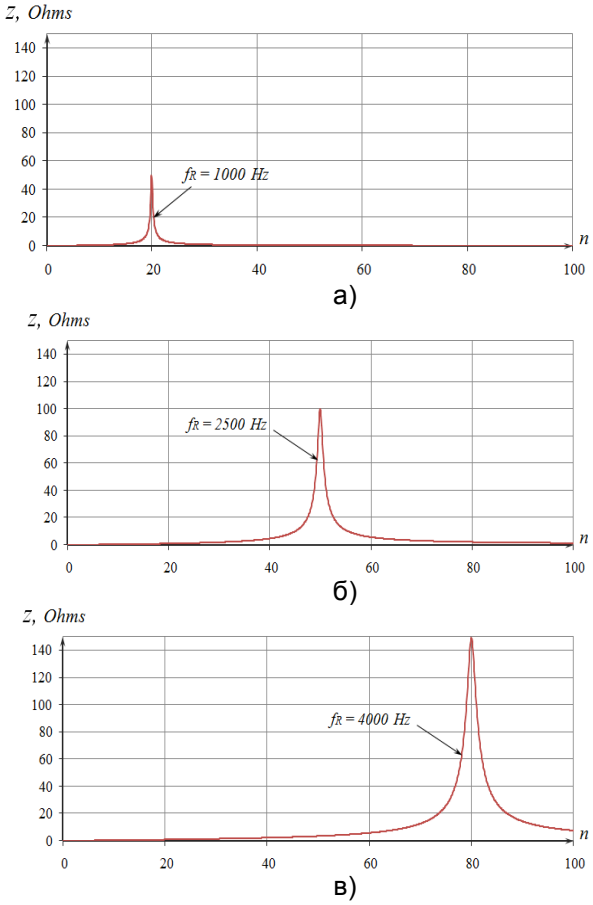

Рис. 5. Моделируемые резонансы в различных частотных диапазонах: а – низкочастотная область; б – среднечастотная область; в – высокочастотная область

