

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ФИКСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ АЛГОРИТМЕ ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Статья посвящена вопросам моделирования трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник. Основное внимание уделено расчету углов переключений посредством численного метода Ньютона-Рафсона для алгоритма широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник, основанного на четвертьволновой симметрии с сохранением постоянства заданного уровня первой гармоники. Получены решения нелинейных уравнений для двух вариантов удаления гармоник: 17 и 19; 17, 19, 35 и 37. Разработанные модели рассматриваемых алгоритмов модуляции позволяют проводить исследования показателей электромагнитной совместимости трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной нейтралью на базе различных многопульсных схем соединения с питающей сетью. Полученные спектры напряжений при двух вариантах удаления гармоник удовлетворяют требованиям международного стандарта качества электроэнергии IEC 61000-2-12. На основе анализа результатов моделирования кривых линейных напряжений и фазных токов сети в условиях главного привода прокатной клетки при 18-пульсной схеме подключения показана хорошая работоспособность алгоритма широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник.

**Ключевые слова:** силовая электроника, трехуровневый преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, удаление выделенных гармоник.

#### ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких десятилетий алгоритмы модуляции находятся в центре внимания научных исследователей, так они напрямую влияют на эффективность силовых полупроводниковых преобразователей [1–6]. Главной задачей любого алгоритма модуляции является получение наилучших форм сигналов (напряжений и токов) преобразователя с оптимальными характеристиками в условиях соблюдения требований нагрузки. Второстепенными задачами являются минимизация влияния высших гармоник, снижение пульсации и разбаланса напряжения в звене постоянного тока, уменьшение уровня синфазного напряжения и скорости нарастания напряжения ( $du/dt$ ). Получение требуемых характеристик работы преобразователя с помощью экспериментальных исследований – это сложный и дорогостоящий способ, поэтому актуальным становится математическое и имитационное моделирование [7–12].

Из всего разнообразия рассматриваемых топологий преобразователей трехуровневые преобразователи частоты с фиксированной нейтралью (ЗУ-ПЧ с ФН) являются наиболее промышленно применимыми. В отечественной литературе недостаточно полно рассмотрены вопросы моделирования и исследования данных преобразователей при ШИМ с удалением выделенных гармоник.

#### ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФИКСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В основе топологии ЗУ ПЧ с ФН лежит трехфазная мостовая схема, выполненная из 12 полностью управляемых полупроводниковых ключей  $VT_1$ – $VT_{12}$ , 12 обратных диодов  $VD_1$ – $VD_{12}$ , 6 фиксированных диодов

$VD_{1c}$ – $VD_{6c}$  и двух эквивалентных емкостей  $C_{dc1}$  и  $C_{dc2}$ , образующих нулевой потенциал преобразователя (рис. 1) [13–17].

В каждой фазной стойке моста преобразователя находится по 4 обратных диода и силовых ключа и 2 фиксированных диода. Сумма напряжений  $u_{dc1}$  и  $u_{dc2}$  на емкостях  $C_{dc1}$  и  $C_{dc2}$  определяет уровень напряжения в звене постоянного тока  $u_{dc}$ . Из 4 ключей в каждой стойке моста одновременно могут быть включены только 2, подключающие потенциалы  $u_{dc}$  к фазе нагрузки в трех точках «+», «0» и «-».

