

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-125204>

Оригинальное исследование



Влияние последовательностей переключений на баланс напряжения нейтральной точки в трёхуровневом инверторе напряжения

А.Н. Шишков¹, М.М. Дудкин², В.К. Ле¹¹ Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Обеспечение баланса напряжения нейтральной точки звена постоянного тока в допустимых пределах является одним из обязательных требований в процессе эксплуатации трёхуровневых автономных инверторов напряжений с фиксированной нейтральной точкой. Как известно, дисбаланс напряжения нейтральной точки может неблагоприятно повлиять на работу инвертора и нагрузки в целом, привести к выводу из строя как силовых ключей, так и конденсаторов в звене постоянного тока. Дисбаланс напряжения нейтральной точки чаще всего происходит из-за несимметрии номинальных величин конденсаторов постоянного тока, несогласованных свойств коммутационных силовых приборов, несимметричной трёхфазной нагрузки, а также из-за несовершенства алгоритма управления преобразователем.

Цель работы — выбор оптимальной последовательности, обеспечивающей наименьшее отклонение напряжения нейтральной точки и число переключений силовых ключей в трёхуровневом инверторе напряжения.

Материалы и методы. Для объективного сравнения рассмотренных последовательностей переключений и их влияния на баланс напряжения нейтральной точки в программе *MATLAB/Simulink* была разработана компьютерная модель трёхуровневого инвертора напряжения. Для управления данным инвертором использован метод пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции с тремя разными последовательностями переключений: пятиступенчатой, семиступенчатой и стандартной.

Результаты. Приведена топология трёхуровневого инвертора напряжения с фиксированной нейтральной точкой. Сняты экспериментальные зависимости ошибки отклонения напряжения нейтральной точки при изменении коэффициента модуляции, частоты основной гармоники на выходе инвертора и свойств нагрузки для трёх различных последовательностей включения силовых ключей.

Заключение. В данной работе исследованы влияние базовых векторов и влияние последовательностей переключения силовых ключей на баланс напряжения нейтральной точки. Комбинации состояний больших и нулевых базовых векторов не влияют на напряжение нейтральной точки. Для средних базовых векторов напряжение нейтральной точки может повышаться или понижаться в зависимости от условий работы инвертора. Малые базовые векторы значительно влияют на напряжение нейтральной точки. С учётом всего вышесказанного наилучшей последовательностью переключений для трёхуровневого инвертора следует считать семиступенчатую последовательность, обеспечивающую как оптимальный баланс напряжения нейтральной точки, так и уровень коммутационных потерь в силовых ключах.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор; трёхуровневый инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой; напряжение нейтральной точки; широтно-импульсная модуляция; пространственно-векторная ШИМ.

Как цитировать:

Шишков А.Н., Дудкин М.М., Ле В.К. Влияние последовательностей переключений на баланс напряжения нейтральной точки в трёхуровневом инверторе напряжения // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 2. С. 195–205. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-125204>

Рукопись получена: 19.01.2023

Рукопись одобрена: 01.04.2023

Опубликована онлайн: 15.07.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-125204>

Original study article

Influence of switching sequences on the neutral point voltage balance in a three-level voltage source inverter

Alexander N. Shishkov¹, Maksim M. Dudkin², Van Kan Le¹¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Ensuring the voltage balance of the neutral point of the DC link within acceptable limits is one of the mandatory requirements during the operation of a three-level autonomous neutral point clamped voltage source inverter. It is known that neutral point voltage imbalance can adversely affect the operation of the inverter and the load at all, lead to the failure of both power switches and capacitors in the DC link. Neutral point voltage imbalance mostly often occurs due to the asymmetry of the nominal values of DC capacitors, inconsistent properties of switching devices, asymmetric three-phase load, and also due to the imperfection of the converter control algorithm.

AIMS: Selection of the optimal switching sequence that ensures the smallest deviation of the neutral point voltage and the number of switching of power switches in a three-level voltage source inverter.

METHODS: For an objective comparison of the considered switching sequences and their influence on the neutral point voltage balance, a simulation model of a three-level neutral point clamped voltage source inverter was developed in the *MATLAB/Simulink* software. To control this inverter, a space vector modulation method was used with three different switching sequences: five-segment, seven-segment and standard.

RESULTS: The topology of a three-level neutral point clamped voltage source inverter is presented. The experimental dependencies of the neutral point voltage deviation error was taken with a change in the modulation coefficient, the frequency of the fundamental harmonic at the inverter output, and load characteristics for three different switching sequences.

CONCLUSIONS: In this paper, the influence of the basic vectors and the influence of switching sequences on the neutral point voltage balance are studied. Combinations of states of large and zero basic vectors do not affect the neutral point voltage. For the medium basic vectors, the neutral point voltage can increase or decrease depending on the operating conditions of the inverter. The small basic vectors significantly affect the neutral point voltage. Considering the abovementioned, the seven-segment sequence that ensures both the optimal balance of the neutral point voltage and the level of switching losses should be considered as the best switching sequence for a three-level inverter.

Keywords: *multilevel inverter; three-level neutral point clamped voltage source inverter; neutral point voltage; pulse-width modulation; space vector modulation.*

To cite this article:

Shishkov AN, Dudkin MM, Le VK. Influence of switching sequences on the neutral point voltage balance in a three-level voltage source inverter. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(2):195–205. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-125204>

Received: 19.01.2023

Accepted: 01.04.2023

Published online: 15.07.2023

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы многоуровневые инверторы напряжения находят все большее и большее применение в системах высоковольтных электроприводов переменного тока [1–4]. На рынке встречаются различные типы инверторов с разными уровнями напряжения и мощности, которые подразделяются на три основные топологии [5]: многоуровневые инверторы с фиксированной нейтральной точкой, многоуровневые инверторы с плавающими конденсаторами, каскадные многоуровневые инверторы. Среди них трёхуровневый автономный инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой (ЗУ АИН с ФНТ) получил наибольшее распространение благодаря своим достоинствам [6]: 1) требования к конденсаторам сведены к минимуму, поскольку все фазы используют общий источник постоянного тока; 2) возможность предварительной зарядки всех конденсаторов в группе; 3) высокий КПД. По сравнению с традиционным двухуровневым инвертором ЗУ АИН с ФНТ улучшает гармонический состав выходного напряжения и тока, что приводит к снижению массогабаритных показателей выходных фильтров. Кроме того, напряжение на силовых полупроводниковых ключах снижено вдвое, что увеличивает срок их службы.

