

АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ С ГИБРИДНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ ТРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

А.Н. Шишков¹, shan1982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-8745>

М.М. Дудкин², dudkinmax@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4876-8775>

В.К. Ле¹, canhlv.mta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5183-6077>

Н.А. Еремин², neonisham@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3937-3599>

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье предложен новый алгоритм пространственно-векторной ШИМ с гибридной последовательностью переключения для трехуровневого автономного инвертора напряжения с фиксированной нейтральной точкой. Основываясь на преимуществах пятиступенчатой и семиступенчатой последовательностей переключений, гибридная последовательность была разработана с целью поддержания баланса напряжения нейтральной точки на заранее заданном уровне и уменьшения коммутационных потерь силовых ключей. Предложенный алгоритм позволяет гибко регулировать уровень достижения заявленных критериев в зависимости от условий работы системы путем изменения коэффициента регулирования. В работе получена аппроксимированная зависимость, позволяющая определить оптимальный коэффициент регулирования для любых значений заданной частоты на входе инвертора при работе на асинхронный короткозамкнутый двигатель с законом управления $U/f = \text{const}$. Эффективность данного алгоритма подтверждена на основе компьютерного моделирования в среде MATLAB Simulink. Приведены экспериментальные зависимости пространств статического состояния максимальной ошибки напряжения нейтральной точки и числа пар переключений силовых ключей в зависимости от заданной частоты на входе инвертора и коэффициента регулирования гибридной последовательности переключений. Полученные результаты показали, что в предлагаемом алгоритме ПВШИМ с гибридной последовательностью количество силовых ключей снижается в среднем на 14,3 % при сохранении баланса напряжения нейтральной точки, близкого к семиступенчатой последовательности (отклонение не превышает 0,75 %). Таким образом, предложенный алгоритм является эффективным инструментом для управления трехуровневого инвертора напряжения, что благоприятно сказывается на его энергосбережении, массогабаритных показателях и эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: трехуровневый инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой, пространственно-векторная ШИМ, гибридная последовательность переключений, напряжение нейтральной точки, коммутационные потери, асинхронный электродвигатель

Для цитирования: Алгоритм пространственно-векторной ШИМ с гибридной последовательностью переключений для регулируемых электроприводов переменного тока на базе трехуровневого инвертора напряжения / А.Н. Шишков, М.М. Дудкин, В.К. Ле, Н.А. Еремин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 34–46. DOI: 10.14529/power230404

Original article
DOI: 10.14529/power230404

A SPACE-VECTOR PWM ALGORITHM WITH A HYBRID SWITCHING SEQUENCE FOR REGULATED AC ELECTRIC DRIVES BASED ON A THREE-LEVEL VOLTAGE INVERTER

A.N. Shishkov¹, shan1982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-8745>

M.M. Dudkin², dudkinmax@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4876-8775>

V.K. Le¹, canhlv.mta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5183-6077>

N.A. Eremin², neonisham@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3937-3599>

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This article proposes a new space-vector PWM with a hybrid switching sequence for a three-level neutral point clamped voltage source inverter. Based on the advantages of the five-stage and seven-stage switching sequences, a hybrid sequence was developed with to maintain the neutral point voltage balance at a predetermined level

and to reduce the switching losses of power switches. The algorithm allows for the flexible adjustment of the specified criteria depending on the operating conditions of the system by changing the regulation coefficient. An approximated dependence is obtained that allows the determination of the optimal control coefficient for any values of a given frequency at the input of the inverter when operating on an asynchronous short-circuited motor with a control law $U/f = \text{const}$. The effectiveness of this algorithm was confirmed by computer simulation using MATLAB Simulink. The article gives experimental dependences of the static state spaces of the maximum neutral point voltage error and the number of switching pairs of power switches depending on the specified frequency at the input of the inverter and the control coefficient of the hybrid sequence of switches. The results showed that the proposed PWM algorithm with a hybrid switching sequence reduces the number of power switches by an average of 14.3 %, while maintaining a neutral point voltage balance close to the seven-level sequence (deviation does not exceed 0.75 %). Thus, the proposed algorithm is an effective tool for controlling a three-level voltage source inverter, which has a positive effect on its energy efficiency, size and weight characteristics, and operational reliability.

Keywords: three-level neutral point clamped voltage source inverter, space-vector PWM, hybrid switching sequence, neutral point voltage, switching losses, asynchronous electric motor

For citation: Shishkov A.N., Dudkin M.M., Le V.K., Eremin N.A. A space-vector PWM algorithm with a hybrid switching sequence for regulated AC electric drives based on a three-level voltage inverter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(4):34–46. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230404

Введение

За последние годы многоуровневые инверторы напряжения стали все чаще и чаще применяться в области высоковольтных электроприводов для преобразования электрической энергии [1]. В частности, трехуровневый автономный инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой (ЗУ АИН с ФНТ), предложенный Akira Nabae, Isao Takahashi и Hirofumi Akagi в 1981 году [2], широко используется как в промышленности, так и в бытовых целях, например, для управления асинхронными и синхронными электродвигателями большой мощности, солнечными панелями и другими нагрузками благодаря достаточно простой топологии, невысокой стоимости и высокой энергоэффективности [3, 4]. Поэтому исследования и разработки в данной области продолжаются, поскольку существует потребность в оптимизации и улучшении характеристик и производительности этих устройств.

В настоящее время методам управления трехуровневого АИН с ФНТ уделяется большое внимание [5]. Среди них наибольшее применение для управления трехуровневого инвертора получил алгоритм пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) [6]. В многочисленных публикациях последних лет предлагались различные варианты алгоритма ПВШИМ, позволяющие одновременно улучшить одну из следующих задач: повышение качества выходного напряжения и тока [7], улучшение баланса напряжения нейтральной точки (НТ) [8, 9], снижение коммутационных потерь [10] и уменьшение уровня синфазного напряжения [11]. Однако общим для подобных стратегий управления является невозможность одновременного улучшения всех характеристик, т. е. улучшение одной характеристики приводит к ухудшению другой и наоборот. Поэтому остается актуальной задача разработки алгоритмов управления трехуровневого инвертора с целью улучшения его технических характеристик.

В данной работе особое внимание уделяется таким важным показателям системы трехуровневого инвертора, как баланс напряжения нейтральной точки звена постоянного тока и коммутационные потери. Как известно, дисбаланс напряжения нейтральной точки неблагоприятно влияет на работу инвертора и нагрузки в целом, может привести к выводу из строя как силовых ключей, так и конденсаторов в звене постоянного тока по причине возникновения перенапряжений и повышенного уровня пульсаций [12]. Следовательно, для повышения эксплуатационной надежности инвертора, напряжение между двумя конденсаторами звена постоянного тока трехуровневого инвертора должно строго контролироваться и равняться половине величины напряжения источника питания. Показатель коммутационных потерь оказывает непосредственное влияние на КПД инвертора, что особенно актуально для высоковольтных электроприводов большой мощности (единицы, десятки МВт).

В данной статье предлагается новый алгоритм ПВШИМ с гибридной последовательностью переключений (ПП), разработанной на основе пятиступенчатой и семиступенчатой ПП. Данный алгоритм позволяет сохранить баланс напряжения нейтральной точки звена постоянного тока на заранее заданном уровне и снизить количество переключений силовых ключей инвертора на 14,3 %, что благоприятно сказывается на энергосбережении, массогабаритных показателях и эксплуатационной надежности ЗУ АИН с ФНТ.