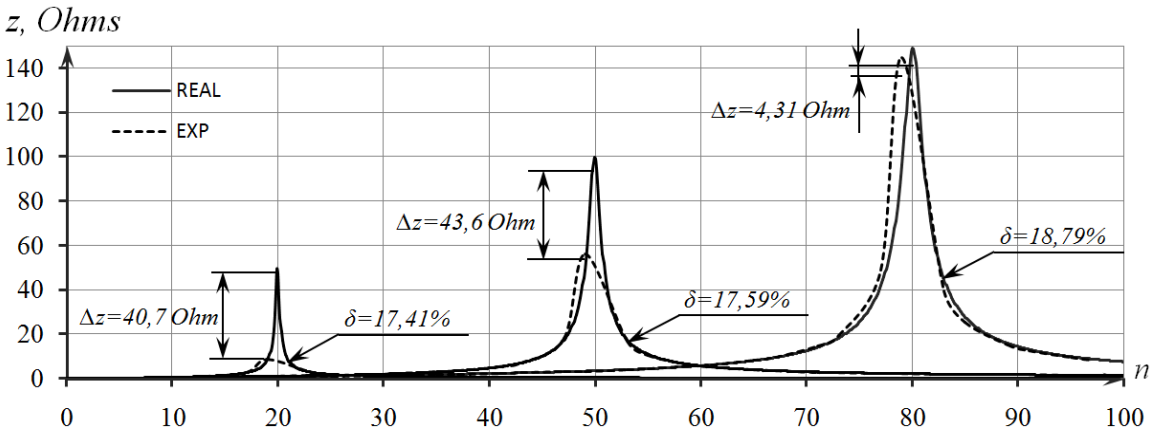

Рис. 6. Результат тестового воздействия стандартных алгоритмов ШИМ

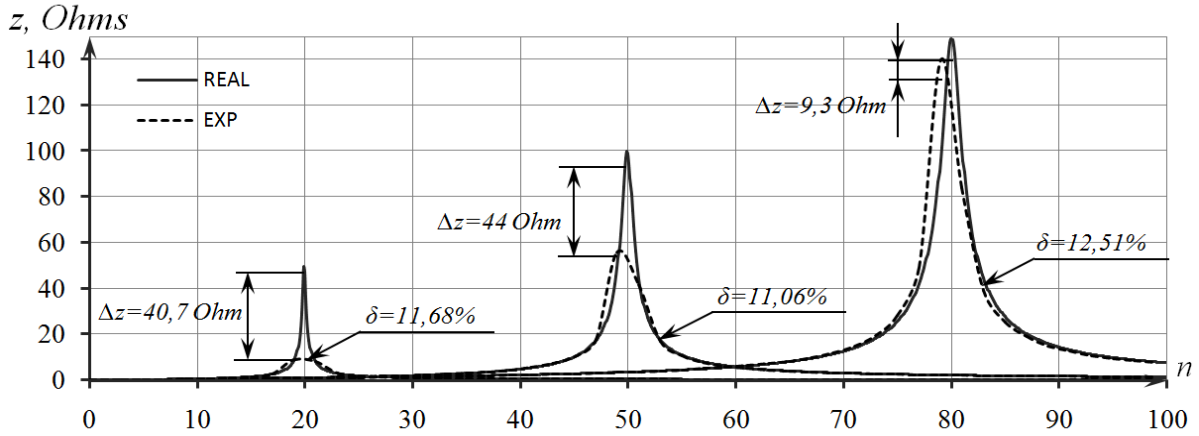

Рис. 7. Результат тестового воздействия при применении тестового алгоритма коммутации АВ

Суммарные значения среднеквадратичной ошибки сведены в табл. 1.

Таблица 1. **Сравнение ошибки при экспериментальном определении частотной характеристики**

Алгоритм	Область резонанса			
	1000 Гц	2500 Гц	4000 Гц	Среднее значение
FixedPulse	17,41 %	17,59 %	18,79 %	17,93 %
Selective	17,41 %	17,59 %	18,79 %	17,93 %
Test algorithm	11,68 %	11,06 %	12,51 %	11,75 %

Анализ данных табл. 1 показывает, что использование тестового воздействия АВ со специальным алгоритмом ШИМ позволяет обеспечить приемлемую точность диагностики расположения резонанса в частотной характеристике питающей сети. Такой метод делает возможным корректное функционирование разработанного алгоритма ШИМ с функцией адаптации к резонансным явлениям в условиях изменяющихся режимов внутризаводского электроснабжения.

Усовершенствованный алгоритм ШИМ уже был рассмотрен на основе FixedPulsePatternControl, ниже рассматривается усовершенствованный способ повышения качества напряжения в условиях наличия резонансных явлений на основе наиболее распространенного алгоритма ШИМ SelectiveHarmonicElimination (SHEPWM) [4].

Математические основы SHEPWM. Помимо возможности удаления выделенных гармоник, SHEPWM позволяет обеспечивать уровень первой гармоники выходного напряжения на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции:

$$U_m = (2/\pi)u_{dc}\,m, \tag{3}$$

где m – коэффициент модуляции; U_m – амплитуда первой гармоники фазного напряжения; u_{dc} – напряжение звена постоянного тока.

Разложение в ряд Фурье фазного напряжения AR выглядит следующим образом:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty}(U_m \cdot \sin(n \cdot \omega t), \tag{4}$$

где U_m определяется уравнением

$$U_m = \frac{4}{\pi}\int_0^{\pi/2} u(\omega t)\cdot \sin(n\cdot\omega t)d(\omega t) = \\ = \frac{4}{\pi n}\frac{u_{dc}}{2}\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cdot \cos(n\cdot a_k), \tag{5}$$

где a_k – угол переключения при удалении гармоники с номером k из фазного напряжения.