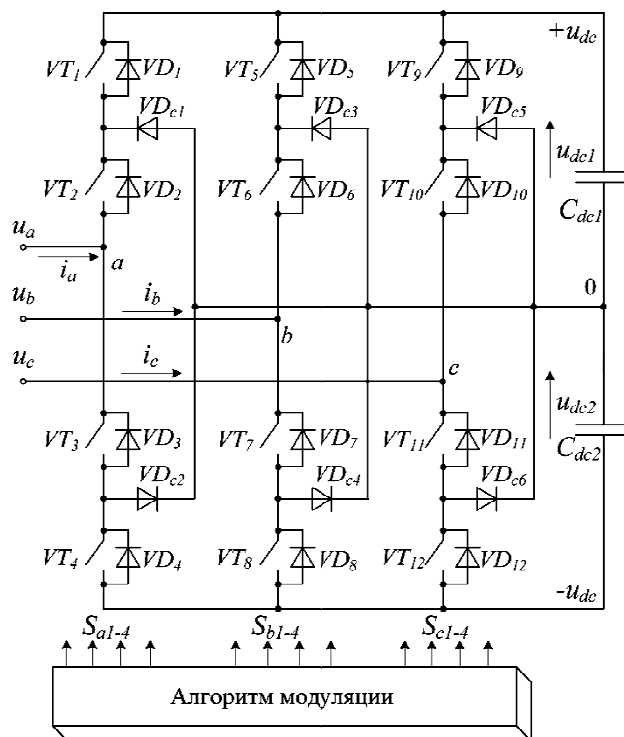


Рис. 1. ЗУ мостовая схема преобразователя с ФН

Различные комбинации подключения  $S_{abc1-4}$  моста формируют три состояния фазных напряжений  $u_a$ ,  $u_b$  и  $u_c$  преобразователя: [P] – подключение к положительному полюсу «+», [O] – подключение к нейтральному полюсу «0» и [N] – подключение к отрицательному полюсу «-» [18–20]. Все состояния и уровни выходного фазного напряжения относительно нейтральной точки преобразователя представлены в **таблице**.

#### ПРИНЦИП РАБОТЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

ШИМ с удалением выделенных гармоник является алгоритмом модуляции, который позволяет подавлять выбранные высшие гармоники в кривой выходного напряжения преобразователя. Количество удаляемых гармоник зависит от частоты переключения полупроводниковых модулей. При стандартной реализации данного алгоритма модуляции сигнал выходного фазного напряжения 3У мостового преобразователя с ФН будет симметричным относительно четверти периода. В силу симметрии относительно начала координат четные гармоники равны нулю, а высшие нечетные гармоники будут либо в фазе, либо в противофазе основной гармонике, как показано на **рис. 2**, где  $\alpha_N$  – количество углов переключений за четверть периода выходного фазного напряжения преобразователя. Помимо возможности удаления выделенных гармоник, данный алгоритм модуляции позволяет обеспечить уровень первой гармоники выходного фазного напряжения преобразователя на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции [21].

$$U_m(m) = (2/\pi) \cdot u_{dc} \cdot m, \quad (1)$$

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

**Возможные состояния и уровни  
выходного фазного напряжения 3У мостовой схемы с ФН**

Стойка фазы A			
$S_{a1}$	on	off	off
$S_{a2}$	on	on	off
$S_{a3}$	off	on	on
$S_{a4}$	off	off	on
$u_a$	$+u_{dc}/2$	0	$-u_{dc}/2$
	[P]	[O]	[N]
Стойка фазы B			
$S_{b1}$	on	off	off
$S_{b2}$	on	on	off
$S_{b3}$	off	on	on
$S_{b4}$	off	off	on
$u_b$	$+u_{dc}/2$	0	$-u_{dc}/2$
	[P]	[O]	[N]
Стойка фазы C			
$S_{c1}$	on	off	off
$S_{c2}$	on	on	off
$S_{c3}$	off	on	on
$S_{c4}$	off	off	on
$u_c$	$+u_{dc}/2$	0	$-u_{dc}/2$
	[P]	[O]	[N]

Последнее становится возможным, если выполняется равенство

$$k = N - 1,$$

где  $N$  – количество переключений полупроводниковых модулей за четверть периода выходного фазного напряжения;  $k$  – количество удаляемых гармоник.

Для **рис. 2** разложение в ряд Фурье фазного напряжения выглядит как

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} (U_m \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)), \quad (2)$$

где  $U_m$  определяется на основе выражения

$$U_m = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(\omega t) \cdot \sin(n \cdot \omega t) d(\omega t) = \frac{4}{\pi \cdot n} \cdot \frac{u_{dc}}{2} \cdot \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k), \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  – угол переключения при удалении  $k$ -й гармоники.