Алгоритм пространственно-векторной ШИМ с гибридной последовательностью переключений

Силовая схема трехуровневого инвертора состоит из 12 силовых ключей ($S_{1a} \dots S_{4a}, S_{1b} \dots S_{4b}, S_{1c} \dots S_{4c}$) и 6 фиксирующих диодов ($D_{1a}, D_{2a}, D_{1b}, D_{2b}, D_{1c}, D_{2c}$), равномерно распределенных по трем фазам a, b и c (рис. 1). Каждый силовой

Влияние базовых векторов на баланс напряжения НТ подробно рассмотрен в работе [12]. Базовые большие и нулевые векторы не влияют на напряжение НТ u_{HT} , которое определяется напряжением между нейтральной точкой O и точкой N (см. рис. 1). Для средних векторов напряжение НТ может повышаться или понижаться в зависимости от условий работы инвертора, однако влияние этого вектора незначительно. Малые векторы существенно влияют на напряжение НТ. В двигательном режиме комбинации P -типа повышают напряжение НТ, а комбинации N -типа действуют в противоположном направлении.

Управление базовыми векторами осуществляется при помощи одного обобщенного пространственного вектора $\bar{U}_S$ [14], который позволяет сформировать на выходе трехуровневого инвертора требуемую форму напряжения с регулируемой амплитудой и частотой. При применении ПВШИМ за период квантования $T_{ШИМ}$ пространственный вектор напряжения $\bar{U}_S$ синтезируется тремя ближайшими базовыми векторами по принципу «вольт-секундного баланса». На примере сегмента 1 (сектор I) базовые векторы $\bar{U}_{M1}$, $\bar{U}_{M2}$ и $\bar{U}_0$ могут быть выбраны для синтеза пространственного вектора $\bar{U}_S$ (см. рис. 2а) и представлены в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = \gamma_1 \bar{U}_{M1} + \gamma_2 \bar{U}_{M2} + \gamma_3 \bar{U}_0; \\ \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma_1 = t_1/T_{ШИМ}$; $\gamma_2 = t_2/T_{ШИМ}$; $\gamma_3 = t_3/T_{ШИМ}$ – относительные продолжительности включения базовых векторов $\bar{U}_{M1}$, $\bar{U}_{M2}$ и $\bar{U}_0$ соответственно, а t_1 , t_2 и t_3 – их абсолютные значения.

Пространственный вектор напряжения $\bar{U}_S$ в выражении (1) может быть описан в виде комбинаций состояний базовых векторов:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = \gamma_1 \begin{Bmatrix} [POO] \\ [ONN] \end{Bmatrix} + \gamma_2 \begin{Bmatrix} [PPO] \\ [OON] \end{Bmatrix} + \gamma_3 \begin{Bmatrix} [PPP] \\ [OOO] \\ [NNN] \end{Bmatrix}; \\ \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь исключены комбинации состояний $[PPP]$ и $[NNN]$ нулевого базового вектора, которые вызывают наивысший состав синфазного напряжения $+U_d/2$ [11]. Согласно (2) можно привести большое количество вариантов ПП благодаря избыточным комбинациям состояний малых базовых векторов. Среди них наибольшее применение для управления трехуровневого инвертора получили 7-я и 5-я последовательности переключений [15]. Применение каждой из них имеет свои слабые и сильные стороны. Так, например, 5-я ПП позволяет достичь низких уровней синфазного напряжения и малых коммутационных потерь [16], однако

при этом возникает дисбаланс напряжения НТ, приводящий к ухудшению качества кривой выходного напряжения и тока на выходе инвертора. И, напротив, применение 7-й ПП обеспечивает наилучший баланс напряжения НТ и улучшение качества кривой выходного напряжения и тока, но приводит к большим коммутационным потерям и уровню синфазного напряжения [17].

В статье предлагается гибридная ПП, которая была разработана с целью объединения преимуществ 5-й и 7-й ПП, а также преодоления их недостатков. При формировании гибридной ПП, 5-я ПП включается в области «п», где наблюдается слабое влияние малого базового вектора на пространственный вектор $\bar{U}_S$, а 7-я ПП включается в области «с», где наблюдается сильное влияние малого базового вектора на $\bar{U}_S$ (рис. 2б). Из (1) следует, что чем ближе конец вектора $\bar{U}_S$ к базовому вектору, тем сильнее влияние этого базового вектора на $\bar{U}_S$. Гибридная ПП для сектора I представлена в табл. 1. В гибридной ПП случаи перехода между « p_1 » и « p_2 », « c_1 » и « c_2 » требует две дополнительные пары переключения силовых ключей, а все остальные случаи не требуют дополнительных пар переключений.

Из табл. 1 видно, что в сегментах 2 и 4 с областью «с» для формирования пространственного вектора напряжения $\bar{U}_S$ используется только один малый базовый вектор с равномерным распределением состояний P - и N -типов за один период квантования $T_{ШИМ}$, а в сегментах 1 и 3 с областями « c_1 », « c_2 » равномерное распределение комбинаций состояний P - и N -типов обеспечивается только для одного малого вектора с большей длительностью включения. Подобный вектор называется доминирующим малым базовым вектором. Так, например, если пространственный вектор напряжения $\bar{U}_S$ находится в сегменте 1 или 3 первого сектора (см. рис. 2 а) и попадает в область « c_1 » (см. рис. 2б), то в качестве доминирующего малого базового вектора выбирается вектор $\bar{U}_{M1}$, а в сегментах 1 или 3 для области « c_2 » – вектор $\bar{U}_{M2}$. Поэтому при нахождении пространственного вектора $\bar{U}_S$ в областях « c_1 » и « c_2 » обеспечивается приемлемый уровень баланса напряжения НТ в гибридной ПП. В областях «п», « p_1 » и « p_2 » (см. рис. 2б) за один период коммутации $T_{ШИМ}$ используется только один из двух типов (P или N) комбинаций малых базовых векторов в каждом сегменте (см. табл. 1), что вызывает дисбаланс напряжения НТ в гибридной ПП.

С целью улучшения характеристик системы (баланс напряжения нейтральной точки и коммутационные потери силовых ключей) в гибридной ПП необходимо осуществлять переключение между областями «п», « p_1 », « p_2 », «с», « c_1 » и « c_2 » при

Таблица 1

Гибридная ПП для сектора I

Table 1

The hybrid switching sequence for sector I

Сегмент 1								Сегмент 2			
П ₁		П ₂		С ₁		С ₂		П		С	
$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]
$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]
$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{B1}$	[PNN]	$\bar{U}_{B1}$	[PNN]
$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_{M1n}$	[ONN]	$\bar{U}_{M2p}$	[PPO]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{M1n}$	[ONN]
$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{B1}$	[PNN]
				$\bar{U}_0$	[OOO]	$\bar{U}_0$	[OOO]			$\bar{U}_{C1}$	[PON]
				$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]			$\bar{U}_{M1p}$	[POO]
Сегмент 3								Сегмент 4			
П ₁		П ₂		С ₁		С ₂		П		С	
$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]
$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]
$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{B2}$	[PPN]	$\bar{U}_{B2}$	[PPN]
$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{M1n}$	[ONN]	$\bar{U}_{M2p}$	[PPO]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{M2p}$	[PPO]
$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]	$\bar{U}_{B2}$	[PPN]
				$\bar{U}_{C1}$	[PON]	$\bar{U}_{C1}$	[PON]			$\bar{U}_{C1}$	[PON]
				$\bar{U}_{M1p}$	[POO]	$\bar{U}_{M2n}$	[OON]			$\bar{U}_{M2n}$	[OON]