Подставив (5) в (4), получим уравнение для фазного напряжения AR в следующем виде:

$$u = \sum_{n=1,3,\ldots,\infty}^{\infty}\frac{2u_{dc}}{\pi n}\left[\sum_{i=1}^{N}(-1)^{i+1}\cdot\cos(n\cdot a_i)\right]\times \\ \times\sin(\omega t\cdot n). \tag{6}$$

Анализ выражения (6) позволяет определить связь между углами переключений и спектральным составом выходного напряжения посредством системы нелинейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cdot \cos(a_k) = \frac{\pi}{4}\frac{2}{u_{dc}}U_m;$$
$$\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cdot \cos(n \cdot a_k) = 0,\ n = 5,7,11,... \quad (7)$$

Подставим в уравнение (7) коэффициент модуляции, выраженный через (3), при условии $m \in [0;1]$, после чего получим:

$$\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cdot \cos(a_k) = m;$$
$$\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cdot \cos(n \cdot a_k) = 0,\ n = 5,7,11,... \quad (8)$$

Нелинейная система (8) имеет несколько решений в зависимости от начального приближения. Для отыскания всех возможных решений используется метод перебора начальных приближений. Среди полученных результатов выделяют варианты, удовлетворяющие условию

$$0 < a_1 < a_2 < ... < a_N < \pi/2. \quad (9)$$

Результаты исследования работы алгоритма на основе SHEPWM с адаптацией к резонансным явлениям в сети. Алгоритм SHEPWM с адаптацией к резонансным явлениям в сети был реализован для классической 6-пульсной схемы выпрямления, поскольку эта схема имеет наиболее низкий ЕМС, по сравнению с многопульсными схемами.

Суть реализованного алгоритма заключается в выборе набора углов переключения в зависимости от расположения экстремума частотной характеристики питающей сети среднего напряжения и его амплитуды. Благодаря выбору оптимальных групп гармоник, подлежащих исключению из гармонического ряда кривой напряжения AR, удается существенно уменьшить влияние FC на питающую сеть.

Для реализации адаптивного алгоритма ШИМ на основе SelectiveHarmonic Elimination были рассчитаны углы переключения для исключения целого ряда групп гармоник (табл. 2).

Для соответствующих гармоник были рассчитаны углы переключения в зависимости от коэффициента модуляции m.

В программном продукте MATLAB Simulink с библиотекой SimPowerSystems была собрана математическая модель преобразователя частоты среднего напряжения 3,15 кВ и сети среднего напряжения 10 кВ с резонансом токов (рис. 8).

Таблица 2. **Группы исключаемых гармоник**

№ группы	Номера гармоник			
1	5	7	11	13
2	11	13	17	19
3	17	19	23	25
4	23	25	29	31
5	29	31	35	37
6	35	37	41	43
7	41	43	47	49
8	47	49	53	55
9	53	55	59	61
10	59	61	65	67
11	65	67	71	73
12	71	73	77	79
13	77	79	83	85
14	83	85	89	91
15	89	91	95	97

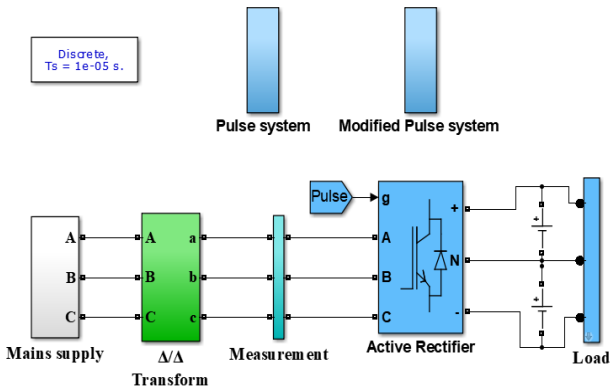

Рис. 8. Исследуемая иммитационная модель сеть – преобразователь частоты

В блоке **Mains supply** реализована питающая сеть с последовательными резонансами для трех частот: 1000, 2500, 4000 Гц (рис. 9).

