

Абулвелеев И.Р.<sup>1</sup>, Храмшин Т.Р.<sup>1</sup>, Корнилов Г.П.<sup>1</sup>, Никифоров Г.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»<sup>2</sup>ООО «Магнитогорскгазстрой»

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ТРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА

В статье представлена схема двухзвенного преобразователя частоты на базе трехуровневых активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения в составе регулируемого электропривода большой мощности. Рассмотрены основные способы формирования выходного напряжения инвертора средствами широтно-импульсной модуляции. Приведены основные принципы работы векторной ШИМ трехуровневого NPC-инвертора с фиксированной нейтральной точкой, включая формирование вектора выходного напряжения. Представлены формулы для расчета коэффициентов продолжительности и времени включения управляемых ключей, а также получены зависимости изменения продолжительности включения от угла задающего вектора при различных значениях коэффициента модуляции. В работе предложены стандартные шаблоны последовательности переключений. Представляет интерес произвести углубленное исследование предложенных алгоритмов формирования выходного напряжения инвертора с помощью математического моделирования, что будет осуществлено в будущем.

**Ключевые слова:** трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой, векторная широтно-импульсная модуляция, шаблоны переключений.

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным исполнением конверторов промышленных электроприводов большой мощности на сегодняшний день является параллельное включение двух одинаковых двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), каждый из которых представляет собой совокупность активного выпрямителя АВН (AFE – active front-end) и автономного инвертора напряжения АИН (VSI – voltage source inverter) [1, 2]. Подобная схема (рис. 1) нашла широкое применение в регулируемых электроприводах мощных прокатных станов, дробилок, конвейеров и т.д.

Силовой трансформатор конвертора выполнен по двенадцатипульсной схеме, для этого первичные обмотки двух отдельных трансформаторов соединены звездой и включены последовательно [3, 4]. Вторичная обмотка одного трансформатора соединена звездой, а второго – треугольником. В такой схеме ввиду симметрии трехфазной цепи отсутствуют гармоники, кратные 3. В свою очередь последовательное соединение первичных обмоток по 12-пульсной схеме позволяет за счет суммирования первых гармоник напряжений, сдвинутых на  $30^\circ$ , скомпенсировать гармоники тока  $6(2k-1)\pm 1$  порядка. Таким образом, в сетевом токе трансформаторов отсутствуют 3, 5, 7, 9, 15, 17, 19 и т.д. гармоники.

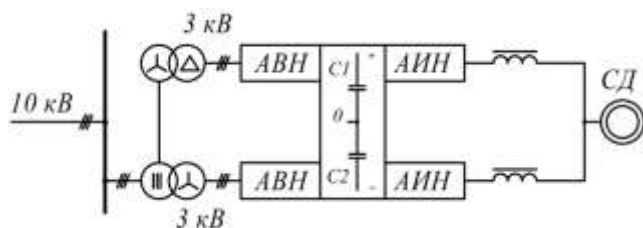


Рис. 1. Схема включения конвертора двигателя прокатного стана

Электрическая схема одного двухзвенного ПЧ, включающая в себя трехуровневые АВН и АИН, представлена на рис. 2. По сравнению с другими традиционными схемами ПЧ, такой подход обеспечивает двусторонний обмен энергией между двигателем и сетью, а также максимальное значение коэффициента мощности при потреблении практически синусоидального тока из сети.

Увеличение единичной мощности современных двигателей регулируемых электроприводов переменного тока оказало значительное влияние на развитие многоуровневых преобразователей частоты, в частности трехуровневых автономных инверторов напряжения с фиксированной нейтральной точкой NPC-VSI (Neutral Point Clamped) [5]. Подобная топология преобразователя, предложенная еще в 1981 году и получившая широкое распространение с середины 1990-х, имеет ряд преимуществ перед двухуровневыми инверторами:

1. Возможность подключения высоковольтных двигателей напряжением до 6000 В без дополнительного трансформатора на выходе преобразователя, благодаря последовательному включению ГТО-тириستоров или IGBT-транзисторов в фазах инвертора.

2. Пониженное содержание высших гармоник в форме кривых выходного напряжения и тока преобразователя. Формирование трехуровневого фазного напряжения позволяет получить пятиуровневое линейное напряжение на выходе инвертора и за счет этого более качественный гармонический состав [6].

