

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.314

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-2-52-66

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕРТОРА ТОКА НА БАЗЕ IGBT ТРАНЗИСТОРОВ С ТЕПЛОВЫМИ МОДЕЛЯМИ, ШИМ С ВЫБОРОЧНЫМ ИСКЛЮЧЕНИЕМ ГАРМОНИК

Юрченко В.П., Кондратьев С.Е., Пономарев П.С., Пикалов В.В., Безденежных Д.В.

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия
razthepsycho@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработать и исследовать компьютерную модель трёхфазного двухуровневого инвертора тока на базе IGBT транзисторов с интегрированными тепловыми моделями. Создать систему коммутации силовых ключей инвертора на базе широтно-импульсной модуляции с выборочным исключением гармоник (ВИГШИМ) для решения проблемы негативного влияния гармоник высших порядков на питающую сеть промышленного предприятия. МЕТОДЫ. Для исследования предлагаемой системы управления трёхфазным двухуровневым инвертором тока была построена компьютерная имитационная модель в программном пакете MATLAB Simulink. В качестве силовых управляемых ключей использованы реальные IGBT транзисторы из каталога компании Infineon. Применен метод выборочного устранения гармоник (SHE) с использованием итерационного алгоритма Ньютона-Рафсона для расчета оптимальных углов коммутации силовых ключей. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана система управления на базе регулятора на нечеткой логике, обеспечивающая автоматическое переключение между различными режимами работы инвертора в зависимости от температурного состояния силовых ключей, величины тока нагрузки и скорости изменения температуры транзисторов. Система коммутации позволяет осуществлять переключение между стандартным шестиступенчатым режимом и режимами ВИГШИМ с исключением 5-й, 7-й и 11-й гармоник без останова силового агрегата. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная система управления трёхфазным двухуровневым инвертором тока эффективно решает проблему негативного влияния гармоник на питающую сеть. Система обеспечивает защиту от перегрузки за счет автоматического снижения частоты коммутаций при повышении температуры, что предотвращает перегрев транзисторов и увеличивает срок службы преобразователя.

Ключевые слова: инвертор тока; IGBT-транзисторы; тепловые модели; ШИМ; выборочное исключение гармоник; нечеткая логика; компьютерное моделирование.

Для цитирования: Юрченко В.П., Кондратьев С.Е., Пономарев П.С., Пикалов В.В., Безденежных Д.В. Моделирование инвертора тока на базе IGBT транзисторов с тепловыми моделями, ШИМ с выборочным исключением гармоник // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 52-66. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-52-66.

MODELING OF CURRENT SOURCE INVERTER BASED ON IGBT TRANSISTORS WITH THERMAL MODELS AND PWM WITH SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION

Yurchenko V.P., Kondratyev S.E., Ponomarev P.S., Pikalov V.V., Bezdenezhnykh D.V.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia
razthepsycho@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. To develop and investigate a computer model of a three-phase two-level current inverter based on IGBT transistors with integrated thermal models. To create a switching system for inverter power switches based on pulse-width modulation with selective harmonic elimination (PWM-SHE) to solve the problem of the negative impact of higher-order harmonics on the industrial power supply network. The aim is to develop an automatic control system that allows switching between operating modes without stopping the power unit. **METHODS.** A computer simulation model was built in the MATLAB Simulink software package to study the proposed control system for a three-phase two-level current inverter. Real IGBT transistors from the Infineon company catalog were used as controlled power switches. The Selective Harmonic Elimination (SHE) method was applied using the iterative Newton-Raphson algorithm to calculate optimal switching angles for power switches. The control system is based on a fuzzy logic controller that provides automatic switching between different inverter operating modes. **RESULTS.** A control system has been developed that ensures automatic switching between operating modes depending on the temperature state of the power switches, the load current value, and the rate of temperature change of transistors. The switching system allows switching between the standard six-step mode and PWM-SHE modes with elimination of the 5th, 7th, and 11th harmonics without stopping the power unit. Three control channels are used for switching: by transistor temperature, by the derivative of temperature over time (heating rate intensity), and by load current. The system allows operation without changing the characteristics of the inverter power section. **CONCLUSION.** The developed control system for a three-phase two-level current inverter effectively solves the problem of the negative impact of harmonics on the power supply network using the SHE method. The system provides overload protection by automatically reducing the switching frequency when the temperature of the power switches increases, which prevents overheating of transistors and increases the service life of the power converter. The practical significance lies in the possibility of applying the developed system at industrial enterprises to improve power quality without additional capital expenditures on modernization of the inverter power section.

Keywords: current source inverter; IGBT transistors; thermal models; PWM; selective harmonic elimination; fuzzy logic control; computer simulation.

For citation: Yurchenko V.P., Kondratyev S.E., Ponomarev P.S., Pikalov V.V., Bezdenezhnykh D.V. Modeling of current source inverter based on IGBT transistors with thermal models and PWM with selective harmonic elimination. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 52-66. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-52-66.

Введение (Introduction)

На современных промышленных предприятиях мощные системы электропривода все чаще строятся на базе инверторов тока [1,2,3]. При классической 6-пульсной системе управления инвертором осуществляется негативное влияние на питающую сеть предприятия гармониками 5, 7, 11 и другими [4,5,6]. Для исключения вышеуказанных гармоник необходимо увеличивать количество коммутаций силовых ключей инвертора, что приводит к увеличению динамических потерь и стоимости ключей при нагрузке той же мощности [6,7,8].

Поэтому авторами предложена система управления трёхфазным двухуровневым инвертором тока на базе широтно-импульсной модуляции с выборочным исключением гармоник (ВИГШИМ), способная переключаться между режимами без останова агрегата и изменения характеристик силовой части инвертора в зависимости от температуры и нагрузки ключевого элемента инвертора. При такой системе коммутации силовых ключей реализуется защита от перегрузки инверторов (перегрузочная способность), исключается негативное влияние на сеть и, как следствие, повышаются надежность и срок службы силового агрегата [9,10].

Предлагаемый метод управления инвертором позволяет в автоматическом режиме при изменении температуры силовых ключей, тока нагрузки и производной от температуры ключа переключиться с максимального по количеству коммутаций на другие, с меньшим количеством коммутаций для снижения температуры транзистора. При достижении нормального температурного режима снова перейти на алгоритм управления с повышенным числом коммутаций для исключения 5, 7, и 11 гармоник [11,12]. Что позволяет исключить перегрузку силового инвертора и значительно повысить

срок службы агрегата.

Цель исследования заключается в разработке и исследовании компьютерной модели трёхфазного двухуровневого инвертора тока на базе IGBT транзисторов с интегрированными тепловыми моделями и системой коммутации силовых ключей на базе ВИГШИМ для решения проблемы негативного влияния гармоник на питающую сеть промышленного предприятия.