На рис. 1 приведена топология ЗУ АИН с ФНТ в простой схеме электропривода. Трёхуровневый автономный инвертор состоит из 12 IGBT-транзисторов со встречно включёнными диодами ($S_{a1}...S_{a4}$, $S_{b1}...S_{b4}$, $S_{c1}...S_{c4}$) и 6 дополнительных фиксирующих диодов (D_{a1} , D_{a2} , D_{b1} , D_{b2} , D_{c1} , D_{c2}). В звене постоянного тока подключены два одинаковых конденсатора C_{d1} и C_{d2} , обеспечивающих разделение напряжения источника питания U_d на три промежуточных уровня относительно O нейтральной точки (НТ): $-U_d/2$, 0 , $U_d/2$ [7]. Однако распределение напряжения между конденсаторами на стороне постоянного тока происходит неравномерно, вызывая дисбаланс

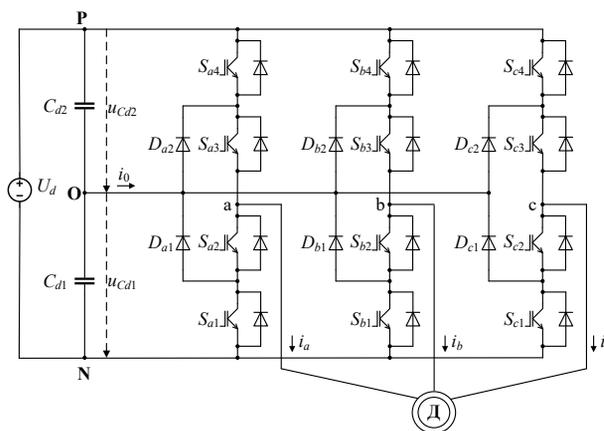


Рис. 1. Силовая схема электропривода на базе ЗУ АИН с ФНТ.
Fig. 1. Power circuit of the electric drive based on a three-level autonomous neutral point clamped voltage source inverter.

напряжения НТ. Этот важный недостаток может привести к преждевременному выходу из строя коммутационных приборов, а значение *THD* выходного напряжения и тока инвертора увеличивается по мере того, как преобладают низкие гармоники [8]. Дисбаланс напряжения НТ чаще всего происходит по следующим причинам [9]: несимметрия номинальных величин конденсаторов постоянного тока из-за производственных допусков, несогласованные свойства коммутационных силовых приборов, несимметричная трёхфазная нагрузка, а также из-за несовершенства алгоритма управления ЗУ АИН, например, из-за последовательностей переключения базовых векторов в пространственно-векторной ШИМ. Поэтому в статье производится анализ влияния базовых векторов напряжений и различных последовательностей переключения силовых ключей с целью выбора оптимальной последовательности, обеспечивающей наименьшее отклонение напряжения НТ и число переключений силовых ключей в схеме ЗУ АИН с ФНТ.

Таблица 1. Базовые векторы напряжения ЗУ АИН с ФНТ

Table 1. Basic voltage vectors of a three-level autonomous neutral point clamped voltage source inverter

Базовый вектор	Обозначение и комбинация состояний					
Большой	\bar{U}_{B1}	\bar{U}_{B2}	\bar{U}_{B3}	\bar{U}_{B4}	\bar{U}_{B5}	\bar{U}_{B6}
	[PNN]	[PPN]	[NPN]	[NPP]	[NNP]	[PNP]
Средний	\bar{U}_{C1}	\bar{U}_{C2}	\bar{U}_{C3}	\bar{U}_{C4}	\bar{U}_{C5}	\bar{U}_{C6}
	[PON]	[OPN]	[NPO]	[NOP]	[ONP]	[PNO]
Малый	\bar{U}_{M1}	\bar{U}_{M2}	\bar{U}_{M3}	\bar{U}_{M4}	\bar{U}_{M5}	\bar{U}_{M6}
	[POO]	[PPO]	[OPO]	[OPP]	[OOP]	[POP]
	[ONN]	[OON]	[NON]	[NOO]	[NNO]	[ONO]
Нулевой	\bar{U}_0					
	[PPP], [OOO], [NNN]					

ВЛИЯНИЕ БАЗОВЫХ ВЕКТОРОВ НА БАЛАНС НАПРЯЖЕНИЯ НТ

В настоящее время для управления ЗУ АИН с ФНТ наибольшее применение получил метод пространственно-векторной ШИМ [7–9]. Как известно, в трёхуровневом АИН выходные шины при помощи силовых ключей могут быть соединены с одной из трёх точек источника питания P, O, N (см. рис. 1). Поэтому ЗУ АИН с ФНТ имеет 27 различных комбинаций переключений силовых ключей [10]. В табл. 1 совокупность 27 данных комбинаций соответствует 19 пространственным базовым векторам, которые включают в себя 6 больших, 6 средних, 6 малых векторов и 1 нулевой. Малый вектор формируется из одной из 12 комбинаций, включая 6 комбинаций P -типа (без состояний N) и 6 комбинаций N -типа (без состояний P).

Влияние базовых векторов на баланс напряжения НТ оценивается на основе направления и величины тока НТ i_0 и напряжения НТ u_0 ($u_0 = u_{Cd1}$) в двух режимах работы: двигательном и генераторном. За положительное направление тока i_0 принимается направление от клеммы O звена постоянного тока к стороне нагрузки (рис. 2). Если значение тока $i_0 > 0$, то конденсатор C_{d1} разряжается, а C_{d2} заряжается, т. е. напряжение НТ u_0 уменьшается. И наоборот, если $i_0 < 0$, то конденсатор C_{d1} заряжается, а C_{d2} разряжается, т. е. напряжение НТ u_0

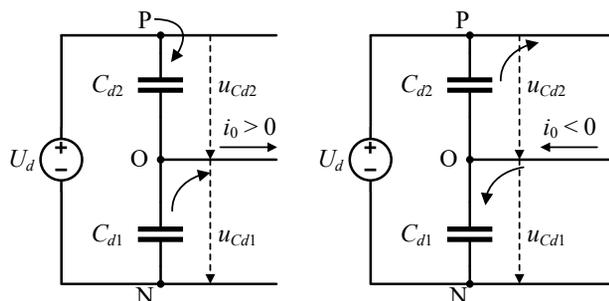


Рис. 2. Действие тока НТ на напряжение звена постоянного тока.