Для формирования выходного напряжения трехуровневого инвертора в подавляющем большинстве систем используются три основных метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [7-13]:

1) Метод сравнения сигналов управления с кривой опорного напряжения CBPWM (Carrier based pulse width modulation).

2) Метод удаления выделенных гармоник SHE (Selective harmonic eliminated).

3) Метод векторной широтно-импульсной модуляции SVPWM (Space vector pulse width modulation).

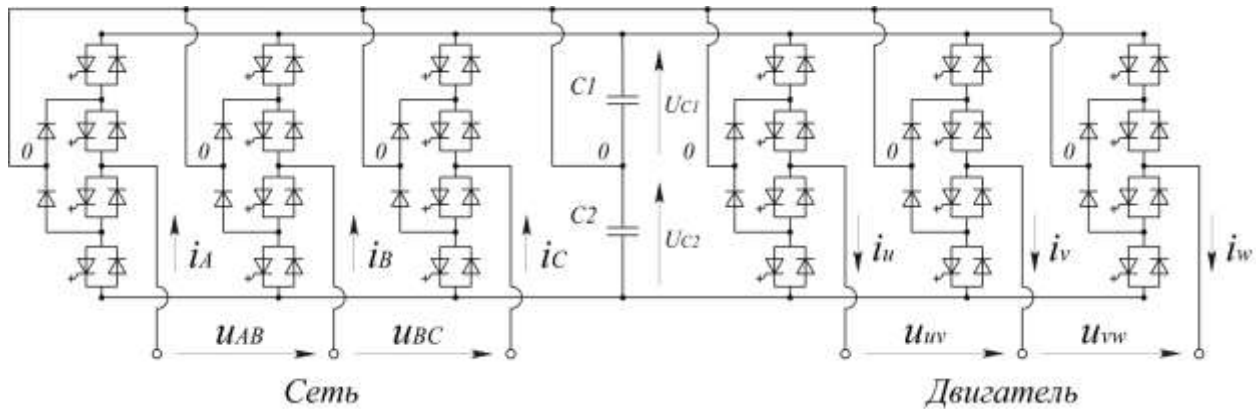


Рис. 2. Двухзвенный преобразователь частоты

Последний вариант является наиболее приемлемым в большинстве случаев, поскольку обладает значительной гибкостью при формировании кривой выходного напряжения и ориентирован на микропроцессорную реализацию [7].

#### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОНЯТИЯ ВЕКТОРНОЙ ШИМ

Трехуровневый NPC-инвертор имеет 27 различных комбинаций коммутационных состояний полупроводниковых ключей [8], так как каждая из трех фаз может иметь на выходе три различных уровня напряжения:  $P$ ,  $O$ ,  $N$ . Каждому коммутационному состоянию фазы инвертора соответствует определенный вектор выходного напряжения. Совокупность 27 возможных коммутационных состояний инвертора образует правильный шестиугольник на пространственной плоскости, сформированный из 19 соответствующих базовых векторов выходного напряжения (рис. 3). Базовые векторы включают в себя 6 «длинных» ( $a$  и  $b$ ), 6 «средних» ( $c$ ), 6 «коротких» ( $ap$  или  $an$  и  $bp$  или  $bn$ ) и 1 «нулевой» вектор ( $op$ ,  $on$  или  $oo$ ), названия которых в дальнейшем указаны без кавычек. Из рис. 3 видно, что любой короткий вектор можно получить двумя способами – комбинациями  $P$  и  $O$  или  $N$  и  $O$ , в соответствии с этим в обозначении вектора появляется буква  $p$  или  $n$ , например:  $ap$ ,  $bn$  и т.д. Обозначение нулевого вектора присваивается по аналогичному принципу. Положения ключей при формировании выходных напряжений сведены в табл. 1.

Шестиугольник на рис. 3 делится на секторы; они обозначены буквами  $A, B, C, D, E, F$ . Каждый сектор, в свою очередь, делится на четыре равносторонних малых треугольника с индексами 1, 2, 3 и 4. Направление индексации принято от вектора  $a$  к вектору  $b$ .

Задачей векторной ШИМ является формирование таких фазных выходных напряжений  $U_u, U_v, U_w$  трехуровневого NPC-инвертора, чтобы получить требуемый пространственный задающий вектор  $\underline{U}_{ref}$ :

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ref} &= \frac{2}{3} \cdot (U_u + U_v e^{j120^\circ} + U_w e^{j240^\circ}) = \\ &= k(t) \frac{U_{pn}}{\sqrt{3}} e^{j\theta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент модуляции, принимающий значение от 0 до 1 и равный отношению между требуемой

величиной амплитуды фазного напряжения  $|U_m|$  и его предельно возможным значением  $U_{pn}/\sqrt{3}$  (рис. 4);  $\theta$  – угол между задающим вектором и вектором  $a$ .

