

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.02

УДК 621.372.632

А.С. Маклаков<sup>1</sup>, Т.А. Лисовская<sup>2</sup>, Т. Цзин<sup>3</sup><sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия<sup>3</sup>Китайский университет Цзиляна, Ханчжоу, Китай

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ТОКА 18-ПУЛЬСНОЙ СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТРЁХУРОВНЕВЫХ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Совершенствование алгоритмов преобразования электроэнергии силовыми полупроводниковыми преобразователями является наиболее эффективным способом обеспечения требуемого качества напряжения в точке их подключения к питающей сети. Статья посвящена анализу гармонических искажений токов в 18-пульсной схеме подключения трёх трёхуровневых активных выпрямителей напряжения (АВН) с запрограммированной формой переменного напряжения. В качестве исследуемого объекта для получения исходных данных и анализа качества токов была выбрана силовая схема главного электропривода рабочих валков прокатной клетки толстолистового стана. Особенностью данной схемы является то, что синхронный двигатель каждого рабочего вала подключается к питающей сети на основе трёх фазосдвигающих трансформаторов со сдвигами вторичных напряжений  $0^\circ$  (треугольник/треугольник),  $20^\circ$  (треугольник/многоугольник) и  $-20^\circ$  (треугольник/многоугольник). В период промышленной эксплуатации объекта наблюдались периодические перегревы фазосдвигающих трансформаторов. На момент возникновения перегревов применялась форма переменного напряжения АВН с удалением 17 и 19 гармоник. **Цель исследования:** провести анализ причины возникновения и предложить рекомендации по снижению перегревов трансформаторов. **Методы:** с помощью программного обеспечения MatLab/Simulink разработана имитационная модель объекта исследования для оценки параметров качества электроэнергии. **Результаты:** проведена оценка коэффициентов нелинейных искажений и коэффициентов гармоник в спектрах токов вторичных обмоток трансформаторов и сети при трёх запрограммированных формах переменного напряжения АВН. Анализ полученных результатов определил наилучшую форму напряжения АВН с удалением 5, 7, 17 и 19 гармоник для снижения нагрева фазосдвигающих трансформаторов. **Практическая значимость:** представленные результаты и методика могут быть использованы для повышения эффективности преобразования электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости.

**Ключевые слова:** силовая электроника, широтно-импульсная модуляция, преобразователь, предварительно запрограммированная ШИМ, удаление выделенных гармоник.

**A.S. Maklakov<sup>1</sup>, T.A. Lisovskaya<sup>2</sup>, T. Jing<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>China Jiliang University, Hangzhou, China

## **RESEARCH OF CURRENT SPECTRUM IN 18-PULSE GRID CONNECTION OF THREE-LEVEL ACTIVE FRONT-END RECTIFIERS**

Improving the modulation algorithms of power converters is the most effective way to ensure the required voltage quality at the point of their connection to the grid. The article is devoted to analyze harmonic current spectrum in an 18-pulse connection circuit at three three-level active voltage rectifiers (AFE) with a programmed voltage waveform. A power circuit of a main electric drive of a plate mill rolling stand was chosen as a study object to obtain an initial data and analyze current quality. A feature of this scheme is that the synchronous motor of each work roll is connected to the grid based on three phase-shifting transformers with secondary voltage shifts – 0° (triangle/triangle), 20° (triangle/polygon) and -20° (triangle/polygon). A periodic overheating of the phase-shifting transformers was observed during the industrial operation. At the time of overheating, the AFE voltage waveform was used with the 17th and 19th harmonic elimination. **Purpose:** analyze the causes of occurrence and offer recommendations to reduce overheating of transformers. **Methods:** a simulation model was developed to assess the parameters of power quality using the Matlab/Simulink software. **Results:** it allows to estimate the coefficients of non-linear distortion and harmonic coefficients in the current spectrum of the transformer secondary windings and the grid at four programmed AFE voltage waveforms. The analysis of the obtained results determined the best waveform with 5, 7, 17 and 19 harmonic elimination to reduce the overheating of phase-shifting transformers. **Practical relevance:** the presented results and the method can be used to conduct identical studies in other AFE circuits to improve the efficiency and power quality.

**Keywords:** power electronics, pulse-width modulation, power converters, programmable pulse-width modulation, selective harmonic elimination.

### **Введение**

В настоящее время получили широкое распространение многопульсные схемы подключения к питающей сети для питания энерго-сберегающих частотно-регулируемых электроприводов переменного тока большой мощности [1–3]. Многопульсные схемы являются простым и эффективным способом снижения влияния работы силовых полупроводниковых преобразователей на показатели качества питающего напряжения [4–6]. При сравнении с 6-пульсными схемами они имеют два главных преимущества:

- 1) низкий коэффициент суммарных гармонических искажений (THD);
- 2) низкие коэффициенты отдельных гармонических составляющих напряжений и токов.

В свою очередь, преобразователи частоты в системах энергосберегающего электропривода большой мощности имеют в своей структуре трёхуровневые активные выпрямители напряжения (АВН) и трёхуровневые автономные инверторы напряжения (АИН), которые обеспечивают [7–9]:

- 1) рекуперацию электрической энергии в питающую сеть в тормозных режимах электропривода;
- 2) поддержание нулевого сдвига первой гармоники тока по отношению к входному напряжению;
- 3) компенсацию реактивной мощности в точке подключения к питающей сети;
- 4) обеспечение норм международных стандартов качества напряжения и потребляемого тока в диапазоне низких и средних частот.

Несмотря на широкое распространение и большое количество научных трудов в области обеспечения электромагнитной совместимости рассматриваемых систем энергосберегающего электропривода большой мощности, обеспечение надлежащего качества питающего напряжения остаётся актуальной задачей. Обзор литературы показал, что в данной проблемной области актуальны следующие технические решения [10–16]:

- 1) применение многопульсных схем подключения к питающей сети на основе многообмоточных фазосдвигающих трансформаторов и параллельного соединения преобразователей;
- 2) применение предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых последовательностей переключений полупроводниковых модулей АВН для удаления или ослабления выделенных гармоник;
- 3) использование пассивных фильтров;
- 4) подключение энергосберегающих электроприводов большой мощности к отдельной подстанции.