Научная значимость исследования состоит в разработке метода автоматического переключения режимов работы инвертора на основе регулятора на нечёткой логике с учетом температурного состояния силовых ключей, что позволяет оптимизировать работу преобразователя без внешнего вмешательства.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной системы на промышленных предприятиях для улучшения качества электроэнергии и повышения надежности работы силовых преобразователей без дополнительных капитальных затрат на модернизацию силовой части инвертора.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для исследования предлагаемой системы управления трёхфазным двухуровневым инвертором тока на базе IGBT транзисторов была построена компьютерная имитационная модель в программном пакете MATLAB Simulink (рис. 1) [11,12].

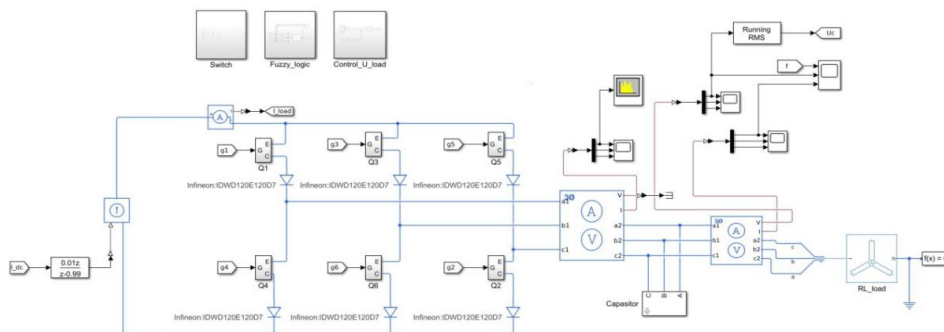


Рис. 1. Компьютерная имитационная модель трёхфазного двухуровневого инвертора тока с возможностью переключения режимов ШИМ

Fig. 1. Computer simulation model of a three-phase two-level current inverter with the ability to switch PWM modes

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследуемый инвертор тока был построен по классической двухуровневой трехфазной схеме (рис. 2). В качестве силовых управляемых ключей были использованы реальные IGBT транзисторы из каталога фирмы *Infineon*, параметры настройки блока, имитирующего транзистор в компьютерной модели показаны на рисунке 3 [13,14].

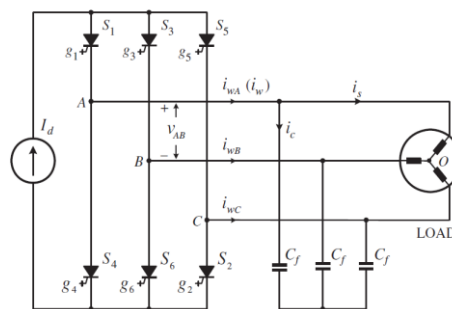


Рис. 2. Классический трехфазный инвертор тока на IGBT-транзисторах

Fig. 2. Classic three-phase current inverter based on IGBT transistors

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При стандартной шестиступенчатой системе управления инвертором присутствуют 5, 7, 11 гармоники (рис. 4), что негативно влияет на питающую сеть и потребителей, включенных в одну промышленную сеть предприятия с мощным инвертором тока [15].

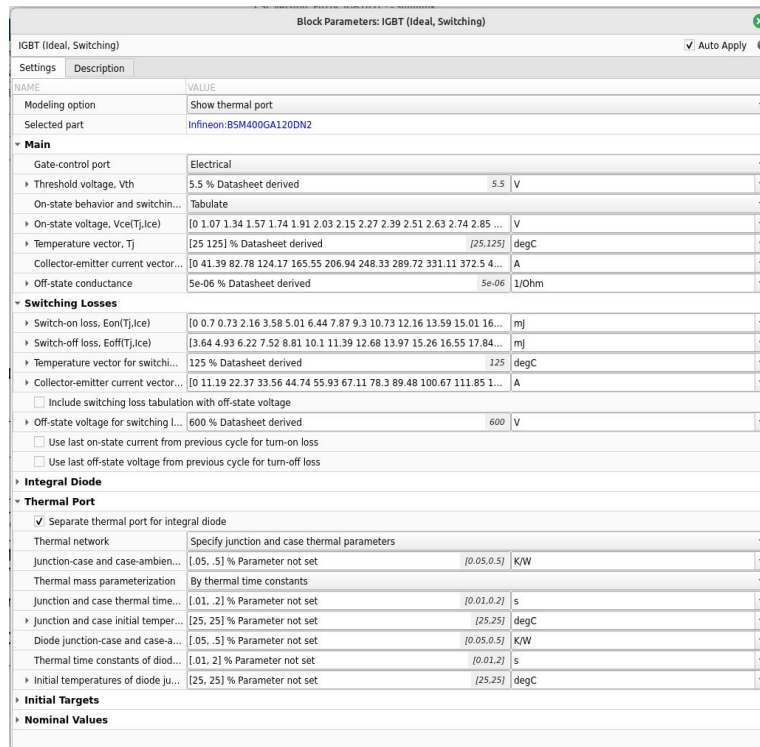


Рис. 3. Параметры силового транзистора *Fig. 3. Parameters of the current inverter power transistor*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

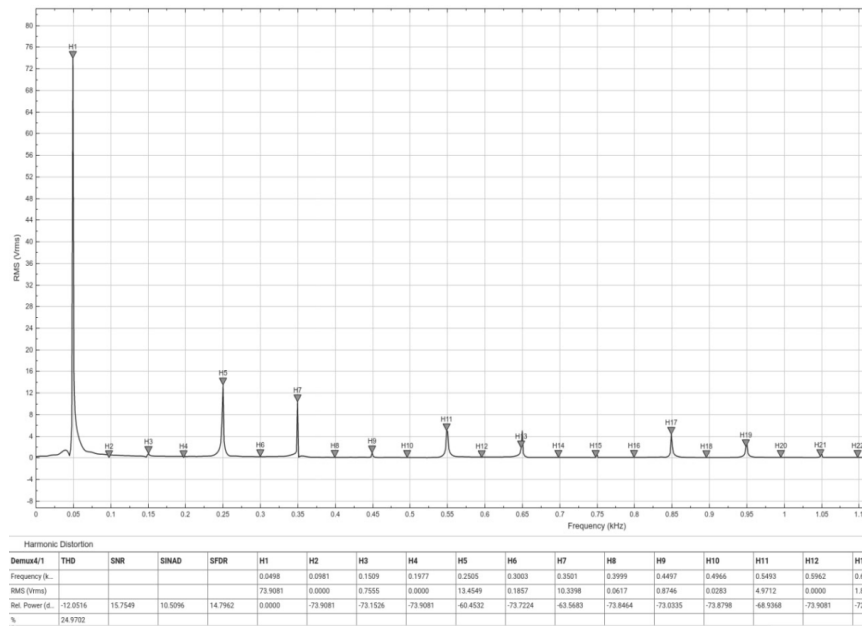


Рис. 4. Гармонический состав при стандартной *Fig. 4. Harmonic composition with a standard six-stage inverter control system*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Подсистема силового транзистора с учетом тепловых моделей, учитывающая температуру окружающей среды и температуру транзистора, показана на рисунке 5.