Подчеркнем, два перечисленных параметра: коэффициент модуляции (амплитуда)  $k$  и угол  $\theta$  определяют положение вектора задающего напряжения.

Пусть задан некоторый вектор  $\underline{U}_{ref}$ , как это показано на рис. 4. В связи с тем, что шестиугольник пространственных векторов обладает определенной внутренней симметрией, рассмотрим только случай, когда угол задающего вектора лежит в пределах  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ , т.е. в пространстве, ограниченном сектантом  $A$ .

При формировании задающего вектора напряжения, как правило, используют технику трех ближайших векторов NTV (Nearest three vectors) [9]. На рис. 4 конец вектора  $\underline{U}_{ref}$  расположен в затененном треугольнике  $A2$ , следовательно, согласно NTV для синтеза задающего вектора следует задействовать базовые векторы  $\underline{U}_S, \underline{U}_M$  и  $\underline{U}_L$  (индексы  $S, M, L$  означают короткий, средний и длинный векторы соответственно). Для получения требуемого значения амплитуды и угла  $\underline{U}_{ref}$  необходимо лишь рассчитать коэффициенты продолжительности включения каждого из трех ближайших базовых векторов. Таким образом, задающее напряжение определяется по формуле

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ref} &= d_S \cdot \bar{U}_S + d_M \cdot \bar{U}_M + d_L \cdot \bar{U}_L; \\ d_S + d_M + d_L &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $d_S, d_M, d_L$  – коэффициенты продолжительности включения короткого, среднего и длинного векторов соответственно, выраженные в долях.

Время включения трех ближайших векторов определяется периодом ШИМ  $T$  и рассчитывается в зависимости от области расположения вершины задающего вектора по формулам, приведенным в табл. 2 [10].

Пример изменения коэффициентов продолжительности в зависимости от угла при различных значениях коэффициента модуляции показан на рис. 5. Если вершина задающего вектора расположена в области  $A3$ , то в синтезе  $\underline{U}_{ref}$  участвуют два коротких вектора  $S1, S2$  и один средний  $M$ . Следовательно, в пределах области  $A3$  для заданного коэффициента модуляции сумма коэффициентов продолжительности трех базовых векторов  $dS1, dS2$  и  $dM$ , как видно из рис. 5, равна единице.