В диапазоне больших мощностей (свыше 1 МВт) и среднего напряжения (3,3–10 кВ) возникает необходимость в ограничении частоты переключений полупроводниковых ключей преобразователей на уровне порядка 500 Гц [17–19]. В таких условиях только запрограммированная ШИМ способна модулировать форму переменного напряжения преобразователя с приемлемой электромагнитной совместимостью с питающей сетью.

## **Постановка проблемы**

В период промышленной эксплуатации действующих систем энергосберегающего электропривода большой мощности на основе многопульсных схем подключения возникают перегревы понизительных фазосдвигающих трансформаторов.

Данная проблема была зафиксирована на главном электроприводе прокатной клетки металлургического толстолистового реверсивного прокатного стана. Предварительный анализ проблемы показал, что основная причина возникновения перегревов связана с качеством тока на входе АВН. На момент возникновения перегревов применялась запрограммированная форма переменного напряжения АВН с удалением 17 и 19 гармоник. Обзор проведенных ранее исследований 18-пульсных схем подключения к сети на основе АВН показал отсутствие подробного анализа данной проблемы.

## **Цель работы**

Цель статьи состоит в исследовании спектров тока 18-пульсной схемы подключения трёхуровневых АВН при различных предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых последовательностях переключений полупроводниковых модулей. Для достижения данной цели разработана имитационная модель объекта исследования с использованием аппарата передаточных функций и структурного моделирования в математическом пакете MatLab/Simulink.

## **Описание объекта исследования**

Объектом исследования является главный электропривод прокатной клетки толстолистового стана. На рис. 1 изображены основные элементы его силовой схемы.

Основные технические данные двигателей представлены в табл. 1. Управление каждым двигателем осуществляется с помощью трёх параллельно соединенных преобразователей частоты (ПЧ) с трёхуровневыми АВН. Основные технические данные АВН представлены в табл. 2. Особенностью схемы является то, что ПЧ подключаются к питающей сети по 18-пульсной схеме, выполненной на основе трёх отдельных фазосдвигающих трансформаторов со сдвигами вторичных напряжений  $0^\circ$  (треугольник/треугольник),  $+20^\circ$  (треугольник/многоугольник) и  $-20^\circ$  (треугольник/многоугольник). Технические параметры трансформаторов одинаковые и представлены в табл. 3.

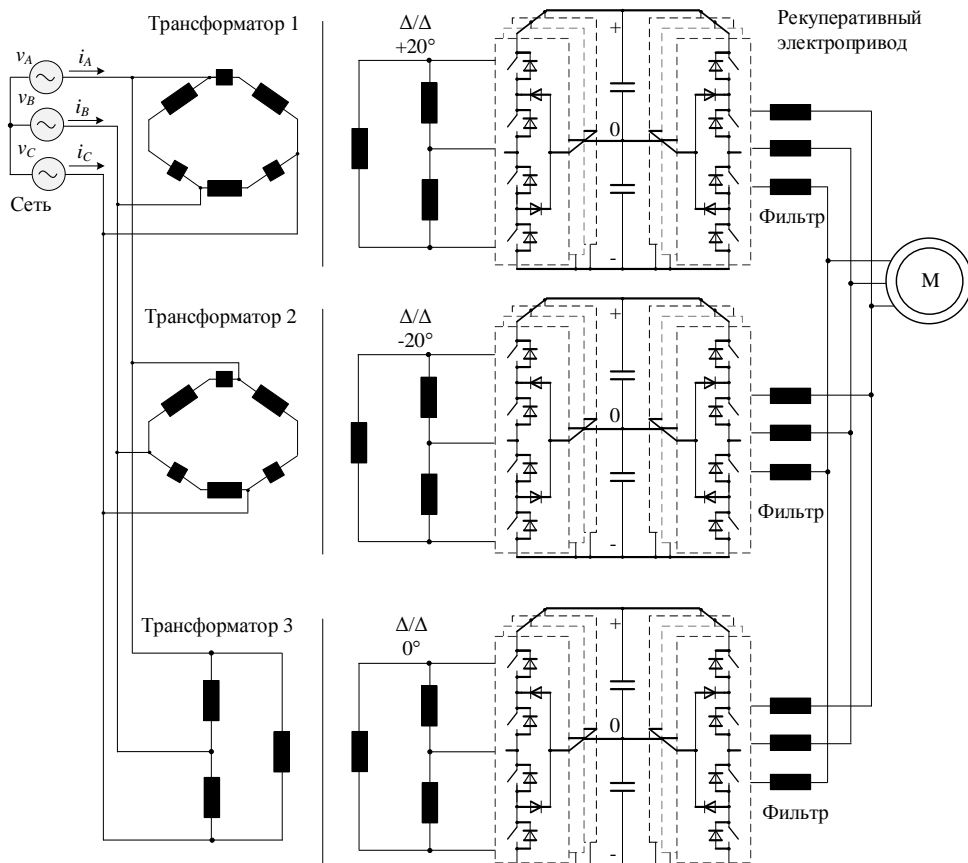


Рис. 1. Силовая схема подключения объекта исследования

Многопульсные схемы подключения применяются для наращивания суммарной мощности и обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей электрической энергии. 18-пульсная схема подключения исследуемого объекта имеет значимыми только коэффициенты  $18n \pm 1$  ( $n = 1, 2, \dots, \infty$ ) гармонических составляющих потребляемого тока. Это достигается благодаря сдвигу первых гармоник вторичных напряжений фазосдвигающих трансформаторов на  $0^\circ$  и  $\pm 20^\circ$ .