Для переключения между режимами работы применяется три канала управления: по температуре транзистора, по производной температуры от времени (интенсивности темпа нагрева) и по току нагрузки. Система коммутации реализована с использованием регулятора на нечёткой логике [14].

Регулятор на нечёткой логике (Fuzzy Logic Controller, FLC) выполняет функцию интеллектуального переключателя между четырьмя режимами работы инвертора: 6-ступенчатым режимом (Mode 1), режимом SHE-5 с исключением 5-й гармоники (Mode 2), режимом SHE-5,7 с исключением 5-й и 7-й гармоник (Mode 3) и режимом SHE-5,7,11 с

исключением 5-й, 7-й и 11-й гармоник (Mode 4). Структура FLC включает три входных лингвистических переменных и одну выходную переменную.

Первая входная переменная – температура кристалла транзистора T ($^{\circ}\text{C}$). Диапазон изменения: от 25°C до 125°C . Определены четыре терма: «Низкая» (Low, L) с функцией принадлежности трапецидального типа на интервале $[25, 25, 50, 65]$, «Средняя» (Medium, M) – треугольная на $[55, 70, 85]$, «Высокая» (High, H) – треугольная на $[75, 90, 105]$ и «Критическая» (Critical, C) – трапецидальная на $[95, 110, 125, 125]$.

Вторая входная переменная – скорость изменения температуры dT/dt ($^{\circ}\text{C}/\text{c}$). Диапазон: от -1.0 до $+2.0^{\circ}\text{C}/\text{c}$. Определены три терма: «Отрицательная» (Negative, N) – трапецидальная на $[-1.0, -1.0, -0.3, 0.1]$, «Нулевая» (Zero, Z) – треугольная на $[-0.2, 0.1, 0.5]$ и «Положительная» (Positive, P) – трапецидальная на $[0.3, 0.8, 2.0, 2.0]$.

Третья входная переменная – ток нагрузки I (A). Диапазон: от 0 до 400 A (для модуля Infineon BSM400GA120DN2). Определены три терма: «Малый» (Low, L) – трапецидальная на $[0, 0, 100, 180]$, «Средний» (Medium, M) – треугольная на $[120, 200, 300]$ и «Большой» (High, H) – трапецидальная на $[250, 330, 400, 400]$.

Выходная лингвистическая переменная – номер режима работы Mode, принимает дискретные значения от 1 до 4. Термы выходной переменной: «6-ступ.» (6-Step) с синглтоном в точке 1, «SHE-5» с синглтоном в точке 2, «SHE-5,7» с синглтоном в точке 3 и «SHE-5,7,11» с синглтоном в точке 4. Дефаззификация осуществляется методом центра тяжести (centroid) с последующим округлением до ближайшего целого значения.

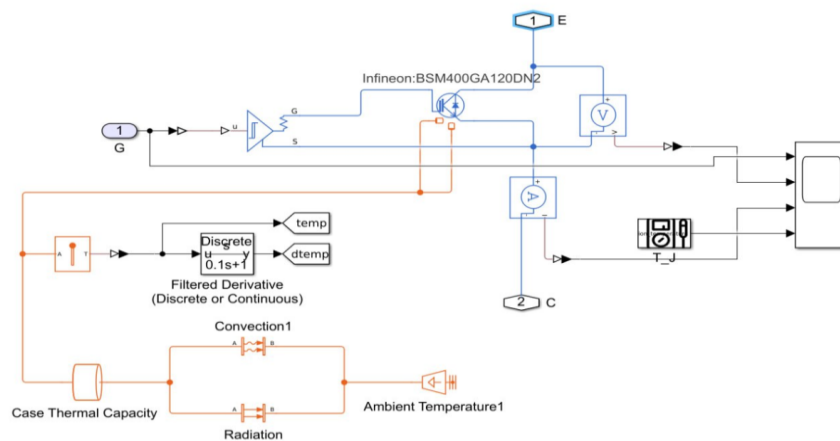


Рис. 5. Подсистема силового транзистора с учетом его тепловой модели *Fig. 5. Subsystem of a power transistor based on its thermal model*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Таблица 1
Table 1

Параметры функций принадлежности входных переменных FLC
Membership function parameters of FLC input variables

Переменная	Терм	Обозначение	Тип ФП	Параметры
T ($^{\circ}\text{C}$)	Низкая	L	Трапеция	$[25, 25, 50, 65]$
	Средняя	M	Треугольная	$[55, 70, 85]$
	Высокая	H	Треугольная	$[75, 90, 105]$
	Критическая	C	Трапеция	$[95, 110, 125, 125]$
dT/dt ($^{\circ}\text{C}/\text{c}$)	Отрицательная	N	Трапеция	$[-1, -1, -0.3, 0.1]$
	Нулевая	Z	Треугольная	$[-0.2, 0.1, 0.5]$
	Положительная	P	Трапеция	$[0.3, 0.8, 2.0, 2.0]$
I (A)	Малый	L	Трапеция	$[0, 0, 100, 180]$
	Средний	M	Треугольная	$[120, 200, 300]$
	Большой	H	Трапеция	$[250, 330, 400, 400]$

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

База нечётких правил содержит 36 правил вида IF...THEN, определяющих выходной режим для каждой комбинации входных термов. Основной принцип формирования правил: при высокой температуре или большом токе нагрузки система

переходит в режим с минимальным количеством коммутаций (6-ступенчатый), а при низкой температуре и малом токе – в режим с максимальным числом исключаемых гармоник (SHE-5,7,11). Скорость нагрева dT/dt обеспечивает упреждающую коррекцию: при быстром росте температуры система заблаговременно снижает число коммутаций. Полная база правил приведена в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

База нечётких правил регулятора (выходная переменная – Mode)
Fuzzy rule base of the controller (output variable – Mode)

T	dT/dt	I = L	I = M	I = H
L	N	SHE-5,7,11	SHE-5,7,11	SHE-5,7
L	Z	SHE-5,7,11	SHE-5,7	SHE-5
L	P	SHE-5,7	SHE-5	SHE-5
M	N	SHE-5,7	SHE-5,7	SHE-5
M	Z	SHE-5,7	SHE-5	6-Step
M	P	SHE-5	6-Step	6-Step
H	N	SHE-5	SHE-5	6-Step
H	Z	SHE-5	6-Step	6-Step
H	P	6-Step	6-Step	6-Step
C	N	SHE-5	6-Step	6-Step
C	Z	6-Step	6-Step	6-Step
C	P	6-Step	6-Step	6-Step

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графическое представление функций принадлежности входных переменных регулятора приведено на рисунке 6.