Таблица 2

Условия переключения между областями в гибридной ПП

Table 2

Transition conditions between regions in the hybrid switching sequence

Для сегментов 1 и 3			
Область «с ₁ »	Область «с ₂ »	Область «п ₁ »	Область «п ₂ »
$\begin{cases} \gamma_1 \geq \gamma_2 \\ \gamma_1 + (2\lambda - 1)\gamma_2 \geq \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 < \gamma_2 \\ (2\lambda - 1)\gamma_1 + \gamma_2 \geq \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 \geq \gamma_2 \\ \gamma_1 + (2\lambda - 1)\gamma_2 < \lambda \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma_1 < \gamma_2 \\ (2\lambda - 1)\gamma_1 + \gamma_2 < \lambda \end{cases}$
Для сегментов 2 и 4			
Область «с»		Область «п»	
$\begin{cases} \gamma_1 + (1 - 2\lambda)\gamma_2 \leq 1 - \lambda \\ (1 - 2\lambda)\gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 - \lambda \end{cases}$		$\begin{cases} \gamma_1 + (1 - 2\lambda)\gamma_2 > 1 - \lambda \\ (1 - 2\lambda)\gamma_1 + \gamma_2 > 1 - \lambda \end{cases}$	

работе системы в каждом сегменте, т. е. определить области работы этих ПП по векторной диаграмме (см. рис. 2b). С учетом этого введен коэффициент регулирования λ гибридной ПП

$$\lambda = \frac{d}{U_{6.m}} = d\sqrt{3} \quad \text{при } 0 \leq \lambda \leq 1, \quad (3)$$

где $\bar{U}_{6.m} = 1/\sqrt{3}$ – нормированная величина модуля малого базового вектора, равная длине стороны сегмента; d – часть длины стороны сегмента, соответствующая включению области «п₁», «п₂» или «п» согласно рис. 2b.

На основе рис. 2b были определены условия переключения между областями «п₁», «п₂», «п»,

«с₁», «с₂» и «с» для каждого сегмента, которые сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что область работы между 5-й и 7-й ПП зависит от введенного коэффициента регулирования λ гибридной ПП и относительных продолжительностей включений базовых векторов γ_1 и γ_2 , однозначно связанных с положением пространственного вектора напряжения $\bar{U}_s(\mu, \theta)$ (см. рис. 2a). Здесь μ – коэффициент модуляции, задающий длину вектора $\bar{U}_s$, а θ – его угол поворота.

Из рис. 2b можно сделать следующие выводы: – при увеличении коэффициента λ общая об-

ласть с 5-й ПП расширяется, а с 7-й ПП суживается и наоборот;

– при $\lambda = 0$ используется только 7-я ПП, а при $\lambda = 1$ – только 5-я ПП;

– при увеличении коэффициента μ в пределах от 0 до 0,5 общая область работы с 7-й ПП расширяется, а с 5-й ПП, наоборот, суживается;

– при увеличении коэффициента μ в пределах от 0,5 до 1 общая область работы с 7-й ПП суживается, а с 5-й ПП, наоборот, расширяется.

Функциональная схема электропривода со скалярной системой управления и алгоритмом ПВШИМ с гибридной ПП

Функциональная схема электропривода со скалярной системой управления для асинхронного электродвигателя (АД) представлена на рис. 3. Схема состоит из двух частей: силовой цепи и системы управления. Силовая цепь была подобно рассмотрена выше (см. рис. 1). Система управления (СУ) электроприводом осуществляет регулирование напряжения и частоты на выходе трехуровневого инвертора по закону $U/f = \text{const}$, обеспечивающему поддержание перегрузочного момента на валу АД во всем частотном диапазоне. В ее состав входят (см. рис. 3): источник сигнала задания частоты $f_{\text{Зад}}$, генератор угла поворота (ГУП), функциональный преобразователь ФП, блок ПВШИМ с гибридной ПП и драйвер, обеспечивающий согласование импульсов управления с затворами силовых транзисторов инвертора.

Генератор угла поворота θ (ГУП) представляет собой интегратор, вычисляющий θ согласно выражению

$$\theta_0 = \int_0^T 2\pi f_{\text{Зад}} \cdot dt \quad (4)$$

с периодической установкой нулевых начальных значений в интеграторе в моменты времени $T = 2\pi$.

Формирование закона управления $U/f = \text{const}$ обеспечивает функциональный преобразователь ФП, который прямо пропорционально частоте $f_{\text{Зад}}$ изменяет амплитуду сигнала задания по напряжению U_m на выходе АИН. При частоте $f_{\text{Зад}}$ больше номинальной частоты f_N двигателя, ФП ограничивает максимальный сигнал задания по амплитуде, соответствующий номинальному фазному напряжению $U_{\text{ФН}}$ на двигателе. В области низких частот задания осуществляется форсировка по напряжению с целью компенсации падения напряжения в статорных обмотках двигателя и увеличению его электромагнитного момента.

Функциональная схема блока, реализующего алгоритм ПВШИМ с гибридной ПП, представлена на рис. 4. В состав этой системы входят следующие основные блоки: генератор пилообразного напряжения и синхронизирующих импульсов (ГПН); вычислитель ПВШИМ, включающий в себя определитель номера сектора и сегмента, а также вычислитель $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$; блок гибридной ПП. Подробная работа данных блоков, за исключением блока гибридной ПП, рассмотрена в работе [18].

Генератор пилообразного сигнала и синхронизирующих импульсов осуществляет формирование пилообразного напряжения $u_{\text{ГПН}}$ и синхронизирующих импульсов $f_{\text{СИН}}$ с частотой $f_{\text{ШИМ}}$, формируемых в моменты перехода сигнала $u_{\text{ГПН}}$ через нулевой уровень (рис. 5).

Вычислитель ПВШИМ осуществляет расчет относительных продолжительностей включения базовых векторов γ_1, γ_2 и γ_3 , а также определение номера сектора $N_{\text{СЕК}} = 1 \dots 6$ и сегмента

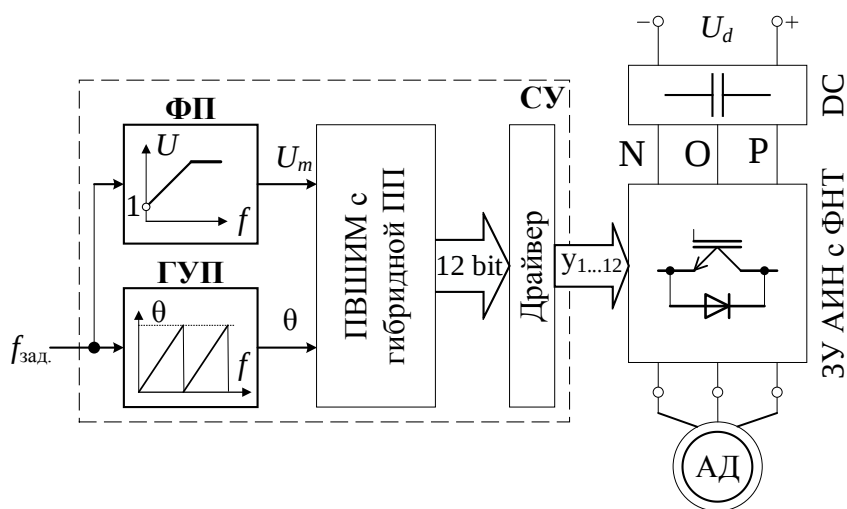


Рис. 3. Функциональная схема электропривода со скалярной системой управления на базе ЗУ АИН с ФНТ

Fig. 3. Functional diagram of an electric drive with a scalar control system based on a three-level neutral point clamped voltage source inverter

$N_{\text{СЕК}} = 1 \dots 4$, в котором находится пространственный вектор напряжения $\bar{U}_S$.