Таблица 1

Основные технические данные двигателей (Motor specifications)

$U_n$ , В	$I_n$ , А	$f_n$ , Гц	$P_n$ , МВт	$\cos(\varphi)$	$R_l$ , мОм	$L_l$ , мГн
3300	2460	10	12	1	9,54	32,15

Таблица 2

Основные технические данные трёхуровневых АВН  
(Three-level AFE specifications)

$U_{н}, В$	$I_{н}, А$	$U_{dсн}, В$	$f_{sw}, Гц$	$P_{н}, МВт$	КПД <sub>н</sub> , %	$C_{dc}, мкФ$
3300	800	5020	350	8,4	98	6341,54

Таблица 3

Основные технические данные фазосдвигающих трансформаторов  $0^\circ$ ,  $+20^\circ$  и  $-20^\circ$  (Parameters of phase-shift transformers:  $0^\circ$ ,  $+20^\circ$  and  $-20^\circ$ )

$S_{ном}, МВАР$	$U_{1ном}, кВ$	$U_{2ном}, кВ$	$I_{1ном}, А$	$I_{2ном}, А$	$U_{кз}, \%$	$\Delta P_{кз}, кВт$	$\Delta P_{xx}, кВт$
5,7	10	3,3	329,1	997.2	16	55	4,9

### Предварительно запрограммированная ШИМ

Типовая форма переменного напряжения с четвертьволновой симметрией трехуровневого преобразователя при запрограммированной ШИМ показана на рис. 2.

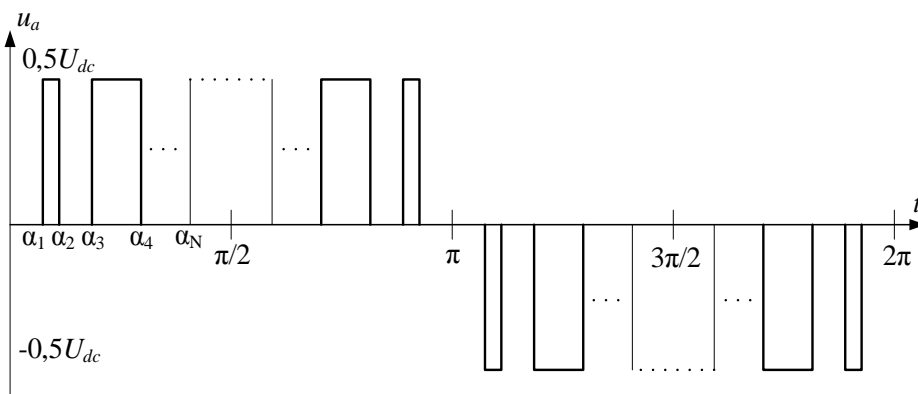


Рис. 2. Типовая форма сигнала фазной ЭДС АВН с запрограммированной ШИМ  
(Pre-programmed PWM waveform of three-level AFE)

Запрограммированная форма задается переключением полупроводниковых модулей в заранее заданные моменты времени углами переключений  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$  в количестве  $N$  штук за четверть периода в интервале от 0 до  $\pi/2$  при условии, что  $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \pi/2$  [20–25].

Количество переключений полупроводниковых модулей можно определить из выражения:

$$N = \frac{f_{\text{ср}}}{f_1}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{ср}}$  – средняя частота переключений полупроводниковых ключей за период фазной ЭДС АВН;  $f_1$  – частота переменного напряжения фазной ЭДС АВН.

С помощью преобразования Фурье сигнал фазной ЭДС АВН можно представить математическим выражением:

$$u_{ao}(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)], \quad (2)$$

где  $n$  – номер гармоники;  $a_n$  и  $b_n$  – коэффициенты ряда Фурье:

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{ao}(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) & n = 0, 1, \dots, \infty, \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{ao}(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) & n = 1, 2, \dots, \infty. \end{cases} \quad (3)$$

Ввиду четвертьволновой симметрии формы сигнала после преобразования Фурье остаются только нечетные синусоидальные компоненты  $b_n$ :

$$\begin{cases} a_n = 0, \\ b_n = \begin{cases} 0, & n - \text{чётное}, \\ \frac{4}{n\pi} \frac{U_{dc}}{2} \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k), & n - \text{нечётное}. \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Формула (4) определяет связь между углами переключений и спектром гармоник сигнала фазной ЭДС АВН как:

$$\begin{cases} H_1 = \sum_{k=1}^n (-1)^k \cdot \cos(\alpha_k) = \frac{\pi}{4} \cdot M, \\ \vdots \\ H_n = \sum_{k=1}^n (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $H_n$  – уровень  $n$ -й гармоники;  $M$  – индекс модуляции;  $\alpha_k$  – порядковый номер угла переключения от 1 до  $n$ .

С помощью системы уравнений (4) количество гармоник, которые можно приравнять к 0, определяется по формуле:

$$n = N - 1. \quad (6)$$

Диапазон коэффициента модуляции  $M$  находится в пределах от 0 до максимального значения коэффициента модуляции  $M_{max}$ ,

$$M_{max} = b_1 / (V_{dc} / 2) = \frac{4}{\pi}. \quad (7)$$

### Описание имитационной модели

Функциональная схема имитационной модели системы управления объектом исследования показана на рис. 3. Особенностью данной схемы является то, что сигналы трёхфазных токов  $i_{abc}$  и напряжений  $u_{abc}$  измеряются на первичной стороне фазосдвигающих трансформаторов  $T^{0^\circ}$ ,  $T^{20^\circ}$ ,  $T^{-20^\circ}$ . Данное техническое решение стало возможным ввиду отсутствия других потребителей.