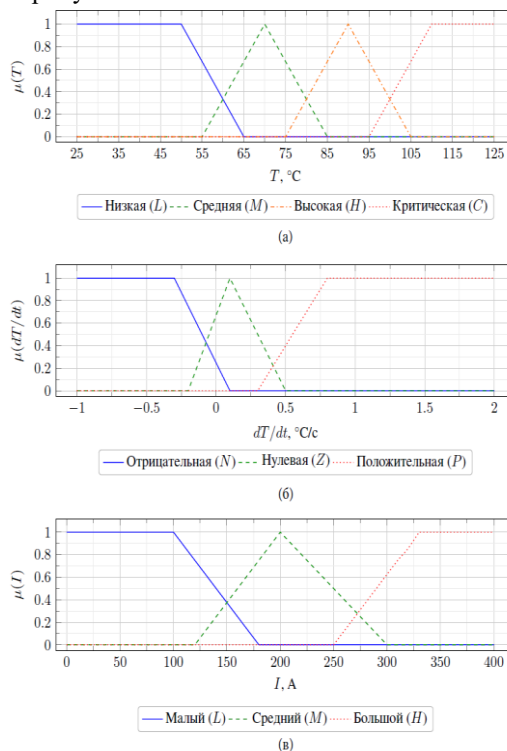


Рис. 6. Функции принадлежности входных переменных регулятора на нечёткой логике: а) температура кристалла T ; б) скорость изменения температуры dT/dt ; в) ток нагрузки I

Fig. 6. Membership functions of input variables of a fuzzy logic controller: a) crystal temperature T ; b) rate of temperature change dT/dt ; c) load current I

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При повышенной температуре транзисторов или повышенном токе нагрузки

система управления работает в стандартном шестиступенчатом первом режиме. При понижении температуры силовых ключей система управления переходит на второй режим с исключением 5 гармоник. При дальнейшем снижении температуры исключаются 5 и 7 гармоник [12,13].

Для исключения 5, 7 и 11 гармоник были созданы подсистемы SHE 5, SHE 5,7, SHE 5,7,11 (рис. 7).

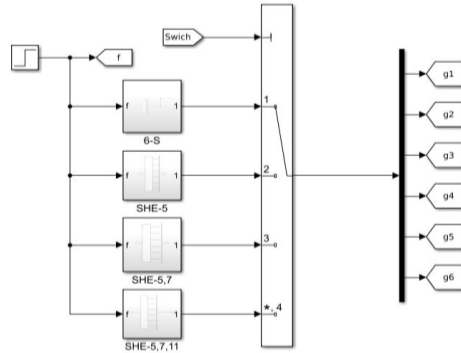


Рис. 7. Подсистема переключения между различными режимами управления силовыми ключами инвертора тока

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для устранения нежелательных гармоник используется метод выборочного устранения гармоник (Selective Harmonic Elimination – SHE) [5]. SHE является методом офлайн-модуляции, который позволяет устранить ряд нежелательных гармоник низшего порядка в ШИМ-токе инвертора. Углы коммутации предварительно рассчитываются с использованием алгоритма Ньютона-Рафсона, а затем загружаются в управляющий контроллер для реализации системы управления с исключением нежелательных гармоник [20].

На рисунке 8 показан типичный тип сигнала при использовании метода выборочного исключения гармоник с исключением 5 и 7 гармоник [11]. На каждом полупериоде присутствует 5 импульсов ($N_p = 5$) с пятью углами коммутации в первом интервале $0 - \pi/2$. Однако только два из этих пяти углов, θ_1 и θ_2 , являются независимыми. Задав эти два угла, все остальные углы коммутации можно вычислить. Эти два угла обеспечивают 2 степени свободы, которые обеспечивают возможность исключения двух гармоник в токе i_w без управления индексом модуляции, либо для устранения одной гармоники и обеспечения регулируемого индекса модуляции m_a [14, 15].

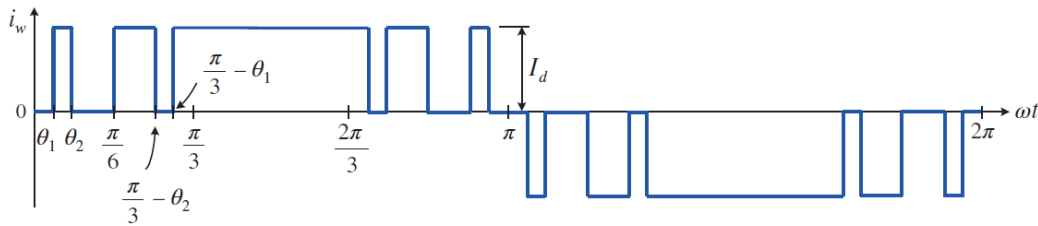


Рис. 8. Вид сигнала инвертора тока при выборочном устранении гармоник

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Количество гармоник k , подлежащих исключению, связано с количеством импульсов N_p на полупериоде соотношением (справедливо для сигналов с четвертьволновой симметрией)

$$k = \frac{N_p - 1}{2} \quad (1)$$

Ток инвертора можно выразить следующим выражением

$$i_w(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \quad (2)$$

где

$$a_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i_w(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

Коэффициент Фурье a_n можно найти следующим образом:

$$a_n = \frac{4I_{dc}}{\pi} \times \begin{cases} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \dots + \int_{\theta_k}^{\frac{\pi}{6}} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \\ \int_{\frac{\pi}{3}-\theta_k}^{\frac{\pi}{3}-\theta_{k-1}} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \dots + \int_{\frac{\pi}{3}-\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} \sin(n\omega t) d(\omega t) & k = \text{нечетное} \\ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \dots + \int_{\theta_{k-1}}^{\theta_k} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \\ \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}-\theta_k} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \dots + \int_{\frac{\pi}{3}-\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} \sin(n\omega t) d(\omega t) & k = \text{четное} \end{cases} \quad (4)$$

откуда

$$a_n = \frac{4I_{dc}}{\pi n} \times \begin{cases} \cos(n\theta_1) + \cos\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \theta_1\right)\right] - \cos(n\theta_2) - \cos\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \theta_2\right)\right] + \dots \\ + \cos(n\theta_k) + \cos\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \theta_k\right)\right] - \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & k = \text{нечетное} \\ \cos(n\theta_1) + \cos\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \theta_1\right)\right] - \cos(n\theta_2) - \cos\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \theta_2\right)\right] + \dots \\ - \cos(n\theta_k) - \cos\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \theta_k\right)\right] + \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & k = \text{четное} \end{cases} \quad (5)$$