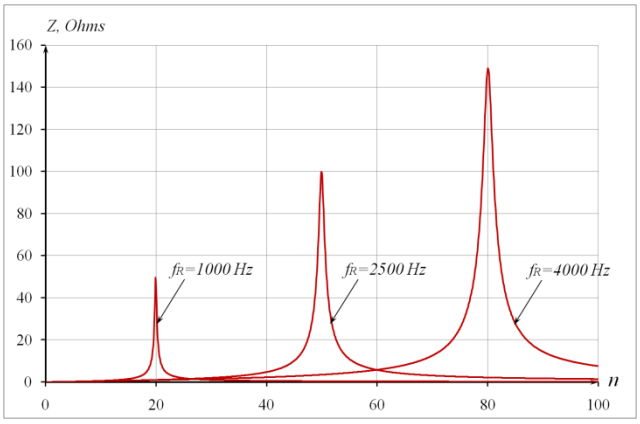

Рис. 9. Моделируемые резонансы в низкочастотной 1000 Гц, среднечастотной 2500 Гц и высокочастотной 4000 Гц областях

Блок **Δ/Δ Transform** реализует параметры схемы замещения согласующего трансформатора 10/3,15 кВ. Блок **Measurement** производит измерение электрических параметров, необходимых для работы **ActiveRectifier**. В блоках **Pulsesystem** и **ModifiedPulsesystem** реализованы алгоритмы переключения вентилей **ActiveRectifier.**

Блок **ModifiedPulsesystem** производит отслеживание расположения резонанса токов в питающей сети, анализируя ток и напряжение в сети 10 кВ, и при необходимости изменяет группу гармоник, подлежащую исключению. Таким образом, из области резонанса исключаются гармоники тока, потребляемые АВ.

С помощью математической модели был произведен анализ гармонических составляющих линейного напряжения сети 10 кВ и напряжения на входе AR при использовании SelectiveHarmonicElimination и SHEPWM с адаптацией к резонансным явлениям в сети для трех различных резонансов с экстремумом на частотах гармоник с номерами n = 20, 50 и 80 (рис. 10, 11, 12).

Анализ полученных результатов показывает, что при расположении резонанса в высокочастотной области использование усовершенствованного алгоритма ШИМ становится нецелесообразным, поэтому экспериментально был определен номер гармоники (n = 67), до которой использование адаптивного ШИМ имеет смысл (рис. 13).

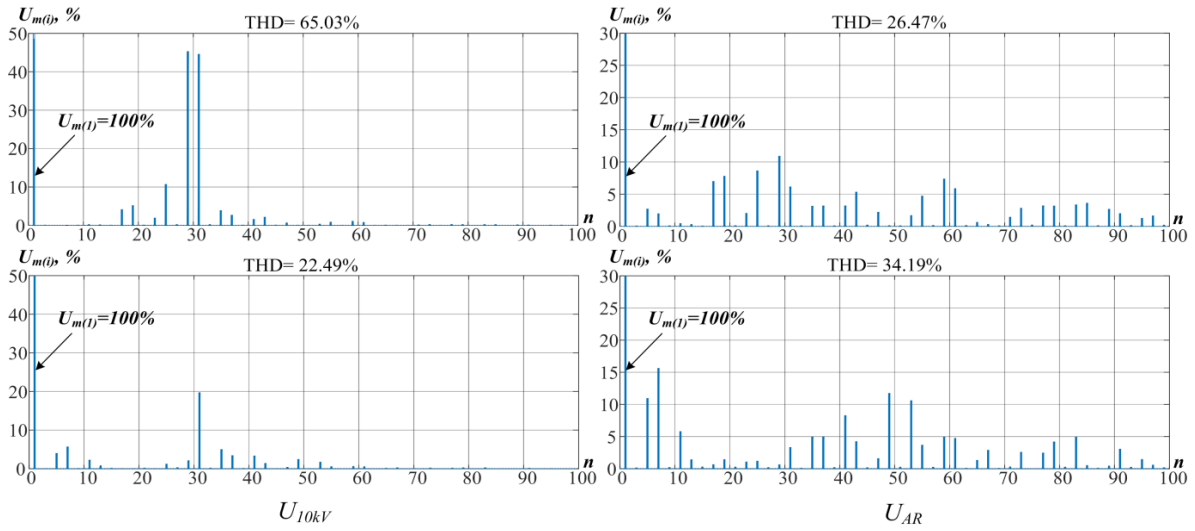

Рис. 10. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при наличии резонанса в низкочастотной области