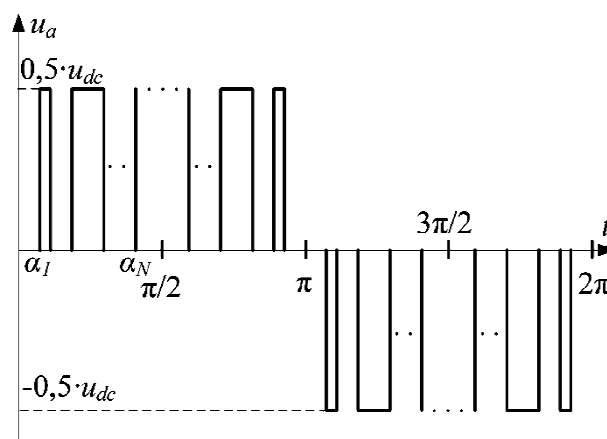
Если подставить (3) в (2), то получим выражения для фазного напряжения 3У ПЧ с ФН в виде

$$u = \sum_{n=1,3,\dots,\infty} \frac{2 \cdot u_{dc}}{\pi \cdot n} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n \cdot \alpha_i) \right] \times \sin(\omega t \cdot n). \quad (4)$$

Анализ выражения (4) позволяет определить связь между углами переключений и спектральным составом выходного напряжения посредством системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(\alpha_k) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2}{u_{dc}} \cdot U_m \\ \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) = 0, n = 5, 7, 11, \dots \end{cases} \quad (5)$$

При условии постоянства напряжения звена постоянного тока, введем в систему (5) коэффициент модуляции



**Рис. 2. Типовое выходное напряжение  
3У преобразователя при ШИМ с удалением  
выделенных гармоник**

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2}{u_{dc}} \cdot U_m, \text{ при } m \in [0; 1],$$

после чего получим

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(\alpha_k) = m; \\ \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) = 0, n = 5, 7, 11, \dots \end{cases} \quad (6)$$

Нелинейная система (6) имеет несколько решений, зависящих от начальных приближений. Для отыскания всех возможных решений используется метод перебора начальных приближений. Среди полученных результатов выделяют варианты, удовлетворяющие условию

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_N < \pi/2. \quad (7)$$

Нелинейная система уравнений (6) решена с помощью численного алгоритма Ньютона–Рафсона [6] для:

- удаления 17 и 19 гармоник (рис. 3);
- удаления 17, 19, 35 и 37 гармоник (рис. 4).

#### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследований была принята схема подключения ЗУ ПЧ с ФН к питающей сети главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана

5000 ЛПЦ №9 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (рис. 5). Исследование влияния на сеть работы привода при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник проводилось на математической модели, разработанной авторами в программе Matlab/Simulink. Эта логико-математическая модель позволяет в полном объеме проводить исследования статических и динамических характеристик ЗУ ПЧ с ФН и показателей электромагнитной совместимости [22, 23]. Результаты моделирования кривых переходных процессов токов и напряжений при ШИМ с удалением 17 и 19 гармоник представлены на рис. 6 и 17, 19, 35 и 37 гармоник – на рис. 7.

Гармонический анализ рис. 6 показал, что при удалении 17 и 19 гармоник в видимом спектре тока сети наибольший уровень по отношению к основной гармонике показывают только 35 и 37. В свою очередь, тот же анализ для рис. 7 при удалении 17, 19, 35 и 37 гармоник показал абсолютно чистый видимый спектр. Полученные спектры напряжений при двух вариантах удаления гармоник удовлетворяют требованиям международного стандарта качества электроэнергии ИЕС 61000-2-12. Это доказывает достаточно хорошую работоспособность алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник в составе многопульсных схем подключения ЗУ ПЧ с ФН к питающей сети.