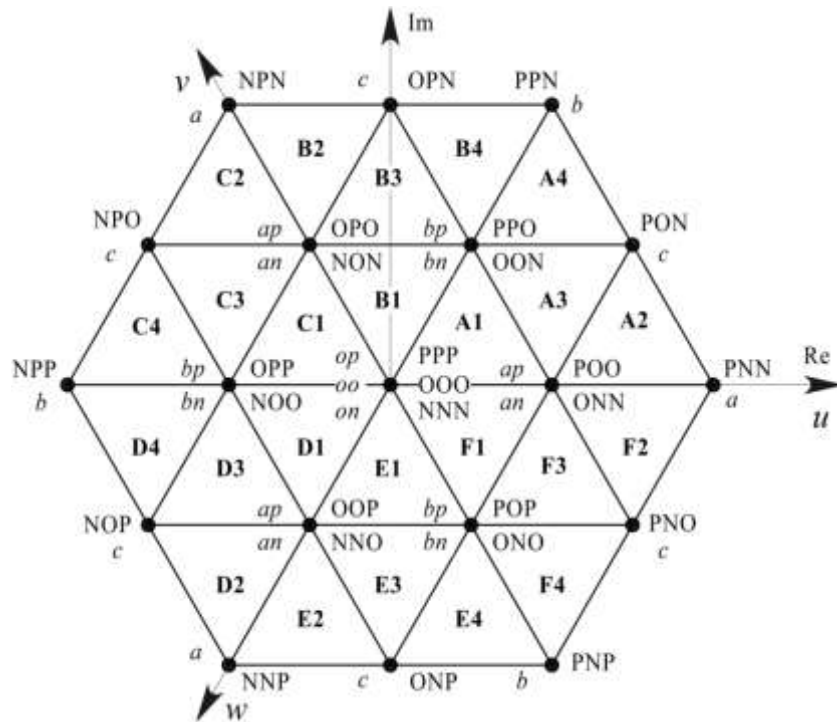


Рис. 3. Векторное представление выходных напряжений трехуровневого NPC-инвертора

Таблица 1

Положения ключей при формировании векторов напряжений

Категория	Обозначение	Положение ключей
Длинные $L$	$a$	PNN (1, -1, -1), NPN (-1, 1, -1), NNP (-1, -1, 1)
	$b$	PPN (1, 1, -1), NPP (-1, 1, 1), PNP (1, -1, 1)
Средние $M$	$c$	PON (1, 0, -1), OPN (0, 1, -1), NPO (-1, 1, 0), NOP (-1, 0, 1), ONP (0, -1, 1), PNO (1, -1, 0)
Короткие $S$	$ap$	POO (1, 0, 0), OPO (0, 1, 0), OOP (0, 0, 1)
	$an$	ONN (0, -1, -1), NON (-1, 0, -1), NNO (-1, -1, 0)
	$bp$	PPO (1, 1, 0), OPP (0, 1, 1), POP (1, 0, 1)
	$bn$	OON (0, 0, -1), NOO (-1, 0, 0), ONO (0, -1, 0)
Нулевые	$op, oo, on$	PPP (1, 1, 1), OOO (0, 0, 0), NNN (-1, -1, -1)

Таблица 2

Формулы расчета времени включения трех ближайших векторов

Область	Три ближайших вектора	Время включения
A1, B1, C1, D1, E1, F1	$op, oo, on$	$t_0 = T \cdot [1 - 2 \cdot k \cdot \sin(\theta + \pi/3)]$
	$ap, an$	$t_1 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin(\pi/3 - \theta)$
	$bp, bn$	$t_2 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin \theta$
A2, B2, C2, D2, E2, F2	$ap, an$	$t_1 = 2 \cdot T \cdot [1 - k \cdot \sin(\theta + \pi/3)]$
	$c$	$t_3 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin \theta$
	$a$	$t_4 = T \cdot [2 \cdot k \cdot \sin(\pi/3 - \theta) - 1]$
A3, B3, C3, D3, E3, F3	$ap, an$	$t_1 = T \cdot [1 - 2 \cdot k \cdot \sin \theta]$
	$bp, bn$	$t_2 = T \cdot [1 - 2 \cdot k \cdot \sin(\pi/3 - \theta)]$
	$c$	$t_3 = T \cdot [2 \cdot k \cdot \sin(\theta + \pi/3) - 1]$
A4, B4, C4, D4, E4, F4	$bp, bn$	$t_2 = 2 \cdot T \cdot [1 - k \cdot \sin(\theta + \pi/3)]$
	$c$	$t_3 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin(\pi/3 - \theta)$