Система управления АВН строится на основе пространственно-векторного управления с синхронизацией по вектору напряжения сети. Линейные регуляторы выполняются пропорциональными (П) и/или пропорционально-интегральными (ПИ). Синтез регуляторов выполнен на основе подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией. На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $T^{0^\circ}$ ,  $T^{20^\circ}$ ,  $T^{-20^\circ}$  – фазосдвигающие трансформаторы; ФАЧП $^{0^\circ}$ , ФАЧП $^{20^\circ}$ , ФАЧП $^{-20^\circ}$  – блоки синхронизации напряжений со вторичными обмотками фазосдвигающих трансформаторов;  $i_{abc}$  и  $u_{abc}$  – мгновенные измеренные значения фазных токов и напряжений на первичной стороне фазосдвигающих трансформаторов в системе координат  $abc$ ;  $\theta$  – угол пространственного вектора напряжения сети;  $\theta^{0^\circ}$ ,  $\theta^{20^\circ}$ ,  $\theta^{-20^\circ}$  – вычисленные углы пространственных векторов напряжений вторичных обмоток фазосдвигающих трансформаторов;  $i_{dq}$  – мгновенные измеренные значения фазных токов на первичной стороне фазосдвигающих трансформаторов в системе координат  $dq0$ ;  $i_{dq}^{0^\circ}$ ,  $i_{dq}^{20^\circ}$ ,  $i_{dq}^{-20^\circ}$  – мгновенные измеренные значения фазных токов АВН в системе координат  $dq0$ ;  $i_{dqref}^{0^\circ}$ ,  $i_{dqref}^{20^\circ}$ ,  $i_{dqref}^{-20^\circ}$  – заданные значения фазных токов АВН в системе координат  $dq0$ ;  $u_{dq}^{0^\circ}$ ,  $u_{dq}^{20^\circ}$ ,  $u_{dq}^{-20^\circ}$  – мгновенные измеренные значения фазных ЭДС АВН в системе координат  $dq0$ ;  $u_{dc}^{0^\circ}$ ,  $u_{dc}^{20^\circ}$ ,  $u_{dc}^{-20^\circ}$  – мгновенные измеренные значения напряжений конденсаторов звена постоянного тока АВН;  $u_{dcref}^{0^\circ}$ ,  $u_{dcref}^{20^\circ}$ ,  $u_{dcref}^{-20^\circ}$  – заданные значения напряжений конденсаторов звена постоян-



ного тока АВН;  $m^{0^\circ}$ ,  $m^{20^\circ}$ ,  $m^{-20^\circ}$  – коэффициенты модуляций АВН;  $\alpha^{0^\circ}$ ,  $\alpha^{20^\circ}$ ,  $\alpha^{-20^\circ}$  – углы сдвига между напряжениями вторичных обмоток фазосдвигающих трансформаторов и фазных ЭДС АВН;  $L_{ABH}$  – индуктивность на входе АВН;  $L_{load}$  – индуктивность на выходе преобразователя частоты; ФНЧ – широкополосные фильтры низких частот.

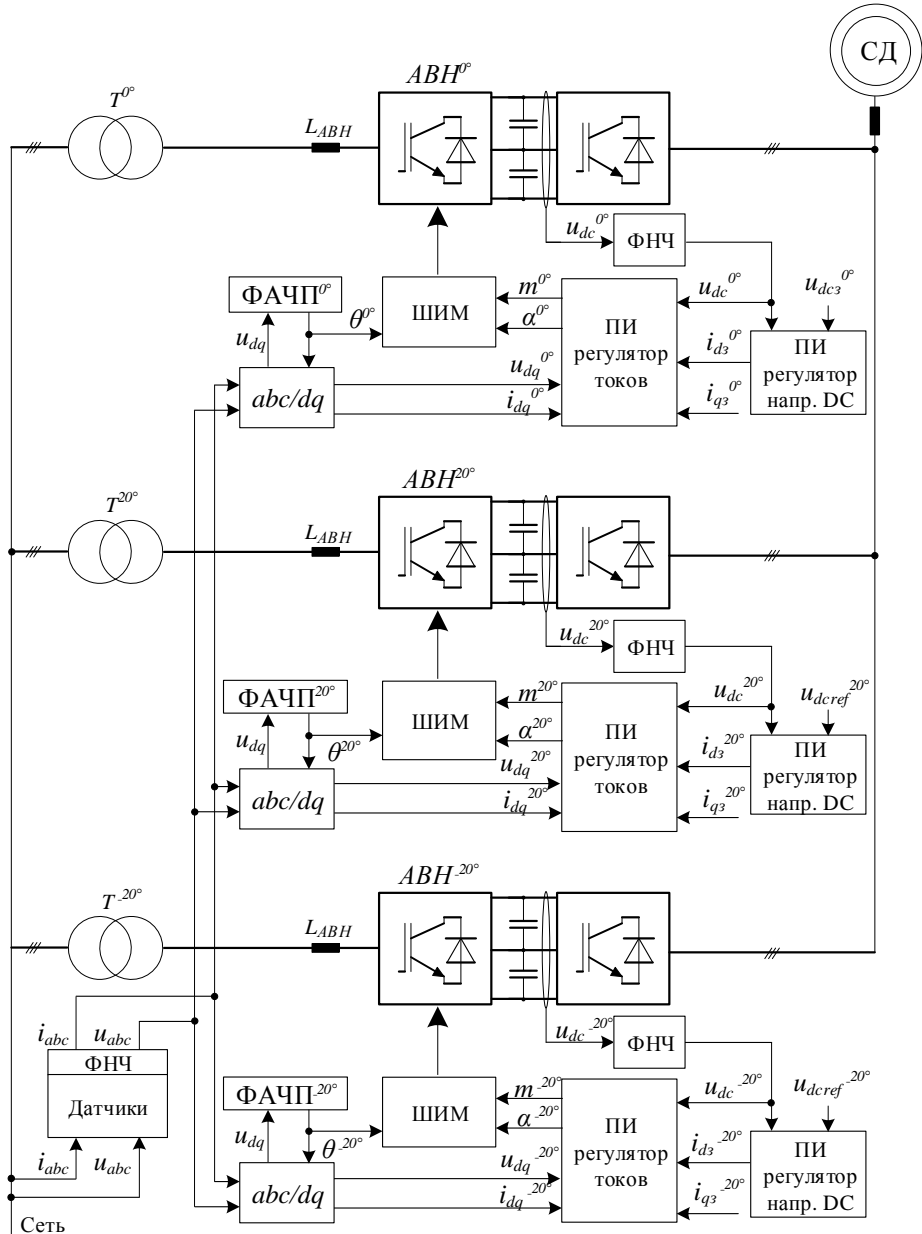


Рис. 3. Функциональная схема объекта исследования

Запрограммированная форма переменных фазных ЭДС трёх трёхуровневых АВН с удалением 17 и 19 гармоник применяется для рассматриваемого объекта, что соответствует средней частоте переключений ключей порядка 150 Гц. С помощью системы уравнений (5) были получены три набора углов переключений для удаления гармоник в диапазоне средней частоты переключений от 150 до 450 Гц и представлены в графическом виде на рис. 4.