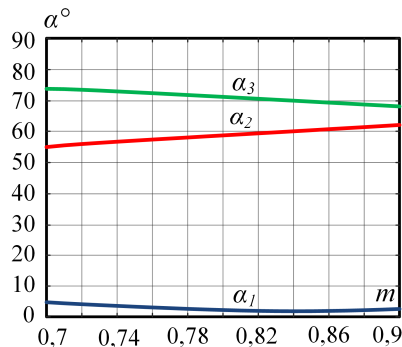


Рис. 3. Зависимости углов переключений от коэффициента модуляции для удаления 17 и 19 гармоник

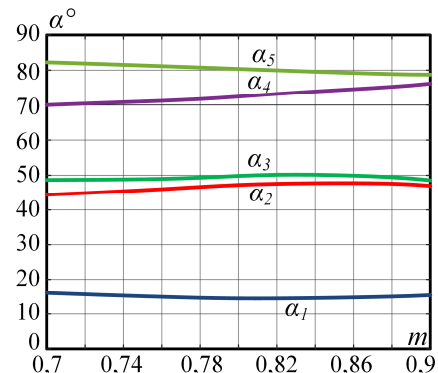


Рис. 4. Зависимости углов переключений от коэффициента модуляции для удаления 17, 19, 35 и 37 гармоник

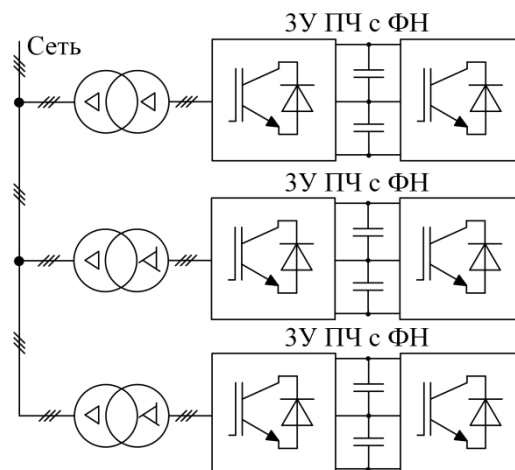


Рис. 5. Имитационная модель исследуемого объекта

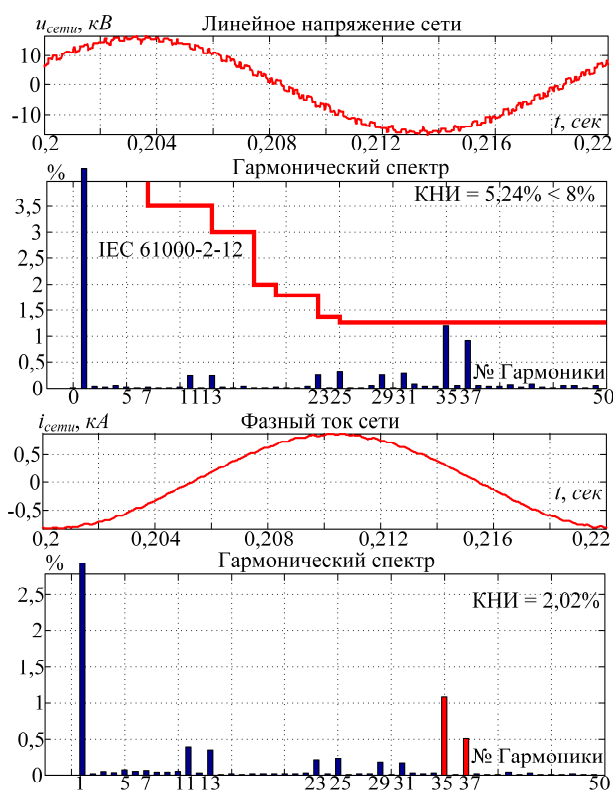


Рис. 6. Формы и спектры сетевого тока и напряжения при удалении 17 и 19 гармоник

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что разработанная математическая модель позволяет проводить исследования электромагнитной совместимости ЗУ ПЧ с ФН при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник на базе многопульсных схем соединения с питающей сетью. Модель может быть использована при исследовании влияния на внутризаводские сети электроснабжения активных выпрямителей напряжения в составе различных технологических объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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). P. 29–41.
2. Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Bernet S., Perez M. Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2012. Vol. 18(4). P. 26–39.
3. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2013. №2. С. 48–52.
4. Пьей Пью Тун. Совершенствование импульсных преобразователей в составе автономных систем электропитания электротехнических комплексов: дис. ... кан. техн. наук / Пьей Пью Тун. Санкт-Петербург, 2014. 188 с.
5. Радионов А.А., Маклаков А.С. Трехуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2015. №6(542). С. 80–87.
6. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The