Fig. 2. Influence of neutral point current on voltage of a DC link.

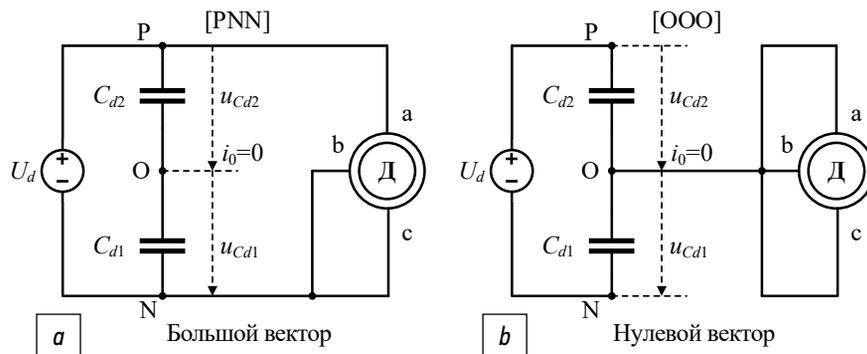


Рис. 3. Влияние большого и нулевого базовых векторов на баланс напряжения НТ.

Fig. 3. Influence of large and zero basic vectors on the neutral point voltage balance.

увеличивается. Величина напряжения заряда и разряда конденсаторов составляет $dv = \frac{1}{C} i_0 dt$ с $C_{d1} = C_{d2} = C$.

В обоих этих случаях возникает дисбаланс напряжения НТ.

Упрощённые схемы подключения различных базовых векторов напряжений для описания работы обмена электроэнергией в ЗУ АИН с ФНТ приведены на рис. 3–5. В случае больших базовых векторов (например, комбинация [PNN]) выводы нагрузки подключаются только к положительным и отрицательным клеммам (P и N) источника питания, а нейтральная точка O не имеет соединения с нагрузкой (рис. 3 а). Следовательно, ток i_0 не возникает, а значения напряжений u_{Cd1} , u_{Cd2} стабилизируются. Это означает, что на напряжение НТ не влияют коммутации состояний больших базовых векторов.

При работе инвертора с нулевыми базовыми векторами (комбинации [PPP], [OOO], [NNN]) все три вывода нагрузки подключаются только к одной из трёх клемм P , или O , или N звена постоянного тока, как показано на рис. 3 б для комбинации [OOO]. Обмена электроэнергией также не происходит. Следовательно, как и в случае больших базовых векторов, нулевые базовые вектора не оказывают влияние на баланс напряжения НТ.

Учитывая средний базовый вектор, например, с комбинацией [PON], изображенной на рис. 4, видим, что три выхода нагрузки одновременно подключаются к клеммам P, O и N звена постоянного тока. Применяя 1-й и 2-й законы Кирхгофа, например, при работе электродвигателя в двигательном режиме, с учётом принятых обозначений на рис. 4, запишем систему уравнений для фазных напряжений и токов нагрузки:

$$\begin{cases} u_{an} - u_{bn} = u_{Cd2} \\ u_{bn} - u_{cn} = u_{Cd1} \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь u_{an} , u_{bn} , u_{cn} — фазные напряжения на нагрузке; i_a , i_b , i_c — фазные токи нагрузки.

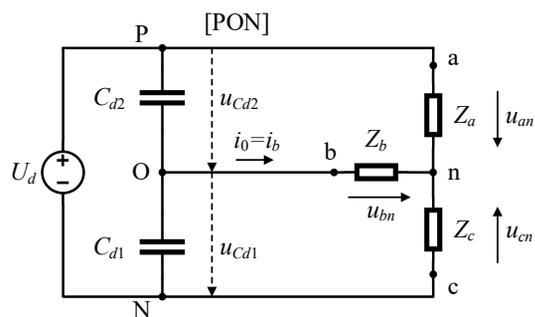


Рис. 4. Влияние среднего базового вектора на баланс напряжения НТ.

Fig. 4. Influence of medium basic vectors on the neutral point voltage balance.

В случае симметричной нагрузки ($Z_a = Z_b = Z_c = Z$) из системы (1) можно вывести формулу для расчёта тока НТ:

$$i_0 = i_b = \frac{u_{Cd1} - u_{Cd2}}{3Z}. \quad (2)$$

Если напряжение между двумя конденсаторами разбалансировано, т. е. $u_{Cd1} \neq u_{Cd2}$, то это вызывает ток в нейтральной точке i_0 , знак которого зависит от отклонения напряжений двух конденсаторов. Следовательно, напряжение u_0 может повышаться или понижаться в зависимости от условий работы инвертора. Однако на практике эксплуатации инвертора необходимо сбалансировать напряжение НТ, что обычно приводит к очень небольшим отклонениям напряжения

$\Delta u_c = u_{Cd1} - u_{Cd2}$. Тогда влияние среднего базового вектора на напряжение НТ незначительно. Аналогичные результаты получаются для генераторного режима.

На рис. 5 приведены упрощённые схемы инвертора при использовании малого базового вектора \bar{U}_{M1} с комбинацией состояний P -типа и N -типа для двигательного и генераторного режимов работы. В первую очередь необходимо рассмотреть работу инвертора в двигательном режиме. Для комбинаций состояния P -типа один или два вывода нагрузки подключаются к клемме P источника питания, а остальные выводы — к клемме O (рис. 5 а). В результате ток НТ i_0 течёт в клемму O ($i_0 < 0$), вызывая повышение напряжения u_{Cd1} и снижение напряжения u_{Cd2} . На примере комбинации $[POO]$

получено значение тока $i_0 = -i_a = -\frac{2U_{d2}}{3Z} < 0$.