Блок гибридной ПП осуществляет формирование управляющих импульсов $u_{y1} - u_{y12}$ для управления силовыми ключами инвертора и состоит из следующих блоков: вычислителя оптимального коэффициента регулирования $\lambda_{\text{ОПТ}}$, селектора ПП, а также блоков 5-й и 7-й ПП (см. рис. 4).

Вычислитель $\lambda_{\text{ОПТ}}$ выполняет расчет оптимального коэффициента регулирования в зависи-

мости от частоты сигнала задания $f_{\text{ЗАД}}$ электропривода. Подробно математика данного блока будет рассмотрена в следующем разделе данной статьи.

Селектор ПП осуществляет переключение между 5-й или 7-й ПП в зависимости от положения пространственного вектора напряжения $\bar{U}_S$ согласно условиям, приведенным в табл. 2. Выход данного блока $N_{\text{ПП}}$ представляет собой логический сигнал: «0» соответствует работе 7-й ПП и «1» – 5-й ПП.

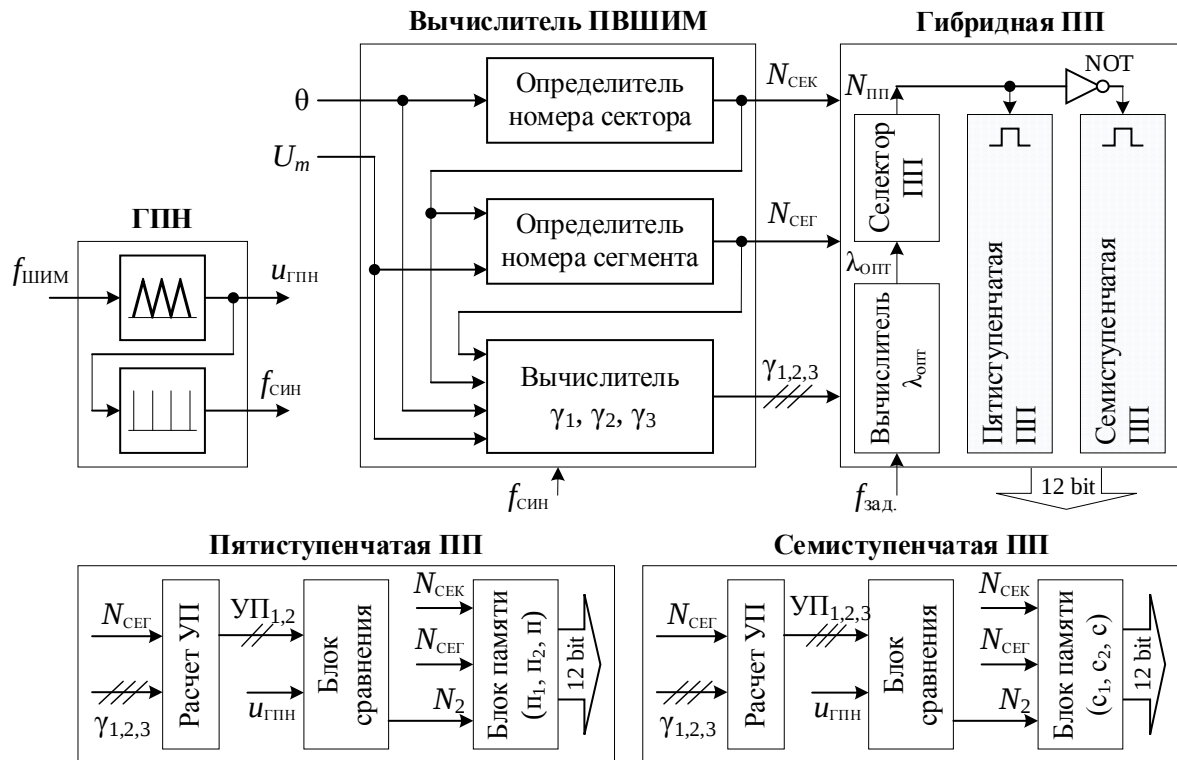


Рис. 4. Функциональная схема алгоритма ПВШИМ с гибридной ПП
Fig. 4. Functional diagram of the space-vector PWM algorithm with a hybrid switching sequence

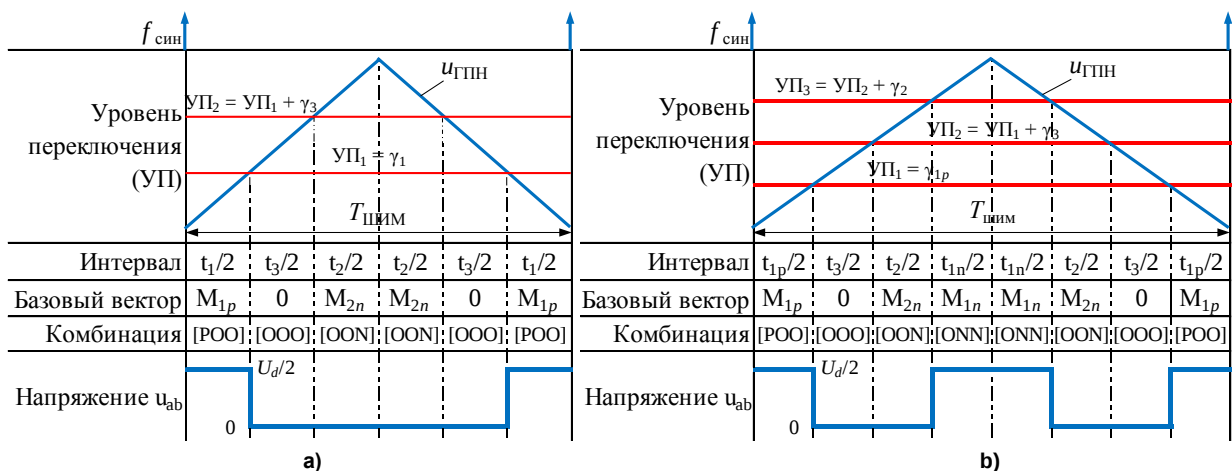


Рис. 5. Принцип переключения базовых векторов на одном периоде ШИМ для 1 сегмента (сектор I) в области «п₁» (а) и в области «с₁» (б)

Fig. 5. Principle of switching basic vectors in one PWM period for segment 1 (sector I) in the «p₁» region (a) and in the «c₁» region (b)

Блоки 5-й ПП и 7-й ПП подают управляющие сигналы для включения силовых ключей инвертора в соответствии с алгоритмом работы 5-й и 7-й ПП (см. табл. 1) и состоят из следующих подблоков: расчета уровней переключения УП, блока сравнения и блоков памяти.