### Результаты моделирования

Анализ гармонических искажений напряжений и токов выполнен с помощью программного обеспечения MatLab/Simulink. Ниже показаны результаты моделирования токов исследуемого объекта при трёх наборах углов переключений. На рис. 5 представлены результаты моделирования номинального потребляемого тока трёхуровневым АВН  $I_{\text{АВН}}$  на вторичной обмотке одного из трёх фазосдвигающих трансформаторов.

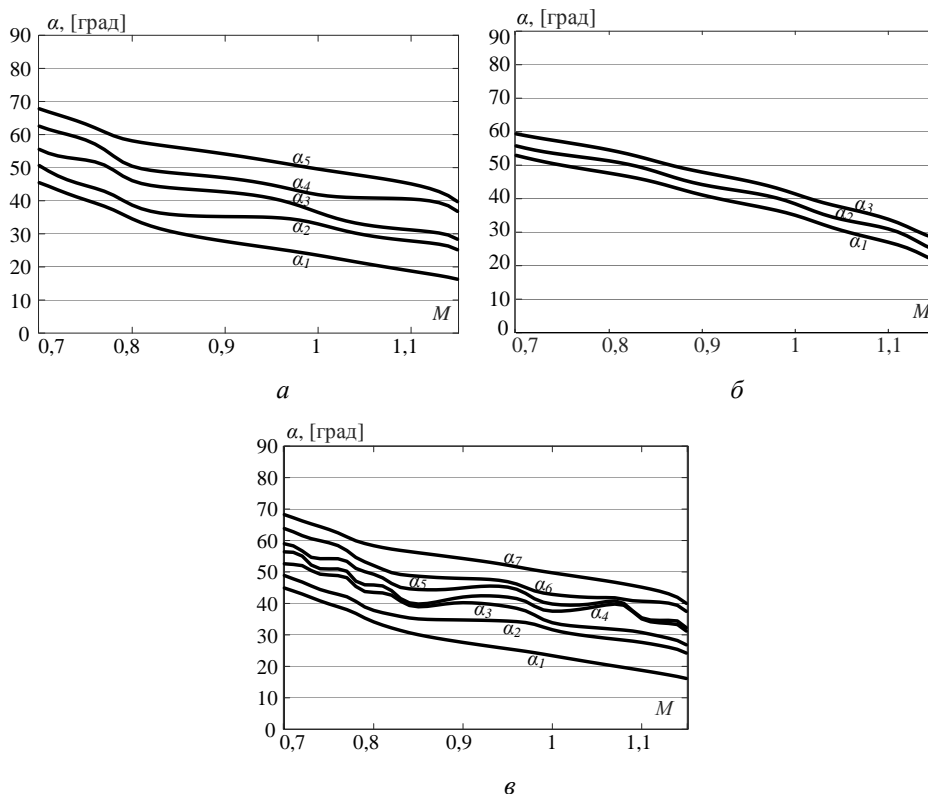


Рис. 4. Результаты расчёта трёх наборов углов переключений АВН: а – набор 1 – удаление 5, 7, 17 и 19 гармоник; б – набор 2 – удаление 17 и 19 гармоник; в – набор 3 – удаление 5, 7, 17, 19, 35 и 37 гармоник

С помощью анализа полученных данных рассчитаны коэффициенты суммарных гармонических искажений (ТНД) и коэффициенты до 60-й гармонической составляющей тока  $I_{\text{АВН}}$ .