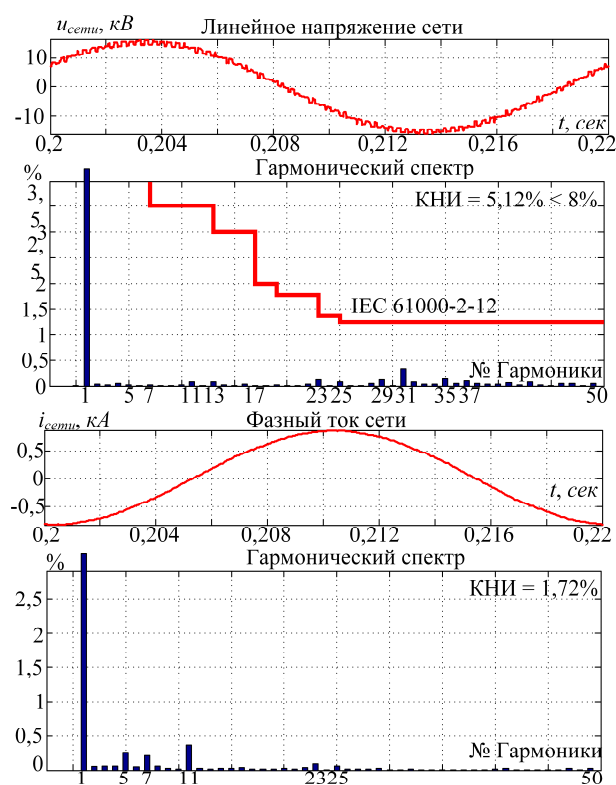


Рис. 7. Формы и спектры сетевого тока и напряжения при удалении 17, 19, 35 и 37 гармоник

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. P. 2688–2701.

7. Wu Bin High-power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2006. 333 p.
8. Брованов С.В. Многоуровневые полупроводниковые преобразователи частоты с емкостным делителем напряжения для автономных систем генерирования электрической энергии: дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Брованов. Новосибирск, 2012. 452 с.
9. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Вып. 1., №1. С. 3–7.
10. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
11. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
12. Ефимов А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока: Теория, математическое моделирование, управление: дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Ефимов. Новоуральск, 2002. 426 с.
13. Радионов А.А., Маклаков А.С., Чернышев А.Д. Использование мощных электроприводов на базе активных двунаправленных преобразователей в составе промышленной Smart Grid системы // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2015. Т. 15, № 1. С. 74–81.
14. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2014. № 4. С. 7–13.
15. Храмин 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.
16. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМа // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2., № 1. С. 38–46.
  17. Маклаков А.С., Радионов А.А. Энергоэффективное управление двунаправленным преобразователем частоты в составе электропривода ветрогенератора // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2., № 4. С. 21–26.
  18. Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2., № 1. С. 30–37.
  19. 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.
  20. Радионов А.А., Маклаков А.С. О возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством электропривода на базе АС-DC-АС преобразователя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. №2. С. 78–83.
  21. Маклаков А.С., Радионов А.А. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2. С. 40–47.
  22. Маклаков А.С., Маклакова Е.А. Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т.4, №1. С. 66–73.
  23. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистного стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3. С. 16–25.

Поступила в редакцию 09 января 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SIMULATION OF 3L NPC CONVERTER WITH SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION PWM

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Department «Mechatronics and Automation», South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Andrey A. Radionov

Dr.Sc. (Engineering), Professor, Vice rector, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Alexander S. Maklakov

Ph.D. student, «Mechatronics and Automation» department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

This article is devoted to the simulation of a three-level neutral point clamped converter with a selective harmonic elimination pulse-width modulation technique. The main attention was focused on calculation of switching angles using of the Newton-Raphson algorithm for the selective harmonic elimination pulse-width modulation. Solutions of nonlinear equations were obtained for two elimination harmonic cases: 17 and 19; 17, 19, 35 and 37. As an example, the simulation results of phase current and voltage curves and total harmonic distortion at the point of connection to the grid of three three-level neutral point clamped converters with 18-pulse connection circuit are shown. The model allows us to research the electromagnetic compatibility of the three-level neutral point clamped converters with the selective harmonic elimination pulse-width modulation technique based on different multipulse connection circuits to the grid.