Вычислитель УП осуществляет расчет двух уровней переключений (рис. 5а) для 5-й ПП в области «п₁» (см. рис. 2б) в соответствии с выражениями $УП_1 = \gamma_i$ и $УП_2 = УП_1 + \gamma_j$, где i, j – целые числа от 1 до 3, которые зависят от положения пространственного вектора $\bar{U}_S$ в каждом сегменте $N_{СЕГ}$. Для 7-й ПП в области «с₁» (см. рис. 2б) осуществляется расчет трех уровней переключений (рис. 5б) таким образом, чтобы общая продолжительность включения комбинаций Р-типа малых базовых векторов была равна продолжительности включения комбинаций N-типа.

Блок сравнения осуществляет сравнение пилообразного напряжения $u_{ГПН}$ с уровнями переключений $УП_i$ (см. рис. 5) с целью определения времени включения базовых векторов, при помощи которых формируется пространственный вектор напряжения на плоскости векторной диаграммы (см. рис. 2а) на каждом периоде ШИМ. Данные на выходе кодируются двухбитным двоичным кодом N_2 , содержащим информацию об адресе ячейки памяти, в которой записана информация о включении того или иного базового вектора.

Блок памяти осуществляет хранение информации кодов состояния включения силовых ключей для всех областей 5-й и 7-й ПП согласно табл. 1 в зависимости от номера сектора $N_{СЕК}$ и сегмента $N_{СЕГ}$, а также двоичного кода N_2 с выхода блока сравнения.

Результаты моделирования

Для оценки эффективности предлагаемого алгоритма управления трехуровневого инвертора (см. рис. 4) с точки зрения баланса напряжения НТ и коммутационных потерь была разработана компьютерная модель в среде MATLAB Simulink. Параметры моделирования: источник постоянного напряжения на входе инвертора $U_d = 940$ В; конденсаторы звена постоянного тока $C_{d1} = C_{d2} = 24\,000$ мкФ; частота ШИМ $f_{ШИМ} = 2,1$ кГц; асинхронный электродвигатель 4А355S4Y3 с номинальной мощностью $P_H = 250$ кВт и номинальным линейным напряжением $U_{ЛН} = 660$ В; форсировка по напряжению в области низких частот 5 % от $U_{ЛН}$. Все исследования проводились при номинальном моменте на валу АД $M_H = 1600$ Н·м при поддержании фазного тока статора практически на постоянном уровне 250 А.

Как известно, баланс напряжения НТ обеспечивает условие $u_{НТ} = U_d/2$, в противном случае возникает отклонение напряжения НТ $\Delta u_{НТ} = u_{НТ} - U_d/2$. Оценка эффективности баланса напряжения НТ производилась по максимальному значению относительной ошибки напряжения НТ:

$$\delta u_{НТ.макс} = \frac{|\Delta u_{НТ}|_{макс}}{U_d/2} \cdot 100 \% \quad (5)$$

Уровень коммутационных потерь оценивался по числу пар переключений силовых ключей $N_{ПК}$ за один период основной гармоники напряжения на выходе инвертора. Для оценки эффективности алгоритма ПВШИМ с гибридной последовательностью использовался показатель относительного снижения числа пар переключений силовых ключей $n_{ПК}$ по отношению к 7-й ПП ($\lambda = 0$), так как при данной ПП в системе наблюдается наибольшее количество переключений силовых ключей

$$n_{ПК} = \frac{N_{ПК}}{N_{ПК(\lambda=0)}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

На основе разработанной компьютерной модели электропривода и алгоритма ПВШИМ с гибридной ПП (см. рис. 4) на рис. 6 представлены пространства статического состояния: максимальной относительной ошибки напряжения НТ $\delta u_{НТ.макс}$ и относительного снижения числа пар переключений силовых ключей $n_{ПК}$ за один период основной гармоники напряжения на выходе инвертора в зависимости от нормированной частоты задания $\bar{f}_{ЗД} = f_{ЗД}/f_H$ и коэффициента регулирования λ гибридной ПП. Здесь $f_H = 50$ Гц – номинальная частота статора АД.

Анализ пространств статического состояния (см. рис. 6) позволяет сделать следующие выводы.

- При уменьшении частоты задания $\bar{f}_{ЗД}$ до значения 0,5 относительная ошибка $\delta u_{НТ.макс}$ монотонно увеличивается (рис. 6а), что объясняется более медленным вращением пространственного вектора $\bar{U}_S$ и увеличением времени работы в любом из сегментов векторной диаграммы (см. рис. 2а), вследствие чего наблюдается эффект накопления ошибки звена постоянного тока из-за дисбаланса напряжения НТ. При значениях $\bar{f}_{ЗД} < 0,5$ ошибка $\delta u_{НТ.макс}$ начинает снижаться, что объясняется увеличением длительностей включения нулевых базовых векторов, которые, как известно, не оказывают влияния на баланс напряжения НТ.

- Для 5-й ПП ($\lambda = 1$) относительная ошибка $\delta u_{НТ.макс}$ достигает больших значений 2,67 % (см. рис. 6а) при $\bar{f}_{ЗД} = 0,4$, а для 7-й ПП ($\lambda = 0$) эта же ошибка составляет всего лишь 0,71 %, что почти

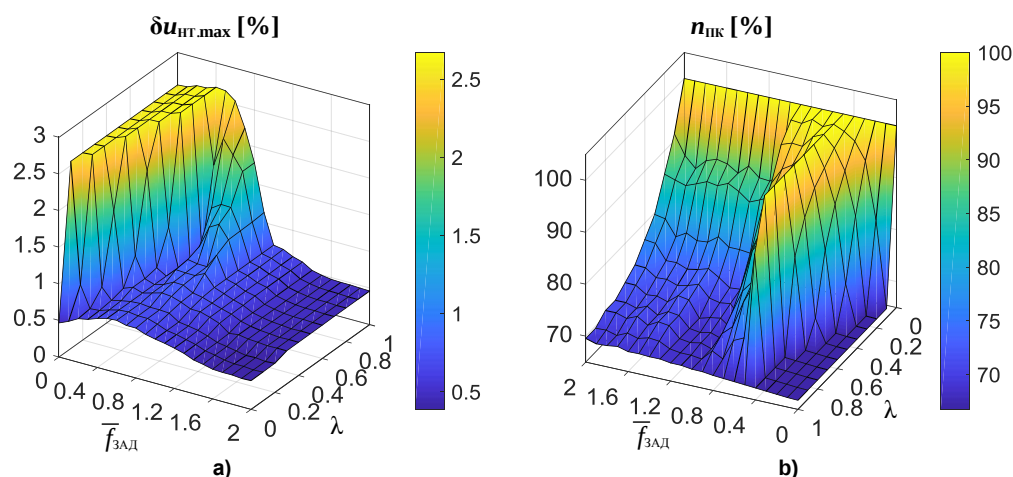


Рис. 6. Пространства статического состояния: максимальной относительной ошибки напряжения НТ $\Delta u_{NT,max}$ (а) и относительного снижения числа пар переключений силовых ключей $n_{ПК}$ (б) при изменении частоты $\bar{f}_{3AD}$ и коэффициента λ

Fig. 6. Static state spaces: maximum relative neutral point voltage error $\Delta u_{NT,max}$ (a) and relative reduction of the number of power switch pairs $n_{ПК}$ (b) as a function of frequency $\bar{f}_{3AD}$ and modulation index λ

в 3,8 раза меньше, чем для 5-й ПП. Это объясняется тем, что в 7-й ПП для компенсации ошибки $\Delta u_{NT,max}$ за один период квантования $T_{ШИМ}$ используется равномерное распределение комбинаций состояний P - и N -типов малых базовых векторов с большей длительностью включения, а в 5-й ПП используется только один из двух P - и N -типов малых векторов. Поэтому 7-я ПП обеспечивает оптимальный баланс напряжения НТ и повышает эффективность и надежность инвертора.