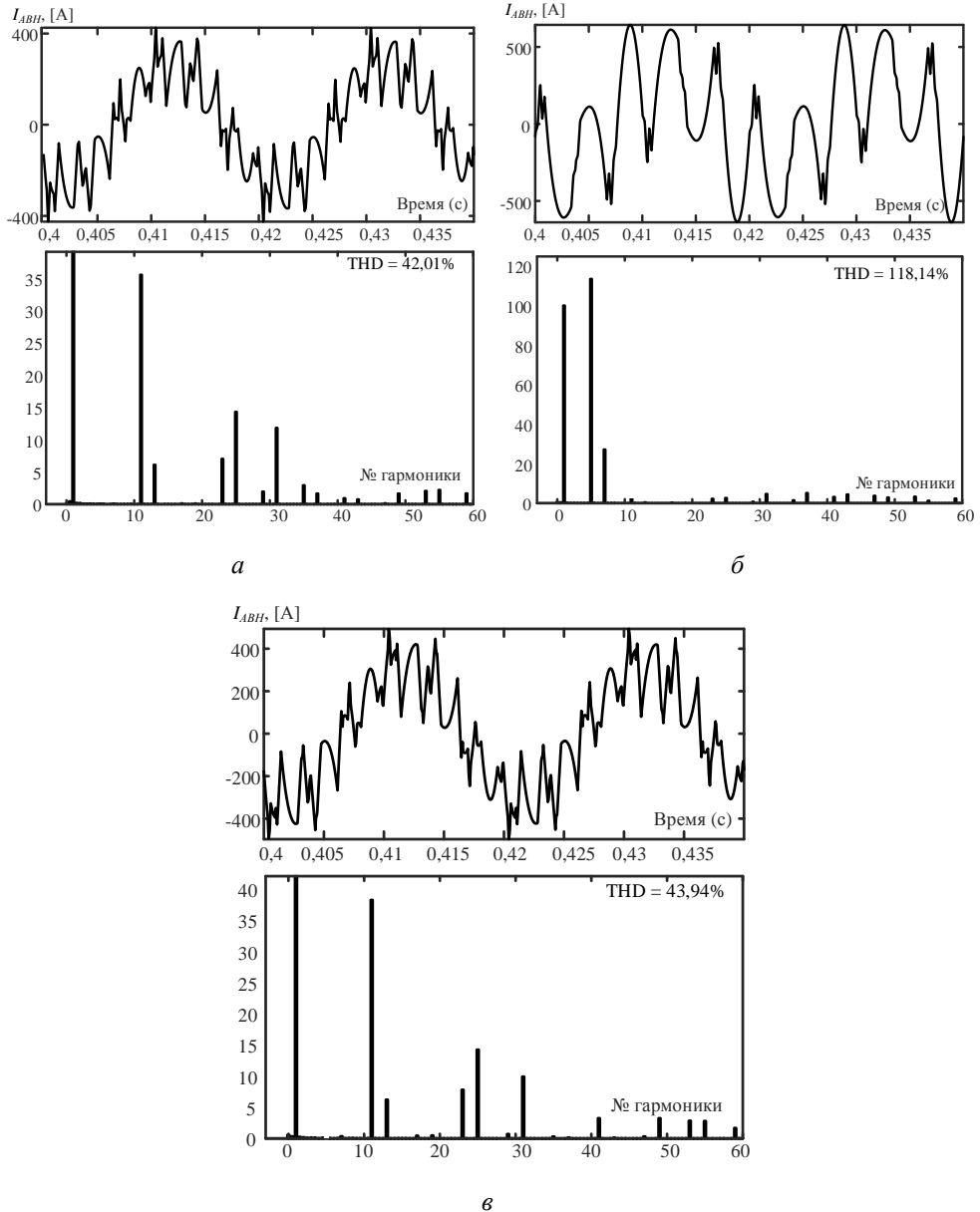


Рис. 5. Осциллограммы номинального потребляемого тока АВН  $I_{\text{АВН}}$  на вторичной обмотке одного фазосдвигающего трансформатора:  
*a* – набор 1; *б* – набор 2; *в* – набор 3

На рис. 5, *а* и *в* можно увидеть, что значения ТНД тока  $I_{ABH}$  при наборах 1 и 3 составляют около 40 %, что в три раза меньше, чем при наборе 2 (см. рис. 5, *б*). Это связано с тем, что коэффициенты 5 и 7 гармонических составляющих тока  $I_{ABH}$  имеют наибольшее влияние в видимом спектре тока. Можно убедиться, что удаление 35 и 37 гармонических составляющих (набор 3) существенно не улучшает гармонический спектр тока  $I_{ABH}$ . Объясняется это тем, что значение индуктивного сопротивления на входе АВН является достаточным для пассивной фильтрации гармоник данного порядка.

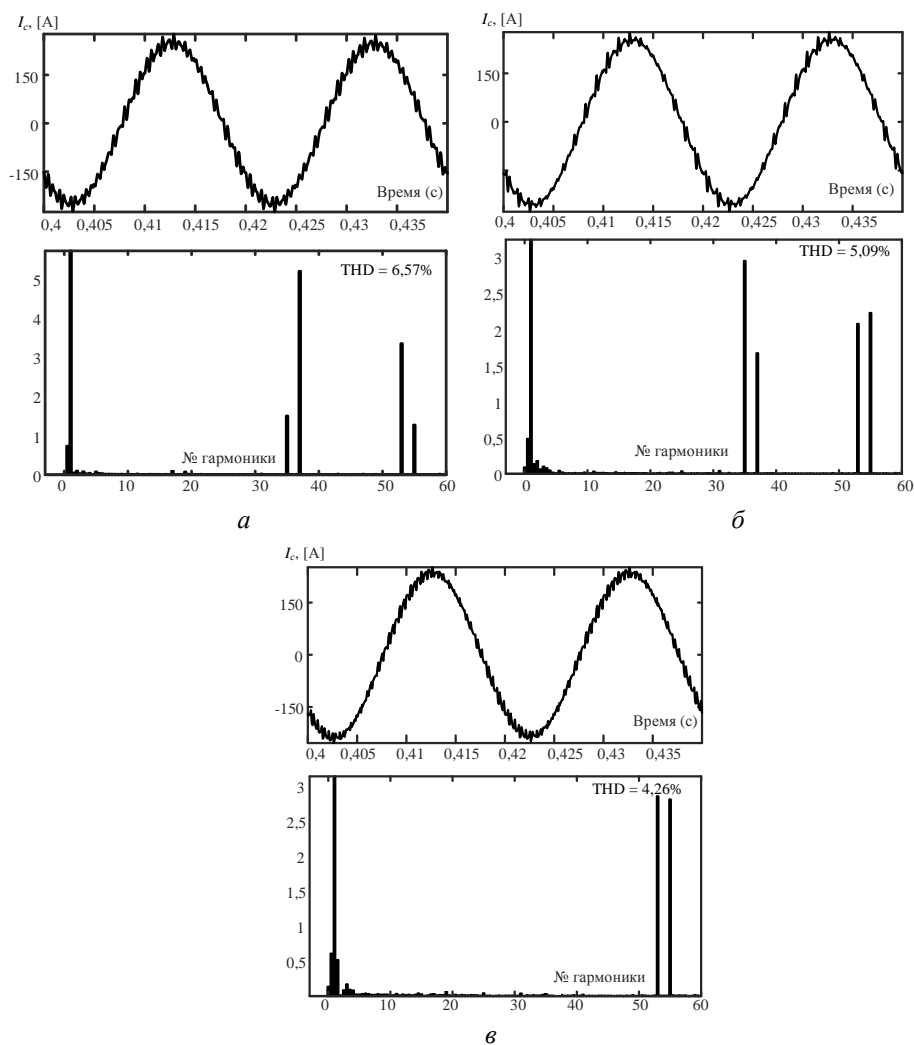


Рис. 6. Осциллограммы номинального потребляемого фазного тока сети  $I_{ABH}$  тремя трёхуровневыми АВН при 18-пульсной схеме подключения: *а* – набор 1; *б* – набор 2; *в* – набор 3

На рис. 6 представлены результаты моделирования потребляемого тремя трёхуровневыми АВН при 18-пульсной схеме подключения номинального фазного тока сети  $I_c$ . На рис. 6, в видно, что ток сети при наборе 3 имеет наилучший показатель THD 4,26 %, что на 2,31 % меньше, чем при наборе 1, результаты которого показаны рис. 6, а. Из результатов исследования видно, что качество потребляемого тока со стороны сети при наборе 1 с удалением 5, 7, 17 и 19 гармонических составляющих несколько хуже, чем при наборе 2 с удалением 17 и 19 гармонических составляющих. В связи с этим возникает противоречие в определении наиболее предпочтительной формы напряжения АВН при запрограммированной ШИМ в рассматриваемом объекте. Перегревы трансформаторов возникают по причине наличия сильного искажения тока со стороны АВН, поэтому удаление 5, 7, 17 и 19 гармоник рекомендовано к постоянному использованию.