Для исключения k гармоник нужно сформулировать k уравнений, установив $a = 0$,

$$F_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

Например, для исключения 5, 7 и 11 гармоник в токе нагрузки i_w , можно вывести следующие три уравнения

$$\begin{cases} F_1 = \cos(5\theta_1) + \cos\left[5\left(\frac{\pi}{3} - \theta_1\right)\right] - \cos(5\theta_2) - \cos\left[5\left(\frac{\pi}{3} - \theta_2\right)\right] + \\ + \cos(5\theta_3) + \cos\left[5\left(\frac{\pi}{3} - \theta_3\right)\right] - \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) = 0 \\ F_2 = \cos(7\theta_1) + \cos\left[7\left(\frac{\pi}{3} - \theta_1\right)\right] - \cos(7\theta_2) - \cos\left[7\left(\frac{\pi}{3} - \theta_2\right)\right] + \\ + \cos(7\theta_3) + \cos\left[7\left(\frac{\pi}{3} - \theta_3\right)\right] - \cos\left(\frac{7\pi}{6}\right) = 0 \\ F_3 = \cos(11\theta_1) + \cos\left[11\left(\frac{\pi}{3} - \theta_1\right)\right] - \cos(11\theta_2) - \cos\left[11\left(\frac{\pi}{3} - \theta_2\right)\right] + \\ + \cos(11\theta_3) + \cos\left[11\left(\frac{\pi}{3} - \theta_3\right)\right] - \cos\left(\frac{11\pi}{6}\right) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Нелинейное трансцендентное уравнение решается с помощью итерационного алгоритма Ньютона-Рафсона [6]. Блок-схема этого алгоритма показана на рис. 9, где θ_0 – начальное приближение углов переключения, а $\partial F/\partial \theta$ – матрица Якоби, заданная

формулой выражением:

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial \theta_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_k}{\partial \theta_1} & \frac{\partial F_k}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial F_k}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} . \quad (8)$$

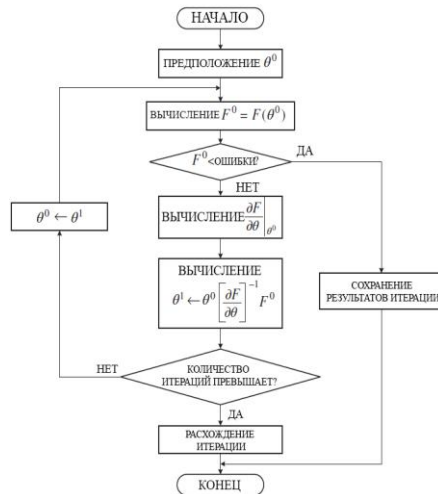


Рис. 9. Блок-схема алгоритма Ньютона-Рафсона Fig. 9. The flowchart of the Newton-Raphson algorithm

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Гармонический анализ показал следующие результаты.

При переключении системы управления силовыми ключами инвертора тока в режим с компенсацией 5 гармоника получен частотный спектр, показанный на рис. 10.

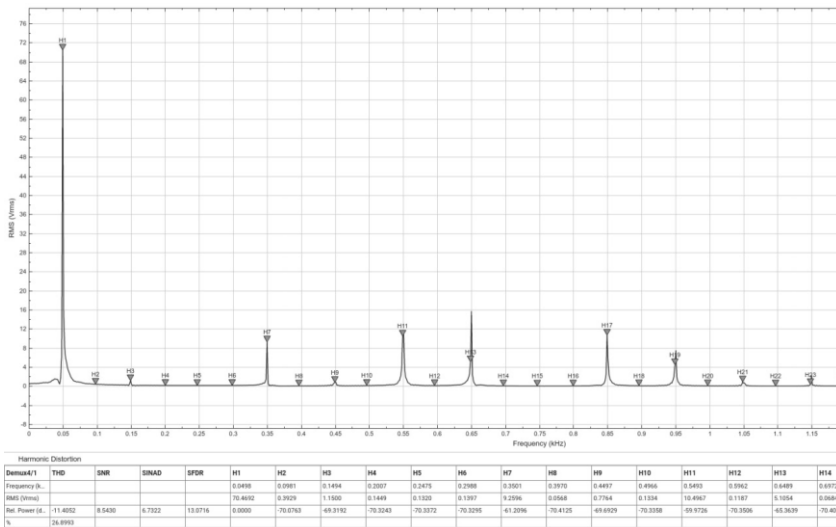


Рис. 10. Частотный спектр в режиме исключения 5 гармоника Fig. 10. Frequency spectrum in the 5 harmonic exclusion mode

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При переключении в режим исключения 5 и 7 гармоник получен частотный спектр, представленный на рисунке 11.

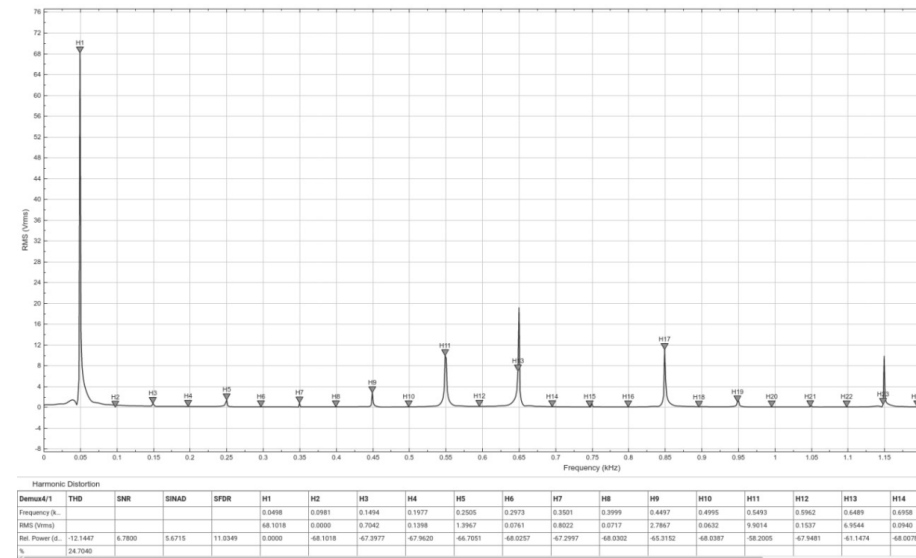


Рис. 11. Частотный спектр в режиме исключения 5 и 7 гармоник Fig. 11. Frequency spectrum in the 5 and 7 harmonic exclusion mode
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При переключении в режим исключения 5, 7 и 11 гармоник получен частотный спектр, представленный на рисунке 12.