Напротив, для комбинаций состояния N -типа один или два вывода нагрузки подключаются к клемме N источника питания, а остальные выводы — к клемме O . В результате ток НТ i_0 вытекает из клеммы O ($i_0 > 0$), вызывая снижение напряжения u_{Cd1} и повышение напряжения u_{Cd2} . На примере комбинации $[ONN]$ получено

значение тока $i_0 = i_a = \frac{2U_{d1}}{3Z} > 0$. По аналогии, в гене-

раторном режиме влияние комбинаций состояний P -типа и N -типа противоположно тому, что в двигательном режиме.

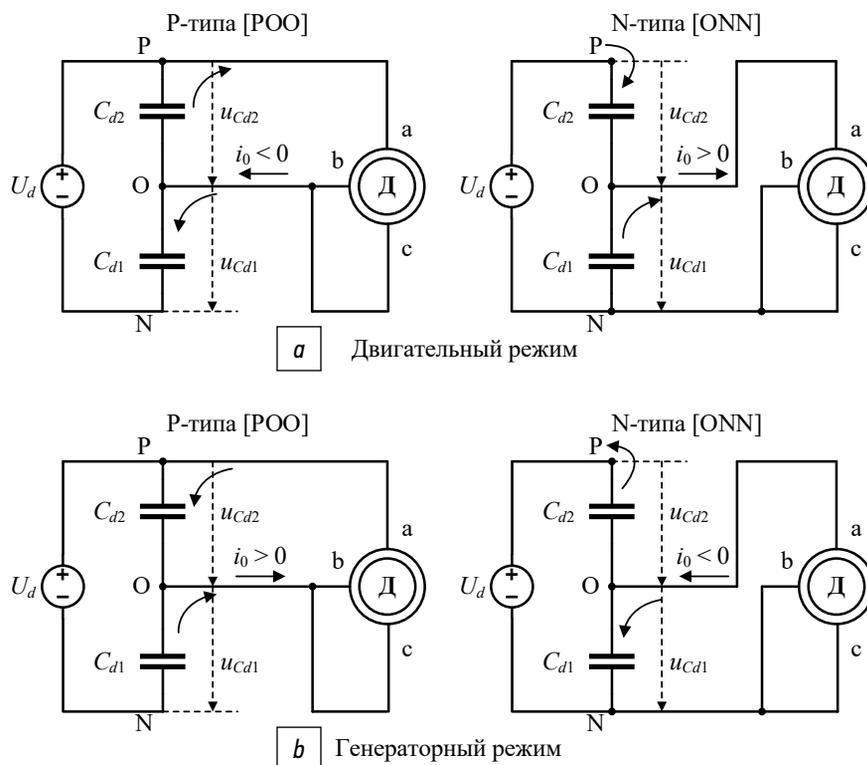


Рис. 5. Влияние малых базовых векторов на баланс напряжения НТ.

Fig. 5. Influence of small basic vectors on the neutral point voltage balance.

ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ БАЗОВЫХ ВЕКТОРОВ НА БАЛАНС НАПРЯЖЕНИЯ НТ

Как уже отмечалось, для управления ЗУ АИН с ФНТ используется метод пространственно-векторной ШИМ (ПВШИМ), при котором формирование заданного пространственного вектора основано на принципе «вольт-секундного баланса». Это значит, что за период квантования $T_{\text{ШИМ}}$ пространственный вектор \vec{u}_S синтезируется из трёх ближайших базовых векторов [11]. На примере сегмента 2 (рис. 6) пространственный вектор напряжения \vec{u}_S может быть представлен в виде следующей системы уравнений

$$\begin{cases} T_{\text{ШИМ}} \vec{u}_S = t_1 \vec{u}_{B1} + t_2 \vec{u}_{C1} + t_3 \vec{u}_{M1} \\ T_{\text{ШИМ}} = t_1 + t_2 + t_3 \end{cases}, \quad (3)$$

где t_1, t_2, t_3 — время включения ближайших базовых векторов $\vec{u}_{B1}, \vec{u}_{C1}, \vec{u}_{M1}$ во втором сегменте соответственно.

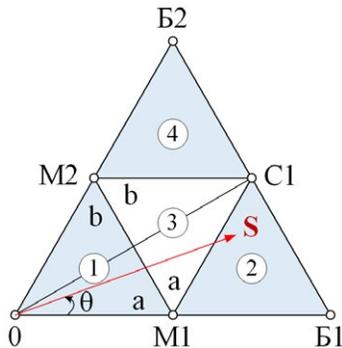


Рис. 6. Векторная диаграмма сектора 1 для ЗУ АИН с ФНТ.
Fig. 6. Vector diagram of the sector 1 for a three-level autonomous neutral point clamped voltage source inverter.

На сегодняшний день формирование пространственного вектора напряжения в ПВШИМ осуществляется с использованием трёх наиболее распространённых последовательностей переключений базовых векторов: пятиступенчатой, семиступенчатой и стандартной [12–14]. Данные три варианта отражают разные распределения длительностей включения комбинаций состояний *P*-типа и *N*-типа малых базовых векторов.

В [12] предложена пятиступенчатая последовательность переключения (рис. 7), в которой только один из двух типов (*P* или *N*) комбинаций состояний малых базовых векторов используется в периоде квантования. Например, для данной последовательности в секторе 1 (см. рис. 6) и сегментах 1, 3 используется только комбинация состояний *N*-типа малых базовых векторов; а в сегментах 2 и 4 — только *P*-типа (см. рис. 7). Следовательно, в пятиступенчатой последовательности дисбаланс напряжения НТ будет проявляться наиболее явно, а количество переключений базовых векторов за один период квантования будет наименьшим и равным 4.