### **Заключение**

Насколько известно авторам, в данной статье впервые проведён анализ искажений токов в 18-пульсной схеме подключения трёхуровневых АВН с запрограммированной формой переменного напряжения при трёх наборах углов переключений с удалением гармоник: 1) 5, 7, 17 и 19; 2) 17 и 19; 3) 5, 7, 17, 19, 35 и 37.

Анализ полученных результатов позволил определить наилучшую форму фазной ЭДС АВН с удалением 5, 7, 17 и 19 гармоник для снижения нагрева фазосдвигающих трансформаторов. Результаты математического моделирования в статье подтвердились положительным эффектом после промышленного внедрения.

Представленные результаты и методика могут быть также использованы для проведения идентичных исследований в других схемах подключения мощных АВН к питающей сети для повышения эффективности преобразования электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости.

### **Библиографический список**

1. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology / H. Abu-Rub, S. Bayhan, M. Malinowski, S. Moinoddin, J. Guzinski // IEEE Power Electronics Magazine. – 2016. – Vol. 3(2). – P. 29–41.

2. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics / J.I. Leon, S. Kouro, L.G. Franquelo, J. Rodriguez, B. Wu // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2016. – Vol. 63, № 5. – P. 2688–2701.

3. Coordinated management of electrical energy in a steelworks and a wind farm / G.A. Orcajo, J.R. Diez, J.M. Cano, J.G. Norniella, J.F. Pedrayes González, C.H. Rojas // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2022. – Vol. 58. – № 4. – P. 5488–5502.

4. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications // *Proc. 2018 International Ural Conference on Green Energy*. – Oct. 2018. – P. 275–281.

5. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G. Alonso Orcajo, D.J. Rodríguez, J.M. Cano, J.G. Norniella, G.P. Ardura, T.R. Llera, R.D. Cifrián // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2018. – Vol. 54, № 3. – P. 2964–2974.

6. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey. – 2 nd ed. – Wiley-IEEE Press, 2017. – 480 p.

7. Rodriguez, J. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications / J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, M.A. Perez // *Proc. IEEE*. – 2009. – Vol. 97, № 11. – P. 1786–1817.

8. Rodriguez J., Jih-Sheng Lai, Peng F.Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2002. – Vol. 49, № 4. – P. 724–738.

9. Брованов С.В. Методика расчета энергетических показателей качества преобразования энергии в трехуровневом инверторе напряжения // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 3 (36). – С. 131–142.

10. Николаев А.А., Гилемов И.Г. Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2019. – № 4(45). – С. 35–42.

11. Николаев А.А., Гилемов И.Г., Денисевич А.С. Анализ влияния различных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей многоуровневых ПЧ на устойчивость работы при провалах напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 3(40). – С. 55–62.

12. Николаев А.А., Гилемов И.Г. Разработка и исследование усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с изменяемыми таблицами углов переключения // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2020. – № 6. – С. 48–56.

13. Цзин Тао. Разработка методов расчёта и алгоритма смены предварительно запрограммированных широтноимпульсно модулируемых последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого активного выпрямителя напряжения с фиксирующими диодами: дис. ... канд. техн. наук. 05.09.12 / Цзин Тао. – Челябинск, 2021.

14. Hoevenaars A., Farbis M., McGraw M. Active harmonic mitigation: What the manufacturers don't tell you // IEEE Industry Applications Magazine. – 2020. – Vol. 62. – P. 41–51.

15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. The dynamic operation investigation of an active rectifier control system with igct-thyristor switching angle table selection function // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2022. – P. 492–497.

16. Providing electromagnetic compatibility of high-power frequency converters with active rectifiers at internal power supply system of cherepovets steel mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // Proceedings of the International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives. – Ekaterinburg, Russia. – 2021.

17. Nabae A.A., Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 1981. – Vol. IA–17, iss. 5. – P. 518–523.

18. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A, Hasanin B. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications // International Journal of Electronics and Communication Engineering. – 2013. – Vol. 1, № 1. – P. 43–52.

19. Enjeti P.N., Ziogas P.D., Lindsay J.F. Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1990. – Vol. 26, № 2. – P. 302–316.

20. Opposition-based quantum bat algorithm to eliminate lower-order harmonics of multilevel inverters / J. Islam, S.T. Meraj, A. Masaoud, M.A. Mahmud, A. Nazir, M.A. Kabir, M.M. Hossain, F. Mumtaz // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 103610–103626.

21. Dahidah M.S.A., Konstantinou G., Agelidis V.G. A review of multilevel selective harmonic elimination PWM: Formulations, solving algorithms, implementation and applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2015. – Vol. 30, № 8. – P. 4091–4106.

22. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станков // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Вып. 1, № 1. – С. 3–7.

23. Jing T., Maklakov A.S., Gasiyarova O.A. Research on Selective Harmonic Elimination Technique based on Particle Swarm Optimization // *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. – Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019. – P. 694–700. DOI: 10.1109/eiconrus.2019.8656834

24. Dynamic and steady state response analysis of selective harmonic elimination in high power inverters / J. Cheng, T. Xu, D. Chen, G. Chen // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 75588–75598.

25. Chengwu L., Dong B. Research on AFE technology in multi-inverter system // *Proc. 5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*; 16–17 January 2013. – Hong Kong, China. – P. 875–878.

## References

1. Abu-Rub H., Bayhan S., Malinowski M., Moinoddin S., Guzinski J. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016, vol. 3(2), pp. 29-41.

2. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 2688-2701.