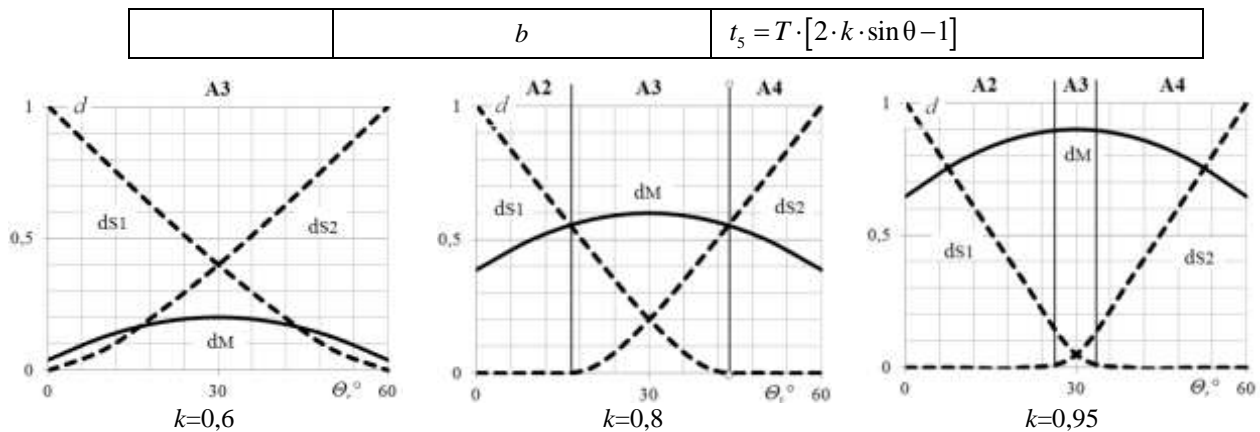


Рис. 4. Изменение коэффициента продолжительности включения векторов

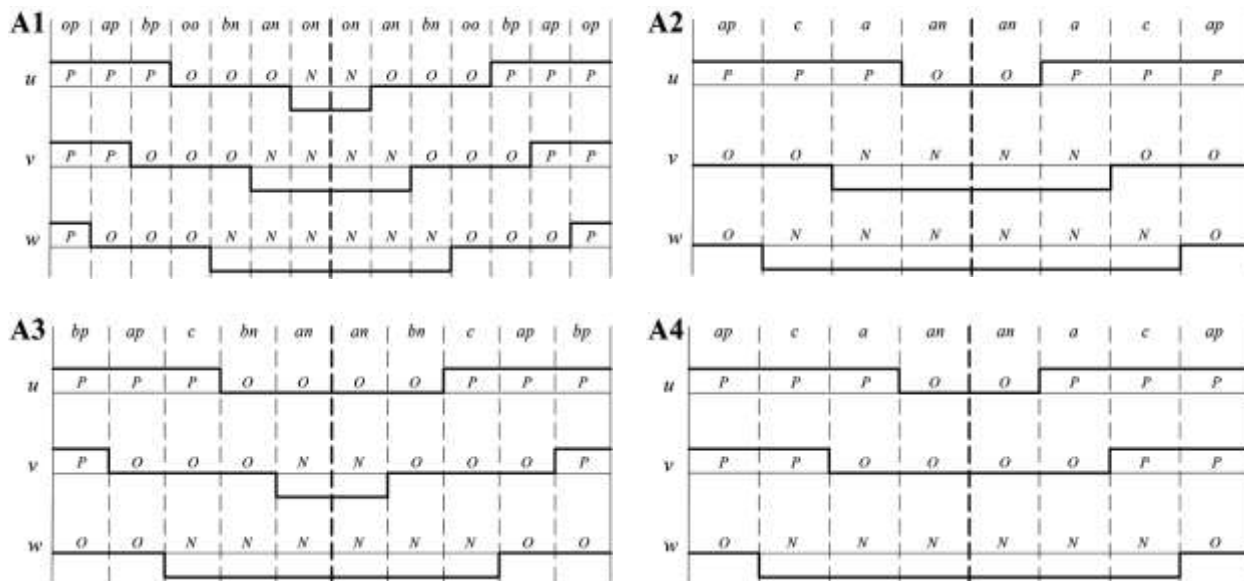


Рис. 5. Стандартные шаблоны циклов переключений NTV

#### ФОРМИРОВАНИЕ ШАБЛОНОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Стандартные шаблоны последовательности переключений для каждой области показаны на рис. 6. Следует отметить, что при построении подобных шаблонов важным условием является переключение только одного ключа при переходе от одного вектора к другому. В связи с этим в шаблонах фигурируют все возможные конфигурации коротких и нулевых векторов. Известно, что, изменяя соотношения продолжительности включения разнополярных коротких векторов ( $an$  и  $ap$ ,  $bn$  и  $bp$ ), можно контролировать потенциал нейтральной точки [11].

Следует отметить некоторые характерные особенности шаблонов, представленных на рис. 6, в дальнейшем оказывающих влияние не только на алгоритм формирования, но и на гармонический состав выходного напряжения. Например, векторы  $a$  и  $b$  присутствуют только в «крайних» областях сектора  $A2$  или  $A4$ , вектор  $c$  – во всех областях кроме  $A1$ , а векторы  $op$ ,  $oo$ ,  $on$  – только в области  $A1$ . Кроме того, для областей  $A2$  и  $A4$  характерно наличие только одной пары полярных коротких векторов:  $ap/an$  или  $bp/bn$ . Это приводит к тому, что каждая фаза в этих областях будет переключаться только в однополярном режиме « $O-P$ » или « $O-N$ ». Тогда как наличие в  $A1$  и  $A3$  обеих пар полярных

векторов приводит к двухполярным переключениям ключей каждой фазы инвертора « $P-O-N$ ».