На рис. 8 приведена семиступенчатая последовательность переключения, подробно рассмотренная в работе [13]. Здесь в сегментах 2 и 4 используется равномерное распределение между комбинациями состояний *P*-типа и *N*-типа малого базового вектора, а в сегмен-

Сегмент 1	M1n	M2n	0	0	M2n	M1n
	ONN	OON	OOO	OOO	OON	ONN
Сегмент 2	B1	C1	M1p	M1p	C1	B1
	PNN	PON	POO	POO	PON	PNN
Сегмент 3	M1n	M2n	C1	C1	M2n	M1n
	ONN	OON	PON	PON	OON	ONN
Сегмент 4	C1	B2	M2p	M2p	B2	C1
	PON	PPN	PPO	PPO	PPN	PON

Рис. 7. Пятиступенчатая последовательность переключения для сектора 1.
Fig. 7. The five-segment switching sequence for the sector 1.

Сегмент 1-а	M1p	0	M2n	M1n	M1n	M2n	0	M1p
	POO	OOO	OON	ONN	ONN	OON	OOO	POO
Сегмент 1-б	M2n	0	M1p	M2p	M2p	M1p	0	M2n
	OON	OOO	POO	PPO	PPO	POO	OOO	OON
Сегмент 2	M1p	C1	B1	M1n	M1n	B1	C1	M1p
	POO	PON	PNN	ONN	ONN	PNN	PON	POO
Сегмент 3-а	M1p	C1	M2n	M1n	M1n	M2n	C1	M1p
	POO	PON	OON	ONN	ONN	OON	PON	POO
Сегмент 3-б	M2n	C1	M1p	M2p	M2p	M1p	C1	M2n
	OON	PON	POO	PPO	PPO	POO	PON	OON
Сегмент 4	M2n	C1	B2	M2p	M2p	B2	C1	M2n
	OON	PON	PPN	PPO	PPO	PPN	PON	OON

Рис. 8. Семиступенчатая последовательность переключения для сектора 1.
Fig. 8. The seven-segment switching sequence for the sector 1.

тах 1 и 3 равномерное распределение комбинаций состояний P-типа и N-типа обеспечивается только для векторов с большей длительностью включения в течение одного периода квантования. Подобный вектор называется доминирующим малым базовым вектором. Так, например, если пространственный вектор напряжения попадает в область «а» 1-го или 3-го сегментов (см. рис. 6), то в качестве доминирующего малого базового вектора выбирается вектор \bar{U}_{M1} , а в области b — вектор \bar{U}_{M2} .

По сравнению с пятиступенчатой последовательностью переключения данный вариант позволяет улучшить баланс напряжения НТ, но увеличивает количество переключений базовых векторов с 4 до 6.

В последовательности переключения, предложенной в работе [14], осуществляется равномерное распределение комбинаций состояний P-типа и N-типа всех малых базовых векторов (рис. 9). Данный вариант последовательности получил наиболее широкое применение при управлении трёхуровневыми инверторами и считается стандартной последовательностью. В ней используются все избыточные комбинации состояний малых и нулевого базовых векторов, что приводит к увеличению коммутационных потерь. Так, например, в 1 сегменте количество переключений базовых векторов достигает 12, что в два раза выше, чем для семиступенчатой последовательности, и в 3 раза — чем для пятиступенчатой.

Принимая во внимание анализ, проведённый в предыдущем разделе, можно показать, что по сравнению с пятиступенчатой и семиступенчатой последовательностями, стандартная последовательность обеспечивает наилучший баланс напряжения НТ за счёт равномерного распределения комбинаций состояний P- и N-типов малых базовых векторов в любом из сегментов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для объективного сравнения рассмотренных последовательностей переключения базовых векторов

и их влияния на баланс напряжения НТ в программе *Matlab & Simulink* была разработана компьютерная модель ЗУ АИН с ФНТ. В модели для питания инвертора использовался источник постоянного напряжения 400 В с малым внутренним сопротивлением. Все исследования проводились при активно-индуктивном характере нагрузки с активным сопротивлением 40 Ом и с возможностью изменения $\cos\varphi$ нагрузки в диапазоне от 0,5 по 1,0. Частота ШИМ пространственного вектора напряжения была принята равной 2 кГц.

На рис. 10 приведены временные диаграммы тока НТ i_0 и напряжений конденсаторов звена постоянного тока u_{Cd1} и u_{Cd2} за один период выходного напряжения инвертора при коэффициенте модуляции $\mu=0,8$, частоте первой гармоники на выходе АИН $f_{(1)} = 50$ Гц и $\cos\varphi$ нагрузки 0,8. Из диаграмм видно, что при $i_0 > 0$ напряжение u_{Cd1} уменьшается, а u_{Cd2} увеличивается, и наоборот, при $i_0 < 0$ напряжение u_{Cd1} увеличивается, а u_{Cd2} уменьшается. Это объясняется разрядкой зарядкой конденсаторов (см. рис. 2).

Для пятиступенчатой последовательности (рис. 10 а) отрицательная и положительная части тока i_0 несимметричны относительно горизонтальной оси и чётко разделены во временной области, что приводит к увеличению интервалов времени с непрерывным разрядом или зарядом каждого из конденсаторов. В результате этого происходит наиболее резкий дисбаланс напряжения НТ.

Для семиступенчатой и стандартной последовательностей переключений (рис. 10 б, в) отрицательная и положительная части тока i_0 почти симметричны относительно горизонтальной оси и чередуются в течение очень короткого промежутка времени. В результате этого конденсаторы попеременно разряжаются и заряжаются быстро, частично компенсируя друг друга, что позволяет поддерживать баланс напряжения НТ. Это объясняется тем, что в данных последовательностях переключений применяются комбинации состояний как P-, так и N-типов малых базовых векторов.

На рис. 11–13 представлены зависимости относительной ошибки максимального отклонения напряжения НТ $\delta u_{C,max}$ от коэффициента модуляции μ , частоты

Сегмент 1	0	M1n	M2n	0	M1p	M2p	0	0	M2p	M1p	0	M2n	M1n	0
	NNN	ONN	OON	OOO	POO	PPO	PPP	PPP	PPO	POO	OOO	OON	ONN	NNN
Сегмент 2		M1n	B1	C1	M1p	M1p	C1	B1	M1n					
		ONN	PNN	PON	POO	POO	PON	PNN	ONN					
Сегмент 3		M1n	M2n	C1	M1p	M2p	M2p	M1p	C1	M2n	M1n			
		ONN	OON	PON	POO	PPO	PPO	POO	PON	OON	ONN			
Сегмент 4		M2n	C1	B2	M2p	M2p	B2	C1	M2n					
		OON	PON	PPN	PPO	PPO	PPN	PON	OON					

Рис. 9. Стандартная последовательность переключения для сектора 1.