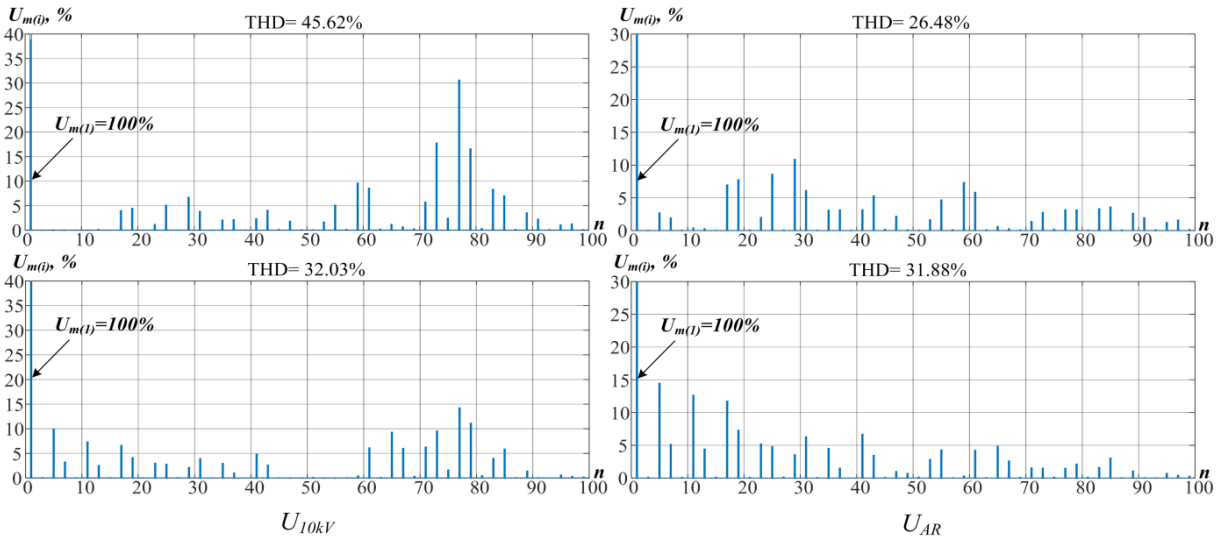

Рис. 11. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при наличии резонанса в среднечастотной области