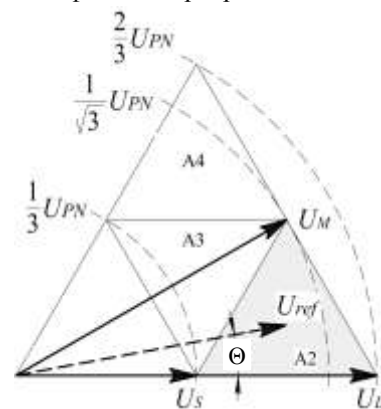


Рис. 6. Формирование задающего вектора напряжения

Формирование шаблонов переключений в зависимости от значения коэффициента модуляции, а также выводы и рекомендации будут представлены позже в следующем номере журнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. Анализ способов модуляции напряжения активных выпрямителей

- на базе модульных многоуровневых конвертеров // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2015. Т.15. №3. С. 25-36.
2. Rodriguez J., Lai J.S., 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.
  3. Abdulvelev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Electromagnetic Compatibility of High Power STATCOM in Asymmetrical Conditions, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7146966
  4. Храшин Т.Р., Абдулвелев И.Р., Корнилов Г.П. Электромагнитная совместимость мощного СТАТКОМа при несимметричных режимах работы питающей сети // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2, № 2. С. 40-46. doi: 10.14529/power150304
  5. Walczyn A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3-Level Inverters With Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol.4, pp. 152-157.
  6. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
  7. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
  8. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
  9. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-Point-Clamped Converter using the Virtual Space Vector Concept With Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
  10. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
  11. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
  12. Храшин Т.Р., Храшин Р.Р., Корнилов Г.П. Расчет электромагнитных процессов в трехфазном двухуровневом инверторе напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 212.
  13. Формирование фазных напряжений четырехуровневого высоковольтного преобразователя частоты / Т.Р. Храшин, Р.Р. Храшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов // Электротехнические системы и комплексы. 2011. № 1. С. 174-181.

Поступила в редакцию 27 июня 2016 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### BASIC PRINCIPLES OF SPACE VECTOR MODULATION FOR THREE-LEVEL NPC-INVERTERS

Il'dar R. Abdulvelev

Post-graduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Timur R. Khrashin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc (Eng.), Professor, Head of the department of electric power supply of industrial enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn\_mgn@mail.ru.

Gennadiy V. Nikiforov

D.Sc (Eng.), chairman of board of directors, Magnitogorsk gazstroy LLC, Magnitogorsk, Russia.

The article shows a scheme of a two-link converter on the basis of a three-level active front-end and voltage source inverter incorporated into a high power electric drive. The authors considered the main ways to generate an output voltage of the inverter by means of pulse-width modulation. The basic operating principles of three-level NPC-inverter space vector PWM were considered including the generation of the output voltage vector. The article describes the formula to calculate the factors of length and turn-on time of monitoring keys, as well as the relationship between the changes in the duty cycle and the angle of the given vector for various values of the modulation index. The paper proposed standard switching sequence templates. It is of interest to produce an in-depth investigation of the proposed algorithms

forming the inverter output voltage with the help of mathematical modeling, which will be done in future.

**Keywords:** Three-level NPC-inverter, space vector pulse-width modulation, switching sequence.

#### REFERENCES

1. Abdulvelev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P. Analysis of Strategies of Modulation Voltage of the Active Front End Based on the Modular Multilevel Converters. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2015, vol. 15, pp. 25-36. (In Russian). doi: 10.14529/power150304
2. Rodriguez J., Lai J.S., 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.
3. Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Electromagnetic Compatibility of High Power STATCOM in Asymmetrical Conditions, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7146966
4. Khramshin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. EMC Powerful STATCOMs with unbalanced conditions of electric supply grid. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.2, pp. 40-46. (In Russian). doi: 10.14529/power150304
5. Walczyn A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3-Level Inverters With Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol.4, pp. 152-157.
6. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
7. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
8. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
9. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-Point-Clamped Converter using the Virtual Space Vector Concept With Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
10. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
11. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
12. Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P. Computation of electromagnetic processes in the three-phase double stage voltage inverter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2010, no. 1, pp. 212. (In Russian)
13. Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Generation of phase voltages of four-level frequency converter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2011, no. 1, pp. 174-181. (In Russian)

Абулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Никифоров Г.В. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.72-77. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-72-77

Abulveleev I.R., Khramshin T.R., Kornilov G.P., Nikiforov G.V. Basic principles of space vector modulation for three-level NPC-inverters. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 72-77. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-72-77