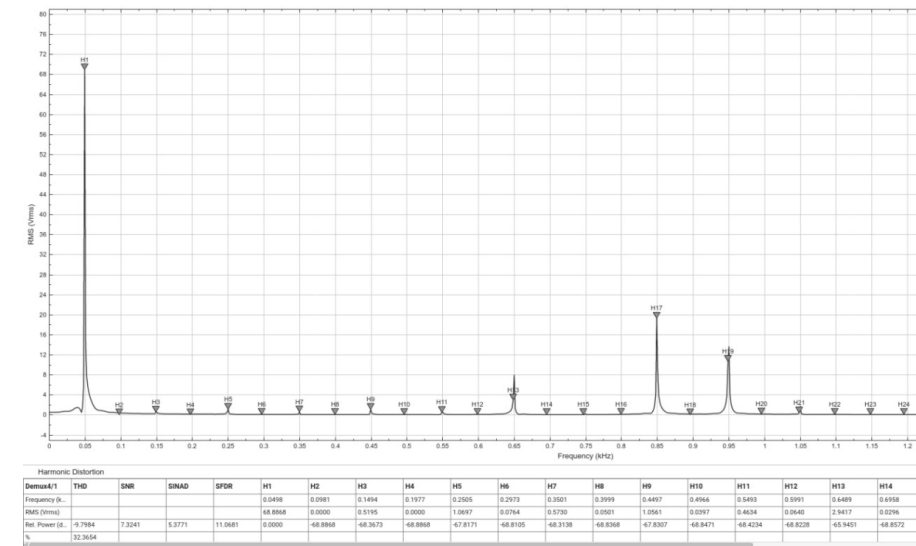


Рис. 12. Частотный спектр в режиме исключения 5, 7 и 11 гармоник Fig. 12. Frequency spectrum in the exclusion mode of 5, 7 and 11 harmonics
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для демонстрации работы адаптивной системы тепловой защиты проведено моделирование переходного процесса при ступенчатом увеличении тока нагрузки. На рис. 13 представлен график изменения температуры кристалла IGBT транзистора и соответствующее переключение режимов работы инвертора во времени. Моделирование проведено при следующих условиях: начальная температура окружающей среды $T_{amb} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, начальный ток нагрузки $I_0 = 150 \text{ A}$, ступенчатое увеличение тока до $I_1 = 350 \text{ A}$ в момент $t = 50 \text{ c}$.

На начальном этапе (0–50 с) при токе нагрузки 150 А и температуре кристалла в диапазоне 45–58 °С система работает в режиме SHE-5,7,11 (Mode 4), обеспечивая максимальное качество выходного тока. После увеличения тока нагрузки до 350 А температура начинает быстро расти. При достижении $T = 72 \text{ }^\circ\text{C}$ и $dT/dt = 0.6 \text{ }^\circ\text{C/c}$ ($t \approx 68 \text{ c}$) регулятор переключает систему в режим SHE-5,7 (Mode 3). При дальнейшем росте температуры до $T = 88 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t \approx 95 \text{ c}$) происходит переход в режим SHE-5 (Mode 2). При $T = 102 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t \approx 118 \text{ c}$) система переходит в 6-ступенчатый режим (Mode 1), обеспечивая минимальные динамические потери. Благодаря снижению частоты коммутаций температура стабилизируется на уровне $T_{max} = 108 \text{ }^\circ\text{C}$, не достигая предельно допустимой

температуры 125 °С.

При уменьшении тока нагрузки до 200 А в момент $t = 200$ с температура начинает снижаться, и система последовательно возвращается к режимам с большим числом исключаемых гармоник. Полный цикл обратного переключения до режима SHE-5,7,11 занимает около 90 с.

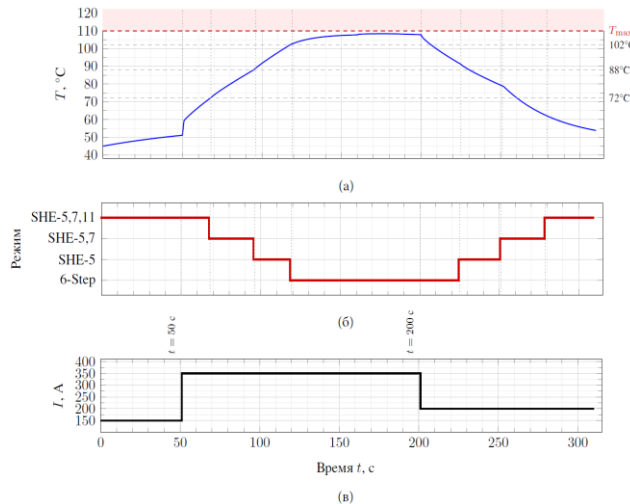


Рис. 13. Работа системы тепловой защиты: а) температура кристалла IGBT; б) режим работы инвертора; в) ток нагрузки

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3
Table 3

Ключевые моменты переключения режимов тепловой защиты
Key switching moments of thermal protection

Время, с	T, °C	dT/dt, °C/c	I, A	Режим	Событие
0	45.0	0.05	150	SHE-5,7,11	Начало моделирования
50	58.2	0.18	150→350	SHE-5,7,11	Скачок нагрузки
68	72.4	0.62	350	SHE-5,7	Переключение Mode 4→3
95	88.1	0.48	350	SHE-5	Переключение Mode 3→2
118	102.3	0.35	350	6-Step	Переключение Mode 2→1
160	108.1	0.02	350	6-Step	Стабилизация T
200	107.5	-0.01	350→200	6-Step	Снижение нагрузки
225	91.2	-0.45	200	SHE-5	Переключение Mode 1→2
252	78.6	-0.38	200	SHE-5,7	Переключение Mode 2→3
290	62.3	-0.22	200	SHE-5,7,11	Переключение Mode 3→4

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для оценки эффективности предложенной адаптивной системы проведено сравнение с вариантами статического (фиксированного) использования каждого из режимов ШИМ, а также со стандартной синусоидальной ШИМ (СШИМ) с несущей частотой 3 кГц. Сравнение проведено при номинальном токе нагрузки $I = 300$ А и длительности моделирования 300 с. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4
Table 4

Сравнительный анализ режимов управления инвертором
Comparative analysis of inverter control modes

Параметр	6-Step	SHE-5	SHE-5,7	SHE-5,7,11	СШИМ 3 кГц	Адаптивная	Ед.изм.
THD тока, %	24.01	11.41	9.77	7.78	4.82	9.12	%
5-я гармоника	14.78	0.05	0.05	0.05	0.31	0.05	% от осн.