**Keywords:** Power electronics, neutral point clamped, three-level converter, pulse-width modulation, selective harmonic elimination.

#### 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). P. 29–41.
2. Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Bernet S., Perez M. Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2012. Vol. 18(4). P. 26–39.
3. Khamshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Evaluation of Methods PWM Voltage Active Rectifiers Rolling Mills. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no.2, pp. 48–52. (in Russian)
4. P'ey P'o Tun. *Sovershenstvovanie impulsnykh preobrazovateley v sostave avtonomnykh sistem elektropitaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov*. Kand. Tekhn. Nauk Dis. [Improving of switching converters in autonomous power electrical systems. Ph.D. Diss.]. St. Petersburg, 2014. 188 p.
5. Radionov A.A., Maklakov A.S. Three Level Back to Back Converters as Part of Medium Voltage AC Drives: Contemporary Condition and Control Methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2015, no.6, pp. 80–87. (in Russian)
6. 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. P. 2688–2701.
7. Wu Bin High-power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2006. 333 p.
8. Brovanov S.V. *Mnogourovnevye poluprovodnikovye preobrazovateli chastoty s emkostnym delitelem*

- napryazheniya dlya avtonomnykh sistem generirovaniya elektricheskoy energii*. Dokt. Diss. [Multilevel converters with a direct voltage for autonomous electric power generation systems. Dokt. Diss.]. Novosibirsk, 2012, 452 p.
9. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no.1, pp. 3–7. (in Russian)
  10. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovye polnostyu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli* [Power converters]. St. Petersburg, Elektrosila Publ., 2003. 172 p.
  11. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives based on semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg, URO RAN, 2000. 654 p.
  12. Efimov A.A. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka: Teoriya, matematicheskoe modelirovanie, upravlenie*. Dokt. Diss. [PWM converters for AC motor drives: The theory, mathematical modeling, control. Dokt. Diss.]. Novouralsk, 2002. 426 p.
  13. Radionov A.A., Maklakov A.S., Chernyshev A.D. Powerful Electric Drives Based on Active Bidirectional Converters within Industrial Smart Grid. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 74–81. (in Russian)
  14. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Methods PWM of Large Power Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol. 2, no.4, pp. 7–13. (in Russian)
  15. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical Model of the Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no.2, pp. 3–9. (in Russian)
  16. Khramshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. Mathematical Model of the Power Circuit of STATCOM of Large Capacity. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.1, pp. 18–46. (in Russian)
  17. Maklakov A.S., Radionov A.A. Energy-efficient Control of Active Converters in Wind Generator Electric Drive Systems. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.4, pp. 21–26. (in Russian)
  18. Maklakov A.S., Radionov A.A. Study of SVPWM with Various Vector Selection Tables of Three Level Converter. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.1, pp. 30–37. (in Russian)
  19. Maklakov A.S., Gasiyarov V.R., Belyi A.V. Energy-Saving Electric Drive on the basis of Back to Back Converter. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no.1, pp. 23–30. (in Russian)
  20. Radionov A.A., Maklakov A.S. Possibility of reactive power compensation in the grid by the electric drive based on AC-DC-AC converter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2014, no. 2, pp. 78–83. (in Russian)
  21. Maklakov A.S., Radionov A.A. Influence of AFE Rectifier with Different Types of PWM on Supply Power. *Russian Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no.2, pp. 40–47. (in Russian)
  22. Maklakov A.S., Maklakova E.A. EMC Analysis of 18-pulse Connection Circuit based on 3L-AFE with SHEPWM. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2016, vol. 4, no.1, pp. 66–73. (in Russian)
  23. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Plate Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16–25. (in Russian)

Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 4 - 9. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-4-9

Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4 - 9. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-4-9