• Алгоритм ПВШИМ с гибридной ПП по уровню относительной ошибки $\Delta u_{NT,max}$ занимает среднее положение между 7-й и 5-й ПП, уровень которой зависит от коэффициента регулирования λ (см. рис. 6а). При этом существуют значения коэффициента λ , когда баланс напряжения НТ в гибридной ПП по уровню ошибки близок к 7-й ПП, что достигается за счет включения 7-й ПП, которая компенсирует рост отклонения ошибки НТ вследствие работы 5-й ПП. Так, например, при $\bar{f}_{3AD} = 0,3$ максимальное значение $\Delta u_{NT,max} = 2,62\%$ при использовании только 5-й ПП, $0,62\%$ при использовании только 7-й ПП и $0,69\%$ – при гибридной ПП с $\lambda = 0,3$.

• Относительная величина числа пар переключений силовых ключей $n_{ПК}$ достигает максимального значения 100% для 7-й ПП ($\lambda = 0$) и уменьшается до 67% для 5-й ПП ($\lambda = 1$) (рис. 6б). Это объясняется тем, что в 7-й ПП за один период коммутации происходит 6 переключений базовых векторов, а в 5-й ПП – только 4 (см. рис. 5). Для гибридной ПП величина $n_{ПК}$ зависит от коэффициента регулирования λ и изменяется в диапазоне от 67 до 100% . При частоте задания $\bar{f}_{3AD}$ в районе 0,5

величина $n_{ПК}$ достигает наибольшего значения для гибридной ПП, что объясняется значительным расширением области работы 7-й ПП при сокращении области работы 5-й ПП (см. рис. 2б).

Таким образом, зависимость величины $\Delta u_{NT,max}$ от коэффициента λ противоположна зависимости величины $n_{ПК}$ при изменении λ . Данные анализа показывают, что гибридная ПП позволяет не только обеспечить баланс напряжения НТ аналогично 7-й ПП, но и снизить коммутационные потери аналогично 5-й ПП.

С учетом вышесказанного возникает задача для алгоритма ПВШИМ с гибридной ПП (см. рис. 4) для любых значений частоты $\bar{f}_{3AD}$ определить оптимальный коэффициент регулирования $\lambda_{ОПТ}$, при котором максимальная относительная ошибка $\Delta u_{NT,max}$ незначительно возрастает, а количество переключений силовых ключей $n_{ПК}$ существенно уменьшается по сравнению с 7-й ПП.

На рис. 7а представлены зависимости $\Delta u_{NT,max}$ и $n_{ПК}$ от коэффициента регулирования λ , например, для случая $\bar{f}_{3AD} = 0,7$. Анализ зависимостей при $\bar{f}_{3AD} = 0,7$ позволяет выбрать оптимальное значение коэффициента регулирования $\lambda_{ОПТ} = 0,6$ в гибридной ПП, при котором $\Delta u_{NT,max}$ незначительно увеличивается, а $n_{ПК}$ уменьшается на 13% по сравнению с 7-й ПП. Таким же образом можно определить оптимальные значения $\lambda_{ОПТ}$ для других значений $\bar{f}_{3AD}$, которые построены на графике в виде зависимости $\lambda_{ОПТ} = F(\bar{f}_{3AD})$ (рис. 7б).

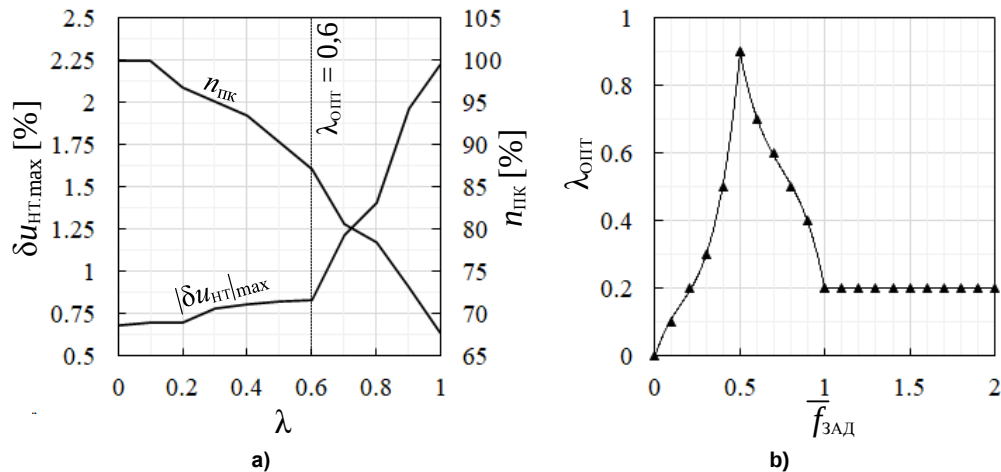


Рис. 7. Графики зависимостей $\delta u_{HT,max} = f(\lambda)$ и $n_{PIK} = f(\lambda)$ при $\bar{f}_{3AD} = 0,7$ (а)
и оптимальном коэффициенте регулирования $\lambda_{OPT} = F(\bar{f}_{3AD})$ (б)

Fig. 7. Plots of dependencies $\delta u_{HT,max} = f(\lambda)$ and $n_{PIK} = f(\lambda)$ for $\bar{f}_{3AD} = 0,7$ (а)
and optimal regulation coefficient $\lambda_{OPT} = F(\bar{f}_{3AD})$ (б)

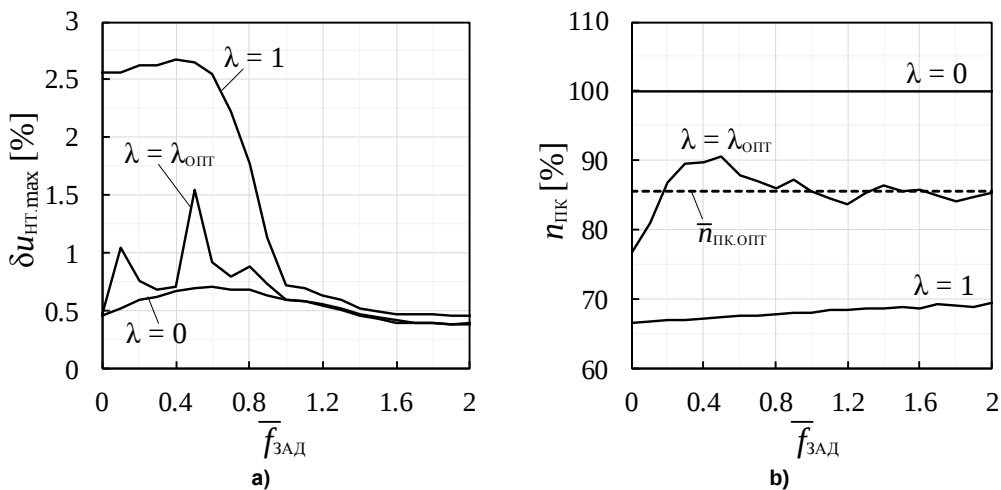


Рис. 8. Графики зависимостей $\delta u_{HT,max} = F(\bar{f}_{3AD})$ (а) и $n_{PIK} = F(\bar{f}_{3AD})$ (б)
при различных значениях коэффициента регулирования $\lambda = 0; 1,0$ и λ_{OPT}