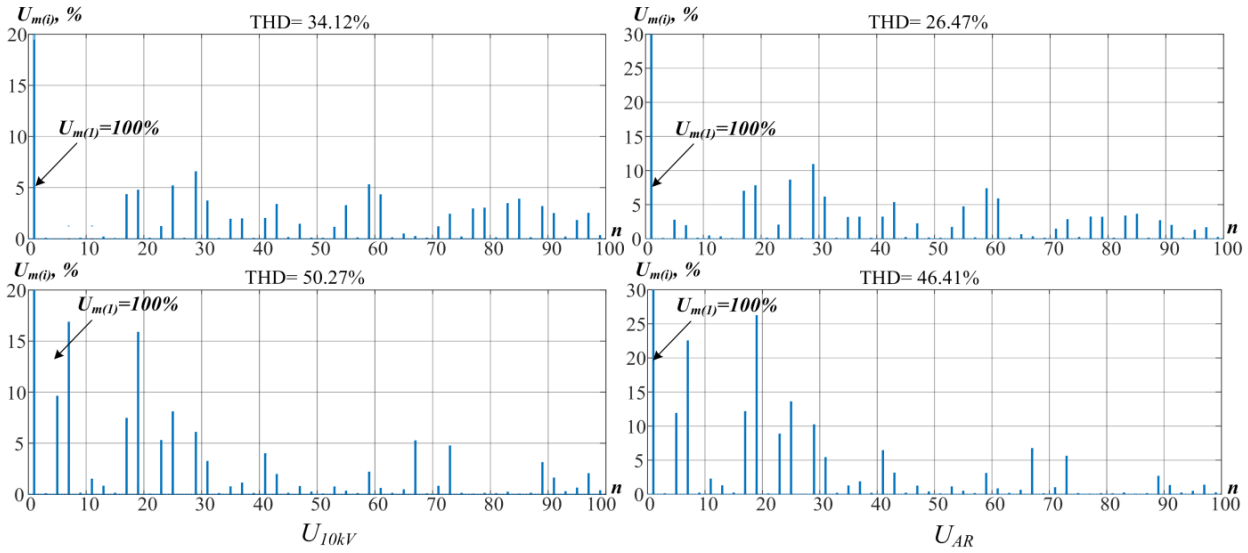

Рис. 12. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при наличии резонанса в высокочастотной области

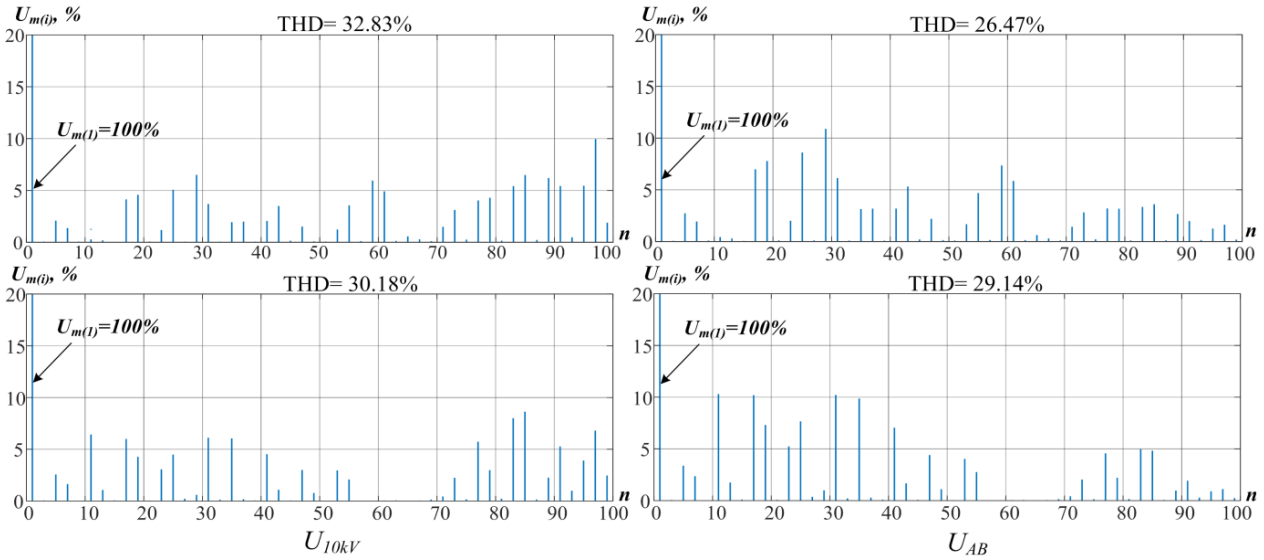

Рис. 13. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при резонансе с экстремумом на 67 гармонике

Значения коэффициентов гармонических искажений линейного напряжения сети 10 кВ сведены в табл. 3.

Таблица 3. **Сравнение коэффициентов гармонических искажений при адаптивном алгоритме ШИМ по напряжению в сети 10 кВ**

Алгоритм	Область резонанса		
	1000 Гц	2500 Гц	4000 Гц
SHEPWM	65,03 %	45,62 %	34,12 %
Адаптивный SHEPWM	22,49 %	32,03 %	50,27 %

Выводы. Наличие в системах электроснабжения металлургических предприятий протяженных распределительных сетей среднего напряжения с высоким значением эквивалентной емкости кабельных линий создает условия для появления резонансов токов в области генерирования гармоник мощными преобразователями частоты с активными выпрямителями. Данное обстоятельство является одним из факторов, отрицательно влияющих на электромагнитную совместимость преобразователей частоты с распределительной сетью.