Fig. 9. The standard switching sequence for the sector 1.

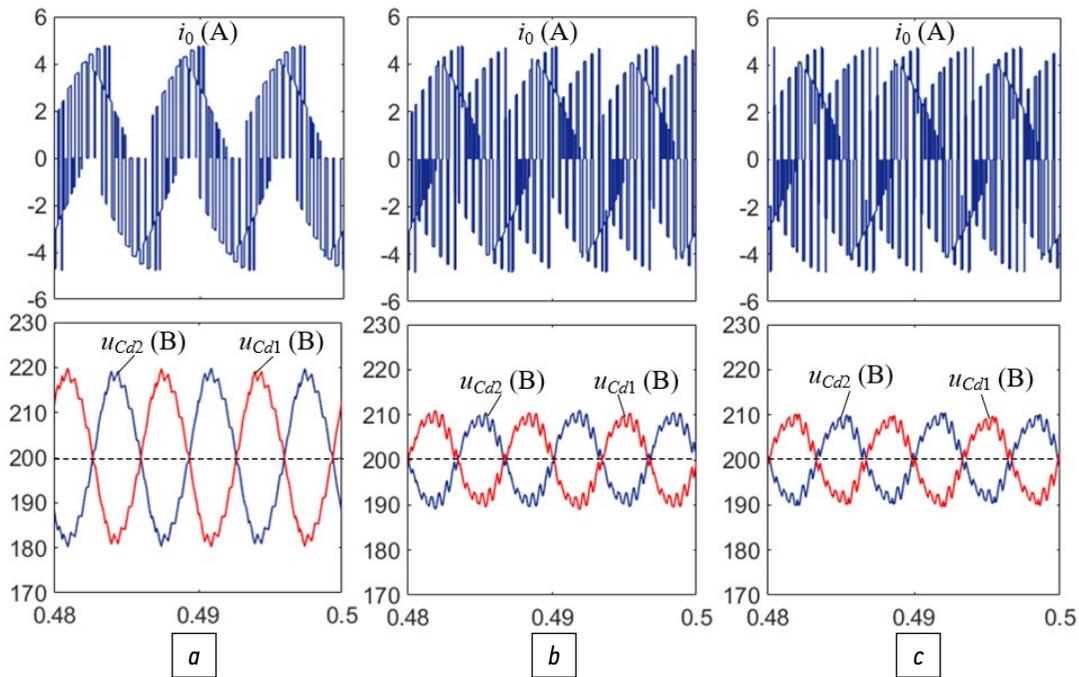


Рис. 10. Временные диаграммы тока i_0 и напряжений u_{cd1} , u_{cd2} при коэффициенте модуляции $\mu=0,8$; $f_{(1)}=50$ Гц; $\cos\varphi=0,8$ для пятиступенчатой (а), семиступенчатой (б) и стандартной (с) последовательностей переключений.

Fig. 10. Time-domain diagrams of current i_0 and voltages u_{cd1} , u_{cd2} at the modulation coefficient $\mu = 0.8$; $f_{(1)}=50$ Hz; $\cos\varphi=0.8$ for the five-segment (a), the seven-segment (b) and the standard (c) switching sequences.

основной гармоники на выходе инвертора и $\cos\varphi$ нагрузки для различных последовательностей переключений базовых векторов. Здесь относительная ошибка максимального отклонения $\delta u_{C,\max}$ от заданного значения на конденсаторе $0,5U_d$ рассчитывалась по формуле:

$$\delta u_{C,\max} = \frac{|u_{Cd1,\max} - 0,5U_d|}{0,5U_d} = \frac{|u_{Cd2,\max} - 0,5U_d|}{0,5U_d}, \quad (4)$$

где U_d — напряжение источника питания на входе инвертора напряжения.

Анализ зависимостей $\delta u_{C,\max}$, приведенных на рис. 11–13, позволяет сделать следующие выводы.

- При изменении коэффициента модуляции максимальное значение относительной ошибки по отклонению $\delta u_{C,\max}$ для пятиступенчатой последовательности достигло максимального значения 0,1, для семиступенчатой — 0,078, а для стандартной — 0,076. Это однозначно указывает на то, что оптимальный баланс напряжения НТ достигается в семиступенчатой и стандартной последовательностях переключения, а наихудший — в пятиступенчатой.

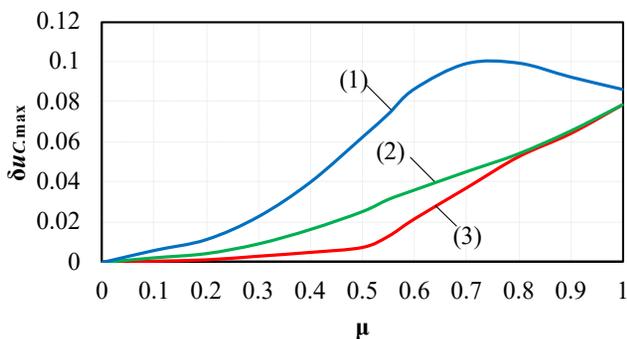


Рис. 11. Зависимость $\delta u_{C,\max}$ от коэффициента μ при $f_{(1)}=50$ Гц, $\cos\varphi=0,8$ для пятиступенчатой (1), семиступенчатой (2) и стандартной (3) последовательностей переключений.

Fig. 11. Dependence of $\delta u_{C,\max}$ on the coefficient μ at $f_{(1)}=50$ Hz, $\cos\varphi=0.8$ for the five-segment (1), the seven-segment (2) and the standard (3) switching sequences.