3. Orcajo G.A., Diez J.R., Cano J.M., Norriella J.G., Pedrayes González J.F., Rojas C.H Coordinated management of electrical energy in a steelworks and a wind farm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 5488-5502.

4. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications. *Proc. 2018 International Ural Conference on Green Energy*. October 2018, pp. 275-281.



5. Alonso Orcajo G., Rodríguez D.J., Cano J.M., Norniella J.G., Ardura G.P., Llera T.R., Cifrián R.D. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 2964-2974.

6. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017, 480 p.

7. Rodriguez J., Franquelo L.G., Kouro S., Leon J.I., Portillo R.C., Prats M.A.M., Perez M.A. Rodriguez, J. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications. *Proc. IEEE*, 2009, vol. 97, no. 11, pp. 178-1817.

8. Rodriguez J., Jih-Sheng Lai, Peng F.Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.

9. Brovanov S.V. Metodika rascheta energeticheskikh pokazatelei kachestva preobrazovaniia energii v trekhurovnevom invertore napriazheniia [A Calculation Method of the Energy Quality Performance for Three-Level Voltage Source Inverter of the Autonomous Power-Supply System]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 3 (36), pp. 131-142.

10. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. Uluchshenie kachestva napriazheniia v elektricheskikh setiakh s aktivnymi vypriamiteliami za schet vybora optimal'nykh tablits uglov perekliucheniia ShIM [Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2019, no. 4(45), pp. 35-42.

11. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analiz vliianiia razlichnykh algoritmov ShIM aktivnykh vypriamitelei mnogourovnevnykh PCh na ustoychivost' raboty pri provalakh napriazheniia [Analysis of the Influence of Different Active PWM Rectifiers Algorithms on the Electric Drives Stability under Voltage Drops Conditions]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2018, no. 3 (40), pp. 55-62.

12. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. Razrabotka i issledovanie usovershenstvovannogo algoritma ShIM aktivnogo vypriamitel'ia s izmeniaemyimi tablitsami uglov perekliucheniia [Development and research of improved PWM algorithm of an active rectifier with variable switching

angle tables]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2020, no. 6, pp. 48-56.

13. Tszin Tao. Razrabotka metodov rascheta i algoritma smeny predvaritel'no zaprogramirovannykh shirotnoimpul'sno moduliruemykh posledovatel'nostei perekliuchenii poluprovodnikovyykh modulei trekhfaznogo trekhurovneвого aktivnogo vypriamitel'ia napriazheniia s fiksiruiushchimi diodami [Development of calculation methods and algorithm for changing preprogrammed pulse width modulation switching patterns of semiconductor modules for three-phase three-level neutral-point clamped active front end]. Ph. D. thesis. Cheliabinsk, 2021.

14. Hoevenaars A., Farbis M., McGraw M. Active harmonic mitigation: What the manufacturers don't tell you. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2020, vol. 62, pp. 41-51.

15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. The dynamic operation investigation of an active rectifier control system with igct-thyristor switching angle table selection function. *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2022, pp. 492-497.

16. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing electromagnetic compatibility of high-power frequency converters with active rectifiers at internal power supply system of cherepovets steel mill. *Proceedings of the International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives*. Ekaterinburg, Russia, 2021.

17. Nabae A.A, Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 1981, vol. IA-17, iss. 5, pp. 518-523.

18. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A, Hasanin B. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 43-52.

19. Enjeti P.N., Ziogas P.D., Lindsay J.F. Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1990, vol. 26, no. 2, pp. 302-316.

20. Islam J., Meraj S.T., Masaoud A., Mahmud M.A., Nazir A., Kabir M.A., Hossain M.M., Mumtaz F. Opposition-based quantum bat algorithm to eliminate lower-order harmonics of multilevel inverters. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 103610-103626.

21. Dahidah M.S.A., Konstantinou G., Agelidis V.G. A review of multilevel selective harmonic elimination PWM: Formulations, solving algorithms, implementation and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, no. 8, pp. 4091-4106.

22. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Matematicheskaya model' silovoi skhemy glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2014, iss. 1, no. 1, pp. 3-7.

23. Jing T., Maklakov A.S., Gasiyarova O.A. Research on Selective Harmonic Elimination Technique based on Particle Swarm Optimization. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 694-700. DOI: 10.1109/eiconrus.2019.8656834

24. Cheng J., Xu T., Chen D., Chen G. Dynamic and steady state response analysis of selective harmonic elimination in high power inverters. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 75588-75598.

25. Chengwu L., Dong B. Research on AFE technology in multi-inverter system. *Proc. 5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 16-17 January 2013*. Hong Kong, China, pp. 875-878.

### **Сведения об авторах**

**Маклаков Александр Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Управления научной и инновационной деятельности Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: alexandr.maklakov.ru@ieee.org).

**Лисовская Татьяна Александровна** (Москва, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехника» Московского политехнического университета (107023, Москва, Большая Семёновская ул., 38, e-mail: tati.lisa1625@gmail.com).

**Цзин Тао** (Китай) – кандидат технических наук, факультет механики и электротехники Китайского университета Цзиляна, e-mail: jingtao19940214@gmail.com

## About the authors

**Alexander S. Maklakov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher at the Office of Scientific and Innovation Activities of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin ave., e-mail: alexandr.maklakov.ru@ieee.org).

**Tatiana A. Lisovskaya** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer of the Department of Electrotechnology Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, 38, Bolshaya Semenovskaya str., e-mail: tati.lisa1625@gmail.com).

**Tao Jing** (China) – Candidate of Sciences (techn.), School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, e-mail: jingtao19940214@gmail.com

Поступила: 24.10.2022. Одобрена: 03.11.2022. Принята к публикации: 01.12.2022.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук МК-3803.2022.4.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Маклаков, А.С. Исследование спектров тока 18-пульсной схемы подключения трёхуровневых активных выпрямителей / А.С. Маклаков, Т.А. Лисовская, Т. Цзин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 25–44. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.02

Please cite this article in English as:

Maklakov A.S., Lisovskaya T.A., Jing T. Research of current spectrum in 18-pulse grid connection of three-level active front-end rectifiers. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 44, pp.25-44. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.02