Fig. 8. Plots of dependencies $\delta u_{HT,max} = F(\bar{f}_{3AD})$ (а) and $n_{PIK} = F(\bar{f}_{3AD})$ (б)
for values of the regulation coefficient $\lambda = 0; 1,0$ и λ_{OPT}

На основе полученных результатов определена функция аппроксимации коэффициента λ_{OPT} в зависимости от нормированной частоты $\bar{f}_{3AD}$:

$$\lambda_{OPT} = F(\bar{f}_{3AD}) = \begin{cases} 12,04\bar{f}_{3AD}^3 - 5,63\bar{f}_{3AD}^2 + 1,61\bar{f}_{3AD} - 0,004 & \text{при } \bar{f}_{3AD} < 0,5; \\ -9,26\bar{f}_{3AD}^3 + 20,83\bar{f}_{3AD}^2 - 16,44\bar{f}_{3AD} + 5,07 & \text{при } 0,5 \leq \bar{f}_{3AD} < 1,0; \\ 0,2 & \text{при } \bar{f}_{3AD} \geq 1,0. \end{cases} \quad (7)$$

Выражение (7) используется в блоке «Вычислитель λ_{OPT} » (см. рис. 4) для расчета оптимального коэффициента регулирования λ_{OPT} для любых значений нормированной частоты $\bar{f}_{3AD}$ в гибридной ПП. С целью доказательства правильного выбора оптимального значения коэффициента регулирования λ_{OPT} на рис. 8 приведены зависимости величин $\delta u_{HT,max}$ и n_{PIK} от частоты $\bar{f}_{3AD}$ при различных значениях

коэффициента регулирования $\lambda = 0$, $\lambda = 1,0$ и $\lambda = \lambda_{\text{ОПТ}}$, анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

- Максимальная относительная ошибка $\delta u_{\text{НТ.макс}}$ по сравнению с 7-й ПП ($\lambda = 0$) при $\lambda = \lambda_{\text{ОПТ}}$ не превышает значений 0,75 % (рис. 8а), что значительно меньше, чем для 5-й ПП ($\lambda = 1$).

- Среднее значение количества переключений силовых ключей $\bar{n}_{\text{ПК.ОПТ}}$ при $\lambda = \lambda_{\text{ОПТ}}$ во всем диапазоне изменения частоты $\bar{f}_{\text{ЗАД}}$ уменьшается на 14,3 % по сравнению с 7-й ПП ($\lambda = 0$) (рис. 8б), что неизбежно приводит к уменьшению коммутационных потерь в трехуровневом АИН с гибридной ПП. Максимальное снижение количества переключений силовых ключей до 33 % достигается при использовании только 5-й ПП ($\lambda = 1$), но показатель по ошибке $\delta u_{\text{НТ.макс}}$ здесь существенно ухудшается (см. рис. 8а). Из рис. 8б видно, что когда заданная частота $\bar{f}_{\text{ЗАД}}$ приближается к значению 0,5, значение $n_{\text{ПК}}$ имеет тенденцию к резкому увеличению из-за увеличения продолжительности включения 7-й ПП.

Заключение

В настоящей статье предложен новый алгоритм ПВШИМ с гибридной ПП, предназначенный для управления трехуровневого АИН с ФНТ в системах с регулируемыми электроприводами переменного тока. Основываясь на преимуществах 5-й и 7-й ПП, гибридная ПП была разработана с целью сохранения баланса напряжения нейтральной точки звена постоянного тока на заранее заданном уровне и снижения коммутационных потерь силовых ключей инвертора, что благоприятно сказывается на его энергосбережении, массогабаритных показателях и эксплуатационной надежности.

Анализ результатов на основе компьютерного моделирования в среде MATLAB Simulink подтвердил эффективность предложенного алгоритма управления и позволил сформулировать следующие основные выводы.

- Применение алгоритма ПВШИМ только с 5-й ПП ($\lambda = 1$) позволяет снизить количество переключений силовых ключей, так как формирование положения пространственного вектора напряжения на выходе инвертора осуществляется за счет 4 переключений базовых векторов на каждом периоде квантования. Однако при этом здесь возникает высокий уровень дисбаланса напряжения НТ (максимальный уровень ошибки $\delta u_{\text{НТ.макс}}$ до 2,67 %). Следовательно, 5-я ПП не является оптимальной для управления трехуровневого АИН с ФНТ.

- Использование алгоритма ПВШИМ только с 7-й ПП ($\lambda = 0$) обеспечивает наилучший баланс НТ (максимальный уровень ошибки $\delta u_{\text{НТ.макс}}$ до 0,71 %), но приводит к росту количества переключений силовых ключей на 32 % по сравнению с 5-й ПП, так как формирование положения пространственного вектора напряжения на выходе инвертора осуществляется за счет не 4, а 6 переключений базовых векторов на каждом периоде квантования. Следовательно, 7-ю ПП также нельзя считать оптимальной для управления трехуровневого инвертора.

- Предложенный алгоритм ПВШИМ с гибридной ПП позволяет гибко регулировать степень достижения заявленных критериев в зависимости от условий работы системы за счет изменения коэффициента регулирования λ . В работе получена аппроксимированная зависимость, позволяющая найти оптимальный коэффициент регулирования $\lambda_{\text{ОПТ}}$ для любых значений заданной частоты $f_{\text{ЗАД}}$ на входе инвертора при работе на асинхронный двигатель. При этом количество переключений силовых ключей уменьшается в среднем на 14,3 % при сохранении баланса напряжения НТ на допустимом уровне, близком к 7-й ПП (отклонения не превышают значений 0,75 %).

Реализация алгоритма ПВШИМ с гибридной ПП существенно упрощается благодаря применению точных и надежных современных микропроцессоров, что позволит расширить область применения данного алгоритма, повысив его эффективность и практическую применимость в прецизионных и высоковольтных электроприводах переменного тока.