Для обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ с АВ с питающей сетью в условиях наличия резонансных явлений применяются различные организационные и технические мероприятия, такие как грамотная организация режимов электроснабжения различных групп электроприемников с питанием от отдельных секций шин

и использование специализированных компенсирующих устройств.

Альтернативным способом исключения негативного влияния резонансных явлений на электромагнитную совместимость ПЧ с АВ с питающей сетью является применение адаптивных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей, исключающих генерирование высших гармоник в области резонанса.

Предложенный алгоритм ШИМ с адаптацией к резонансным явлениям в сети заключается в выборе специализированного набора углов переключения ключей АВ, что позволяет исключить из гармонического ряда кривой напряжения в точке подключения преобразователя оптимальные группы гармоник, входящих в опасный частотный диапазон. Применение данного алгоритма в распределительных сетях среднего напряжения с наличием резонансных явлений в низкочастотной и среднечастотной областях позволяет существенно улучшить гармонический состав напряжения сети и обеспечить электромагнитную совместимость мощных ПЧ с АВ с питающей сетью.

Для исключения ухудшения качества электроэнергии при расположении резонанса в высокочастотной области ($f_{min} \le f \le f_{max}$), помимо модифицированного алгоритма SHEPWM, должны применяться дополнительные технические мероприятия в виде установки фильтрокомпенсирующих устройств, осуществляющих коррекцию частотной характеристики сети $z(f)$.

Для корректного функционирования адаптивного алгоритма ШИМ ПЧ с АВ необходимо применять оперативную диагностику частотной характеристики питающей сети при любых изменениях режимов внутризаводского электроснабжения и режимов работы других электроприемников, включая компенсирующие устройства.

Предложенный способ оперативной диагностики частотной характеристики распределительной сети 6–35 кВ системы внутризаводского электроснабжения заключается в использовании специализированных алгоритмов переключения ключей АВ, обеспечивающих формирование широкого спектра гармоник в потребляемом токе выпрямительного модуля для последующего анализа изменения гармонического состава напряжения в точке подключения преобразователя. Применение данного способа позволяет определять опасные частотные диапазоны с резонансами токов для выполнения необходимой настройки адаптивных алгоритмов ШИМ АВ в целях обеспечения наилучшего гармонического состава напряжения сети.

Список литературы

1. **Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Афанасьев М.Ю.** Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутризаводского электроснабжения промышленных предприятий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 51–62.

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

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. **Разработка** усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутризаводской сети / А.А. Николаев, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, А.С. Денисевич // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 47–56.

5. **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.

6. **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.

7. **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.

8. **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.

9. **Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П.** Расчет электромагнитных процессов в трехфазном трехуровневом инверторе напряжения // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – Вып. 1. – С. 221.

10. **O'Brien K., Teichmann R., Bernet S.** Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposi-

tion, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. – 2001. – P. 557–562.

11. **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.

12. **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.

13. **Celanovic N., Boroyevich D.** A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – P. 637–641.

14. **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.

References

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

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

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. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Afanas'ev, M.Yu., Denisevich, A.S. Razrabotka usovershenstvovannogo algoritma ShIM aktivnogo vypryamitelya s adaptatsiey 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 IGEU*, 2018, issue 6, pp. 47–56.

5. 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.

6. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Bulanov, M.V. Issledovanie parallel'noy raboty avtomatizirovannykh elektroprivodov prokatnogo 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.

7. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khramshin, 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.

8. 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.

9. Khramshin, T.R., Khramshin, 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 kompleksy*, 2010, issue 1, p. 221.

10. 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.

11. 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 back to back converter]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 23–30.

12. Khramshin, 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.

13. 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.

14. 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.