7-я гармоника	10.50	8.49	0.02	0.02	0.25	0.02	% от осн.
11-я гармоника	4.83	4.71	4.61	0.04	0.18	1.52	% от осн.
Комм./период	6	10	14	18	~60	6–18	шт.
P_{sw} коммут., Вт	186	312	438	564	1875	312–564	Вт
T_{max} кристалла	78.5	89.2	97.6	112.4	125+	108.1	°С
Перегрев $T > 125^{\circ}\text{C}$	Нет	Нет	Возможен	Да	Да	Нет	–
Время работы до $T > 110^{\circ}\text{C}$	>300	>300	245	142	98	>300	с

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ данных табл. 4 показывает, что стандартная 6-ступенчатая система управления обеспечивает минимальные потери на коммутацию (186 Вт) и наименьший нагрев ($T_{max} = 78.5^{\circ}\text{C}$), однако характеризуется наибольшим значением THD (24.01 %), что недопустимо для многих промышленных применений. Статическое использование режима SHE-5,7,11 обеспечивает THD = 7.78 %, но приводит к перегреву транзисторов ($T_{max} = 112.4^{\circ}\text{C}$) и достижению критической температуры 125°C за 142 с при номинальной нагрузке.

Стандартная СШИМ при несущей частоте 3 кГц обеспечивает наименьший THD (4.82 %), но потери на коммутацию (1875 Вт) превышают потери 6-ступенчатого режима более чем в 10 раз, а критическая температура 125°C достигается уже через 98 с, что делает данный режим непригодным для длительной работы при номинальной нагрузке без применения дополнительных систем охлаждения. Следует отметить, что данное сравнение наглядно демонстрирует компромисс, на который идёт адаптивная система: при частоте коммутаций СШИМ (~60 коммутаций за период, т.е. 3 кГц при основной частоте 50 Гц), что на порядок выше, чем в режимах SHE (6–18 коммутаций за период), достигается лучший THD. Однако адаптивная система целенаправленно жертвует качеством формы тока (THD 9.12 % против 4.82 %) ради тепловой разгрузки силовых ключей и обеспечения длительной безаварийной работоспособности преобразователя.

Предложенная адаптивная система обеспечивает компромиссное значение THD = 9.12 % (средневзвешенное за период моделирования), при этом максимальная температура кристалла не превышает 108.1°C , что обеспечивает запас до предельно допустимой температуры 125°C не менее 17°C . Адаптивная система гарантирует исключение 5-й и 7-й гармоник на протяжении не менее 78 % рабочего времени, а полное исключение 5-й, 7-й и 11-й гармоник – не менее 35 % времени при типовом графике нагрузки. Время непрерывной безаварийной работы при номинальной нагрузке превышает 300 с (не ограничено), что принципиально отличает адаптивную систему от статических режимов SHE-5,7,11 и СШИМ.

Таблица 5

Table 5

Распределение режимов адаптивной системы при различных профилях нагрузки

Mode distribution of the adaptive system under different load profiles

Профиль нагрузки	6-Step, %	SHE-5, %	SHE-5,7, %	SHE-5,7,11, %
Лёгкая ($I \leq 150\text{ A}$)	0	5	15	80
Средняя ($I \approx 250\text{ A}$)	10	18	37	35
Тяжёлая ($I \approx 350\text{ A}$)	42	28	22	8
Пиковая ($I = 400\text{ A}$)	68	22	10	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные результаты показывают, что разработанная система управления эффективно решает проблему негативного влияния гармоник на питающую сеть. Автоматическое переключение между режимами работы в зависимости от температурного состояния силовых ключей позволяет оптимизировать работу инвертора без внешнего вмешательства.

Важным преимуществом предложенной системы является возможность

переключения между режимами без останова агрегата, что особенно актуально для непрерывных технологических процессов на промышленных предприятиях. Использование алгоритма Ньютона-Рафсона для расчета углов коммутации показало высокую эффективность в определении оптимальных параметров управления.

Реализация защиты от перегрузки инверторов за счет автоматического снижения частоты коммутаций при повышении температуры силовых ключей предотвращает перегрев транзисторов и значительно увеличивает срок службы силового преобразователя. Это особенно важно для промышленных применений, где надежность оборудования является критическим фактором.

Выводы (Conclusions)

В результате проведенного исследования была разработана и исследована компьютерная имитационная модель трёхфазного двухуровневого инвертора тока на базе IGBT транзисторов с интегрированными тепловыми моделями и системой коммутации силовых ключей на базе широтно-импульсной модуляции с выборочным исключением гармоник (ВИГШИМ). Основным достижением работы является решение проблемы негативного влияния гармоник 5, 7 и 11 порядков на питающую сеть промышленного предприятия при использовании метода выборочного устранения гармоник (SHE).

Разработанная система управления на основе регулятора на нечёткой логике обеспечивает автоматическое переключение между различными режимами работы в зависимости от температурного состояния силовых ключей: от стандартного шестиступенчатого режима до режимов с исключением 5, 7 и 11 гармоник. Важным преимуществом системы является реализация защиты от перегрузки инверторов за счет автоматического снижения частоты коммутаций при повышении температуры силовых ключей, что предотвращает перегрев транзисторов и увеличивает срок службы силового преобразователя.

Результаты гармонического анализа подтверждают эффективность предложенных алгоритмов управления и значительное улучшение качества выходного тока инвертора без применения дополнительных систем фильтрации тока. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной системы на промышленных предприятиях для улучшения качества электроэнергии без дополнительных капитальных затрат на модернизацию силовой части инвертора.

Сравнительный анализ показал, что предложенная адаптивная система управления обеспечивает среднее значение THD тока 9.12 %, что на 62 % ниже по сравнению с 6-ступенчатым режимом (THD = 24.01 %) и позволяет поддерживать температуру кристалла IGBT на уровне, не превышающем 108 °С при номинальной нагрузке. В отличие от статического режима SHE-5,7,11 и стандартной синусоидальной ШИМ, приводящих к перегреву транзисторов за 142 с и 98 с соответственно, адаптивная система обеспечивает неограниченное время безаварийной работы за счёт интеллектуального управления частотой коммутаций.

Разработанный регулятор на нечёткой логике с тремя входными переменными (температура, скорость изменения температуры, ток нагрузки) и базой из 36 правил обеспечивает плавное упреждающее переключение между режимами, что исключает резкие переходные процессы в силовой части инвертора и повышает надёжность системы в целом.

Литература

1. Komurcugil H., Bayhan S., Guzman R., Malinowski M., Abu-Rub H. Advanced Control of Power Converters. 2023. doi: 10.1002/9781119854432.
2. Rashid M. H., ed. Power Electronics Handbook. 5th ed. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2024. ISBN: 978-0323992169. doi: 10.1016/C2021-0-02072-1.
3. Nucci C. A., Borghetti A., Napolitano F., et al. Basics of Power Systems Analysis // In: Papailiou K. O., ed. Springer Handbook of Power Systems. Springer Handbooks. Singapore: Springer; 2021. doi: 10.1007/978-981-32-9938-2_5.
4. Buccella C., Cimatorini M. G., Cecati C. Selective Harmonic Elimination Modulation for HVDC Modular Multilevel Converter // 2021 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC), Genoa, Italy. 2021. Pp. 1–6. doi: 10.1109/AEITHVDC52364.2021.9474620.
5. Pan S., et al. Unified Switching Frequency Minimized Harmonic Mitigation Technique for Asymmetric Cascaded H-Bridge Converters // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2024. Vol. 12, No. 2. Pp. 2006–2016. doi: 10.1109/JESTPE.2024.3364246.
6. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и

воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2019. 360 с.