Список литературы

1. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. 2008. № 15. С. 43–46.
2. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter // IEEE Transactions on Industry Applications. 1981. Vol. IA-17, no. 5. P. 518–523. DOI: 10.1109/TIA.1981.4503992
3. Steinke J.K., Steimer P.K. Medium Voltage Drive Converter for Industrial Applications in the Power Range from 0.5 MW to 5 MW Based on a Three-Level Converter Equipped with IGBTs // IEE Seminar PWM Medium Voltage Drives (Ref. No. 2000/063). 2000. DOI: 10.1049/ic:20000338
4. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters / P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marabeas, S. Manias // 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2008. P. 4296–4301. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592633
5. Gorozhankin A.N., Dudkin M.M. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills // Russian Electrical Engineering. 2020. No. 91 (7). P. 440–446. DOI: 10.3103/S1068371220070068
6. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора /

- И.Р. Абулвелеев, Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Г.В. Никифоров // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 72–77. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-72-77
7. Piao C., Hung J.Y. A simplified space vector PWM algorithm for three-level NPC VSI // *SoutheastCon 2015*. Fort Lauderdale, FL, USA, 2015. P. 1–8. DOI: 10.1109/SECON.2015.7132961
8. Improved Virtual Space Vector Modulation for Three-Level Neutral-Point-Clamped Converter with Feedback of Neutral-Point Voltage / C.-Q. Xiang, C. Shu, D. Han, B.-K. Mao, X. Wu, T.-J. Yu // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 5452–5465. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2737030
9. Bhalodi K.H., Agrawal P. Space Vector Modulation with DC-Link Voltage Balancing Control for Three-Level Inverters // *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*. New Delhi, India; 2006. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES.2006.344424
10. Abdulveleev I.R., Khrumshin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency // *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*. St. Petersburg, Russia; 2016. P. 476–481. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448226
11. A Virtual Space Vector Modulation Technique for the Reduction of Common-Mode Voltages in Both Magnitude and Third-Order Component / K. Tian, J. Wang, B. Wu, Z. Cheng, N.R. Zargari // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 839–848. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2408812
12. 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: DOI: 10.17816/2074-0530-125204
13. Кильдияров Р.Р. Преобразование Кларка в электроприводе // 2-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Школа молодых новаторов». 2021. С. 228–231.
14. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – a Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter / S. Busquets-Monge, J. Bordonau, D. Boroyevich, S. Somavilla // *IEEE Power Electronics Letters*. 2004. Vol. 2, no. 1. P. 11–15. DOI: 10.1109/LPEL.2004.828445
15. Wu B., Narimani M. *High-Power Converters and AC Drives*. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2016. 480 p. ISBN: 978-1-119-15606-2.
16. Chaiyot R., Kinnaree V., Kittiratsatcha S. Comparison of Vector Control of Two-Phase Induction Motor Using Continuous and Discontinuous SVPWM in Terms of Switching Losses Investigations // *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2017. DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075765
17. Space Vector Modulation for Neutral Point Clamped Multilevel Inverter with Even Order Harmonic Elimination / D.W. Feng, B. Wu, S. Wei, D. Xu // *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No. 04CH37513)*. 2004. P. 1471–1475. DOI: 10.1109/CCECE.2004.1349682
18. Neutral Point Voltage Balance Based on Space-Vector PWM with Five-Stage Sequence for Three-Level Voltage Inverter / A.N. Shishkov, M.M. Dudkin, V.K. Le, N.A. Eremin // *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. 2023. P. 586–592. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110815

References

1. Donskoy N., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. [Multilevel Autonomous Inverters for Electric Drive and Electric Power Engineering]. *Silovaya Elektronika*. 2008. No. 15. P. 43–46. (In Russ.)
2. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1981;IA-17(5):518–523. DOI: 10.1109/TIA.1981.4503992
3. Steinke J.K., Steimer P.K. Medium Voltage Drive Converter for Industrial Applications in the Power Range from 0.5 MW to 5 MW Based on a Three-Level Converter Equipped with IGBTs. *IEE Seminar PWM Medium Voltage Drives (Ref. No. 2000/063)*. 2000. DOI: 10.1049/ic:20000338
4. Panagis P., Stergiopoulos F., Marabeas P., Manias S. Comparison of State of the Art Multilevel Inverters. In: *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 2008. P. 4296–4301. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592633
5. Gorozhankin A.N., Dudkin M.M. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(7):440–446. DOI: 10.3103/S1068371220070068
6. Abdulveleev I.R., Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Nikiforov G.V. Basic principles of space vector modulation for three-level NPC-inverters. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2016;4(33):72–77. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-72-77
7. Piao C., Hung J.Y. A simplified space vector PWM algorithm for three-level NPC VSI. In: *SoutheastCon 2015*. Fort Lauderdale, FL, USA; 2015. P. 1–8. DOI: 10.1109/SECON.2015.7132961
8. Xiang C.-Q., Shu C., Han D., Mao B.-K., Wu X., Yu T.-J. Improved Virtual Space Vector Modulation for Three-Level Neutral-Point-Clamped Converter with Feedback of Neutral-Point Voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(6):5452–5464. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2737030
9. Bhalodi K.H., Agrawal P. Space Vector Modulation with DC-Link Voltage Balancing Control for Three-Level Inverters. In: *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*. New Delhi, India; 2006. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES.2006.344424

10. Abdulveleev I.R., Khrumshin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency. In: *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*. St. Petersburg, Russia; 2016. P. 476–481. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448226
11. Tian K., Wang J., Wu B., Cheng Z., Zargari N.R. A Virtual Space Vector Modulation Technique for the Reduction of Common-Mode Voltages in Both Magnitude and Third-Order Component. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016;31(1):839–848. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2408812
12. Shishkov A.N., Dudkin M.M., Le V.K. 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. (In Russ.) DOI: 10.17816/2074-0530-125204
13. Kildiyarov R.R. [Clark's Transformation in an Electric Drive]. In: *2-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh "Shkola molodykh novatorov"* [2nd International scientific conference of promising developments of young scientists "school of young innovators"]. 2021. P. 228–231. (In Russ.)
14. 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;2(1):11–15. DOI: 10.1109/LPEL.2004.828445
15. Wu B., Narimani M. *High-Power Converters and AC Drives*. 2nd ed. Wiley-IEEE Press; 2016. 480 p. ISBN: 978-1-119-15606-2.
16. Chaiyot R., Kinnaree V., Kittiratsatcha S. Comparison of Vector Control of Two-Phase Induction Motor Using Continuous and Discontinuous SVPWM in Terms of Switching Losses Investigations. In: *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2017. DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075765
17. Feng D.W., Wu B., Wei S., Xu D. Space Vector Modulation for Neutral Point Clamped Multilevel Inverter with Even Order Harmonic Elimination. In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513)*. 2004. P. 1471–1475. DOI: 10.1109/CCECE.2004.1349682
18. Shishkov A.N., Dudkin M.M., Le V.K., Eremin N.A. Neutral Point Voltage Balance Based on Space-Vector PWM with Five-Stage Sequence for Three-Level Voltage Inverter. In: *2023 International Russian Smart Industry Conference*. 2023. P. 586–592. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110815

Информация об авторах

Шишков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой электрооборудования и промышленной электроники, Московский политехнический университет, Москва, Россия; shan1982@mail.ru.

Дудкин Максим Михайлович, д-р техн. наук, проф. кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dudkinmax@mail.ru.

Ле Ван Кань, аспирант кафедры электрооборудования и промышленной электроники, Московский политехнический университет, Москва, Россия; canhlv.mta@gmail.com.

Еремин Никита Андреевич, магистрант 2-го курса кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; neonisham@gmail.com.

Information about the authors

Alexander N. Shishkov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Electrical Equipment and Industrial Electronics, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; shan1982@mail.ru.

Maxim M. Dudkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Drives, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudkinmax@mail.ru.

Le Van Kan, Postgraduate Student of the Department of Electrical Equipment and Industrial Electronics, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; canhlv.mta@gmail.com.

Nikita A. Eremin, Master's Student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; neon-isham@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 01.08.2023; approved after review 21.09.2023; accepted for publication 08.11.2023.