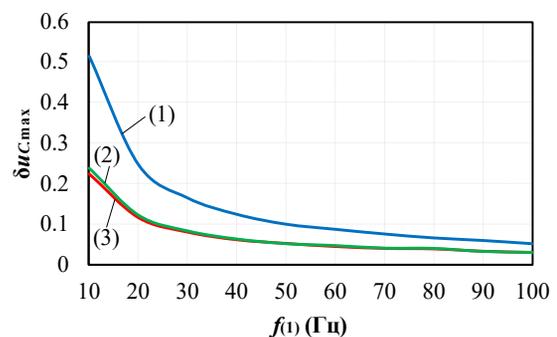


Рис. 12. Зависимость $\delta u_{C,\max}$ от частоты $f_{(1)}$ при $\mu=0,8$, $\cos\varphi=0,8$ для пятиступенчатой (1), семиступенчатой (2) и стандартной (3) последовательностей переключений.

Fig. 12. Dependence of $\delta u_{C,\max}$ on the frequency $f_{(1)}$ at $\mu=0.8$, $\cos\varphi=0.8$ for the five-segment (1), the seven-segment (2) and the standard (3) switching sequences.

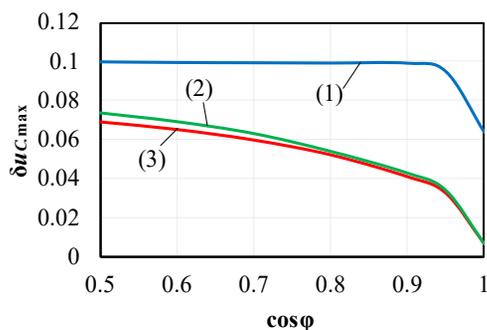


Рис. 13. Зависимость $\delta u_{C,max}$ от $\cos\varphi$ при $\mu=0,8$, $f_{(1)}=50$ Гц для пятиступенчатой (1), семиступенчатой (2) и стандартной (3) последовательностей переключений.

Fig. 13. Dependence of $\delta u_{C,max}$ on $\cos\varphi$ at $\mu=0,8$, $f_{(1)}=50$ Hz for the five-segment (1), the seven-segment (2) and the standard (3) switching sequences.

- При изменении коэффициента модуляции в диапазоне от 0 до 0,5 в стандартной последовательности переключений относительная ошибка $\delta u_{C,max}$ близка к нулю, что достигается за счёт равномерного распределения комбинаций состояний P - и N -типов малых базовых векторов при работе инвертора в любом из сегментов. Для семиступенчатой последовательности ошибка $\delta u_{C,max}$ достигает значения 0,025 при $\mu=0,5$. Это объясняется тем, что здесь равномерное распределение комбинаций состояний P -типа и N -типа обеспечивается только для векторов с большей длительностью включения (доминантные вектора) в течение периода квантования. Для пятиступенчатой последовательности эта же ошибка составляет 0,06 при $\mu=0,5$, т. к. здесь в любом из сегментов используется только одна комбинация состояний N -типа или P -типа малых базовых векторов на каждом периоде квантования.
- При изменении коэффициента модуляции в диапазоне от 0,5 до 1,0 в стандартной последовательности переключений относительная ошибка $\delta u_{C,max}$ достигает значения 0,076 при $\mu=1,0$, что объясняется использованием средних базовых векторов при формировании пространственного вектора напряжения во 2, 3 и 4 сегментах (см. рис. 6).
- При уменьшении частоты основной гармоники $f_{(1)}$ на выходе инвертора относительная ошибка $\delta u_{C,max}$ резко увеличивается для всех последовательностей переключения, что объясняется увеличением времени работы в любом из сегментов, когда наблюдается эффект накапливания ошибки звена постоянного тока из-за дисбаланса напряжения НТ.
- При увеличении $\cos\varphi$ нагрузки относительная ошибка $\delta u_{C,max}$ уменьшается для всех последовательностей переключения. При чисто активной нагрузке уровень ошибки $\delta u_{C,max}$ резко уменьшается, что объясняется снижением реактивного тока, замыкающего

через обратные и фиксирующие диоды инвертора и, как следствие, приводящего к меньшей нагрузке конденсаторов звена постоянного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисбаланс напряжения НТ может неблагоприятно повлиять на работу инвертора и нагрузки, привести к выводу из строя как силовых ключей, так и конденсаторов в звене постоянного тока. Поэтому выяснение причин дисбаланса, связанного с коммутацией силовых ключей, является основой для выбора наиболее оптимальной последовательности переключения базовых векторов в системе управления ЗУ АИН с ФНТ.

В данной работе проанализировано влияние базовых векторов и последовательностей переключения силовых ключей на баланс напряжения НТ и сделаны следующие выводы.