7. Zhang Z., Chen R. Design of Three-Phase AC Power Electronics Converters. 2023. doi: 10.1002/9781119794264.

8. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учебник. 5-е изд., испр. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. 672 с.

9. Górecki P., Wojciechowski D. Accurate Electrothermal Modeling of High Frequency DC–DC Converters With Discrete IGBTs in PLECS Software // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. Vol. 70, No. 6. Pp. 5739–5746. doi: 10.1109/TIE.2022.3189102.

10. Шрейнер Р. Т., Дмитренко Ю. А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 320 с.

11. Gonzalez J. O., Pérez-Estévez D., Wu R., et al. Impact of Linear-PWM and MPC controllers on the power device losses in a grid-tied two-level inverter // 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Ghent, Belgium. 2021. Pp. 1–10. doi: 10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570585.

12. Istenes G., Horváth K. Control Algorithm Development of Electrical Drives by Using Finite Element Model in Connected MATLAB/Simulink and JMAG Framework // 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria. 2023. Pp. 1–4. doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202412.

13. S. N L, S. G. Hybrid Multilevel Inverter Control for Harmonic Mitigation // 2023 International Conference on Control, Communication and Computing (ICCC), Thiruvananthapuram, India. 2023. Pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCC57789.2023.10165006.

14. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2020. 704 с.

15. Lingom P. M., Libouga I. O., Unruh R., et al. Pulsating Torque Harmonics in Electric Motors Driven by Carrier-Based PWM Multilevel Cascaded H-bridge Inverter // 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Houston, TX, USA. 2025. Pp. 703–708. doi: 10.1109/IEMDC60492.2025.11060992.

Авторы публикации

Юрченко Виктор Петрович – аспирант Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. *E-mail:* yurchenkovik@gmail.com.

Кондратьев Сергей Евгеньевич – аспирант Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. *ORCID*:* <http://orcid.org/0000-0002-7028-9407>, *E-mail:* razthepsycho@yandex.ru.

Пономарев Павел Сергеевич – аспирант Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. *Email:* pavel.sergeev4.ponomarev@gmail.com.

Пикалов Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доцент «Автоматизированного электропривода и робототехники» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. *Email:* wreditels@mail.ru.

Безденежных Даниил Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированного электропривода и робототехники» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. *Email:* bdv.lstu@gmail.com.

References

1. Komurcugil H, Bayhan S, Guzman R, Malinowski M, Abu-Rub H. Advanced Control of Power Converters. 2023. doi:10.1002/9781119854432.

2. Rashid MH, editor. Power Electronics Handbook. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier); 2024. ISBN: 978-0323992169. doi:10.1016/C2021-0-02072-1.

3. Nucci CA, Borghetti A, Napolitano F, et al. Basics of Power Systems Analysis. In: Papailiou KO, editor. Springer Handbook of Power Systems. Springer Handbooks. Singapore: Springer; 2021. doi:10.1007/978-981-32-9938-2_5.

4. Buccella C, Cimatorni MG, Cecati C. Selective Harmonic Elimination Modulation for HVDC Modular Multilevel Converter. In: 2021 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC); 2021; Genoa, Italy. pp.1–6. doi:10.1109/AEITHVDC52364.2021.9474620.

5. Pan S, et al. Unified Switching Frequency Minimized Harmonic Mitigation Technique for Asymmetric Cascaded H-Bridge Converters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics

in Power Electronics. 2024;12(2):2006–2016. doi:10.1109/JESTPE.2024.3364246.

6. Leznov BS. Energoberezhenie i reguliruemiyi privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh. Moscow: Energoatomizdat; 2019. 360 p. (In Russ).

7. Zhang Z, Chen R. Design of Three-Phase AC Power Electronics Converters. 2023. doi:10.1002/9781119794264.

8. Zinoviev GS. Osnovy silovoi elektroniki: uchebnik. 5th ed., rev. and enl. Novosibirsk: NGTU Publ.; 2020. 672 p. (In Russ).

9. Górecki P, Wojciechowski D. Accurate Electrothermal Modeling of High Frequency DC–DC Converters With Discrete IGBTs in PLECS Software. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023;70(6):5739–5746. doi:10.1109/TIE.2022.3189102.

10. Shreiner RT, Dmitrenko YuA. Optimal'noe chastotnoe upravlenie asinkhronnymi elektroprivodami. Ekaterinburg: UrO RAN; 2018. 320 p. (In Russ).

11. Gonzalez JO, Pérez-Estévez D, Wu R, et al. Impact of Linear-PWM and MPC controllers on the power device losses in a grid-tied two-level inverter. In: 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe); 2021; Ghent, Belgium. pp.1–10. doi:10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570585.

12. Istenes G, Horváth K. Control Algorithm Development of Electrical Drives by Using Finite Element Model in Connected MATLAB/Simulink and JMAG Framework. In: 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA); 2023; Varna, Bulgaria. pp.1–4. doi:10.1109/ELMA58392.2023.10202412.

13. N L S, G S. Hybrid Multilevel Inverter Control for Harmonic Mitigation. In: 2023 International Conference on Control, Communication and Computing (ICCC); 2023; Thiruvananthapuram, India. pp.1–6. doi:10.1109/ICCC57789.2023.10165006.

14. Klyuchev VI. Teoriya elektroprivoda: uchebnik dlya vuzov. 3rd ed., rev. and enl. Moscow: Energoatomizdat; 2020. 704 p. (In Russ).

15. Lingom PM, Libouga IO, Unruh R, et al. Pulsating Torque Harmonics in Electric Motors Driven by Carrier-Based PWM Multilevel Cascaded H-bridge Inverter. In: 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC); 2025; Houston, TX, USA. pp.703–708. doi:10.1109/IEMDC60492.2025.11060992.

Authors of the publication

Viktor P. Yurchenko – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
E-mail: yurchenkovik@gmail.com.

Sergey E. Kondratyev – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. ORCID*:
<http://orcid.org/0000-0002-7028-9407>, E-mail: razthepsycho@yandex.ru.

Pavel S. Ponomarev – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
E-mail: pavel.sergeevi4.ponomarev@gmail.com.

Vladimir V. Pikalov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
E-mail: wreditels@mail.ru.

Daniil V. Bezdenzhnykh – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
E-mail: bdv.lstu@gmail.com.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 12.11.2025 г.

Отредактировано 12.03.2026 г.

Принято 17.03.2026 г.