- Комбинации состояний больших и нулевых базовых векторов не влияют на напряжение НТ.
- Для средних базовых векторов напряжение НТ может повышаться или понижаться в зависимости от условий работы инвертора.
- Малые базовые векторы значительно влияют на напряжение НТ. В двигательном режиме комбинации P -типа повышают напряжение u_{Cd1} и снижают напряжение u_{Cd2} , а комбинации N -типа действуют в противоположном направлении. В генераторном режиме влияние комбинаций состояний P -типа и N -типа противоположно двигательному режиму.
- Стандартная последовательность переключения базовых векторов, получившая наибольшее применение для управления трёхуровневых инверторов, обеспечивает оптимальный баланс напряжения НТ, но приводит к росту коммутационных потерь в силовых ключах за счёт использования большего количества переключения базовых векторов на каждом периоде ШИМ.
- Семиступенчатая последовательность позволяет не только уменьшить коммутационные потери, но и обеспечить приемлемый баланс напряжения нейтрали за счёт распределения длительностей комбинаций включений состояний P -типа и N -типа доминирующего малого базового вектора.
- Пятиступенчатая последовательность переключения обеспечивает минимальные коммутационные потери, но вызывает наибольший дисбаланс напряжения НТ.
- С учётом всего вышесказанного наилучшей последовательностью переключения для трёхуровневого инвертора следует считать семиступенчатую последовательность, обеспечивающую как оптимальный баланс напряжения НТ, так и уровень коммутационных потерь в силовых ключах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А.Н. Шишков — написание текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии; М.М. Дудкин — редактирование текста рукописи, моделирование; В.К. Ле — поиск публикаций по теме статьи, создание изображений, моделирование. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.N. Shishkov — writing the text of the manuscript, expert opinion, approval of the final version; M.M. Dudkin — editing the text of the manuscript, modeling; V.K. Le — search for publications on the topic of the article, creating images, modeling. Authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gorozhankin A.N., Dudkin M.M. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, № 7. P. 440–446. doi: 10.3103/s1068371220070068
- Дудкин М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2013. Т. 13, № 1. С. 5–18.
- Храмшим Р.Р., Храмшин Т.Р., Храмшина Е.А., и др. Многоуровневый высоковольтный преобразователь частоты для электропривода // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. С. 191–196.
- Донской Н., Иванов А., Матисон В., и др. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // *Силовая Электроника*. 2008. № 1. С. 43–46.
- Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение // *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19. № 22. С. 134–138.
- Лазарев С.А. Применение инверторов напряжения в высоковольтном электроприводе // *Экспозиция Нефть Газ*. 2013. С. 31–35.
- Peddapelli S.K. Pulse Width Modulation: Analysis and Performance in multilevel inverter. Oldenbourg: De Gruyter Oldenbourg, 2017.
- Holmes G.D., Lipo T.A. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. New York: Wiley-IEEE Press, 2003.
- Choi U.-M., Lee K.-B. Neutral-Point Voltage Balancing Method for Three-Level Inverter Systems with a Time-Offset Estimation Scheme // *Journal of Power Electronics*. 2013. Vol. 13. № 2. P. 243–249. doi: 10.6113/JPE.2013.13.2.243
- Абулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., и др. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 4 (33). С. 72–77.
- Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., et al. 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, N 1. doi: 10.1109/LPEL.2004.828445
- Гельман М.В., Дудкин М.М. Вентильные преобразователи постоянного и переменного тока. Челябинск: Изд. центр Южно-Уральского государственного университета, 2013.
- Lewicki A., Krzeminski Z., Abu-Rub H. Space-Vector Pulse width Modulation for Three-Level NPC Converter With the Neutral Point Voltage Control // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, N 11. P. 5076–5086. doi: 10.1109/TIE.2011.2119453
- Koyama M., Fujii T., Uchida R., et al. Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter // *Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*. San Diego: IEEE, 1992. P. 271–276. doi: 10.1109/IECON.1992.254621

REFERENCES

- Gorozhankin AN, Dudkin MM. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(7):440–446. doi: 10.3103/s1068371220070068
- Dudkin MM. Energy-saving technologies in test benches using single-phase reversible converters. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2013;13(1):5–18. (in Russ.)
- Khramshim RR, Khramshin TR, Khramshina EA, et al. Multilevel high-voltage frequency converter for electric drive. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010:191–196. (in Russ.)
- Donskoy N, Ivanov A, Matison V, et al. Multilevel autonomous inverters for electric drive and electric power industry. *Silovaya Elektronika*. 2008;1:43–46. (in Russ.)

5. Makarov VG, Khaybrakhmanov RN. Multilevel voltage inverters. Topology overview and application. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016;19(22):134–138. (in Russ.)
6. Lazarev SA. Application of voltage inverters in high-voltage electric drive. *Ekspozitsiya Neft Gaz*. 2013:31–35. (in Russ.)
7. Peddapelli SK. *Pulse Width Modulation: Analysis and Performance in multilevel inverter*. Oldenbourg: De Gruyter Oldenbourg; 2017.
8. Holmes GD, Lipo TA. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. New York: Wiley-IEEE Press; 2003.
9. Choi U-M, Lee K-B. Neutral-Point Voltage Balancing Method for Three-Level Inverter Systems with a Time-Offset Estimation Scheme. *Journal of Power Electronics*. 2013;13(2):243–249. doi: 10.6113/JPE.2013.13.2.243
10. Abulvelev IR, Khramshin TR, Kornilov GP, et al. Principles of constructing vector pulse-width modulation for a three-level inverter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. 2016;4(33):72–77. (in Russ.)
11. Busquets-Monge S, Bordonau J, Boroyevich D, et al. 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, N 1. doi: 10.1109/LPEL.2004.828445
12. Gelman MV, Dudkin MM. *Valve converters of direct and alternating current*. Chelyabinsk: Izd. tsentr Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta; 2013. (in Russ.)
13. Lewicki A, Krzeminski Z, Abu-Rub H. Space-Vector Pulse width Modulation for Three-Level NPC Converter With the Neutral Point Voltage Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(11):5076–5086. doi: 10.1109/TIE.2011.2119453
14. Koyama M, Fujii T, Uchida R, et al. Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter. In: *Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*. San Diego: IEEE; 1992:271–276. doi: 10.1109/IECON.1992.254621

ОБ АВТОРАХ

* Шишков Александр Николаевич,

канд. техн. наук,
заведующий кафедрой «Электрооборудование
и промышленная электроника»;
адрес: Российская Федерация, 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, д. 38;
ORCID: 0000-0001-9851-8745;
eLibrary SPIN: 5099-9286;
e-mail: shan1982@mail.ru

Дудкин Максим Михайлович,

д-р техн. наук,
профессор кафедры «Электропривод, мехатроника
и электромеханика»;
ORCID: 0000-0003-4876-8775;
eLibrary SPIN: 5703-3117;
e-mail: dudkinmax@mail.ru

Ле Ван Кань,

аспирант кафедры «Электрооборудование и промышленная
электроника»;
ORCID: 0009-0007-5183-6077;
e-mail: canhlv.mta@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Alexander N. Shishkov,

Cand. Sci. (Tech.),
Head of the Electrical Equipment and Industrial Electronics
Department;
address: 38 Bolshaya Semenovskaya street, 107023 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-9851-8745;
eLibrary SPIN: 5099-9286;
e-mail: shan1982@mail.ru

Maksim M. Dudkin,

Dr. Sci. (Tech.),
Professor of the Electric Drives, Mechatronics
and Electromechanics Department;
ORCID: 0000-0003-4876-8775;
eLibrary SPIN: 5703-3117;
e-mail: dudkinmax@mail.ru

Van Kan Le,

Postgraduate of the Electrical Equipment and Industrial
Electronics Department;
ORCID: 0009-0007-5183-6077;
e-mail: canhlv.mta@gmail.com

* Corresponding author