

УДК 621.314.58

## **АЛГОРИТМЫ ШИМ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА С ПИТАНИЕМ ОТ МНОГОФАЗНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ**

**Николай Генрихович Чернышов**

кандидат технических наук, доцент

nchtamb@yandex.ru

**Мохаммед Албахри**

аспирант

albahri.m@mail.tstu.ru

Тамбовский государственный технический университет

г. Тамбов, Россия

**Аннотация.** Многофазные приводы с регулируемой скоростью в настоящее время рассматриваются как серьезные претенденты на различные применения из-за определенных преимуществ, которыми они обладают по сравнению с трехфазными приводами. С другой стороны, многоуровневый (преимущественно трехуровневый) инвертор напряжения (VSI) стал промышленно принятой технологией для трехфазных приводов среднего напряжения. Следующим логическим шагом является интеграция технологий многоуровневого VSI и многофазного привода, поскольку тогда можно будет объединить преимущества каждой из них. В данной статье будут рассмотрены последние достижения в этой области.

**Ключевые слова:** Многофазные приводы, многоуровневые инверторы напряжения, открытая топология обмотки.

## **Введение**

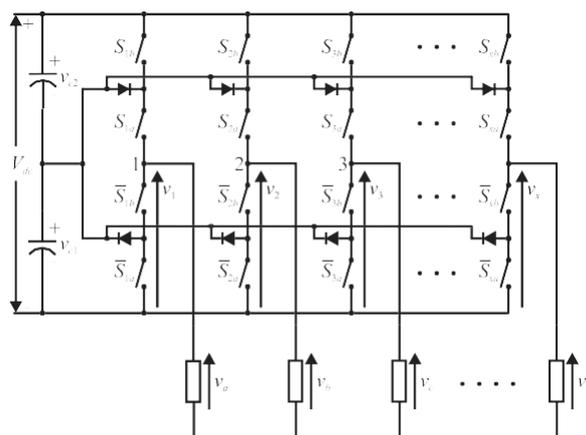
Требования, которым должен удовлетворять алгоритм модуляции VSI, многочисленны. Самое главное, что выходные фазные напряжения должны в среднем соответствовать заданным заданиям, а нежелательные гармоники должны появляться только в пределах, кратных частоте переключения. Результирующее коэффициент нелинейных искажений напряжения (КНИ) должен быть как можно меньшим, а последовательность переключения должна быть организована симметрично, таким образом, чтобы обеспечить равную и постоянную частоту переключения для каждой ветви инвертора. Некоторые требования противоречат друг другу. Например, потери переключения можно свести к минимуму за счет снижения частоты переключения, однако это отрицательно влияет на КНИ и электромагнитные помехи (ЕМИ).

Преимущества многофазных вариаторов перед трехфазными многочисленны [2]. Достигается повышение отказоустойчивости, поскольку вращающееся поле внутри обмотки статора можно получить всего с тремя фазами. Таким образом, машина может продолжать работу при нескольких поврежденных фазах, пока осталось хотя бы три исправных [3]. Многофазные машины могут быть построены с сосредоточенными или распределенными обмотками. В машинах с распределенной обмоткой только первая гармоника питания способствует созданию крутящего момента. Однако существует возможность подключить несколько многофазных машин последовательно и управлять ими независимо с помощью одного VSI [3]-[4].

Трехфазные многоуровневые топологии привлекают повышенное внимание в последние два десятилетия [5]. К многочисленным преимуществам многоуровневого питания относятся [6]: хорошее качество электроэнергии (низкие искажения напряжения и высокое значение  $dv/dt$ ), хорошая электромагнитная совместимость, работа с более низкой частотой переключения (меньшие потери переключения), возможность работы при

высоком напряжении, меньший синфазный сигнал и напряжение (снижение нагрузки на подшипники двигателя). Существуют различные топологии многоуровневых преобразователей. Основными из них являются фиксированная нейтральная точка (NPC), дополнительный конденсатор (FC) и каскадные преобразователи [5] [6].

Многофазные машины могут быть построены с использованием двух разных концепций создания крутящего момента. В той, которая рассматривается в данной статье, обмотка намотана таким образом, что распределение магнитодвижущей силы можно считать близким к синусоидальному. В первой рассмотренной топологии трехуровневый NPC VSI используется для питания машины, с  $n$ -фазной статорной обмоткой и одной изолированной нейтральной точкой. Топология показана на рисунок 1.



*Рисунок 1 – Многофазный (n-фазный) трехуровневый инвертор NPC, питающий нагрузку, подключенную звездой*

Вторая обсуждаемая топология с двухинверторным питанием показана на рисунок 2. Два источника постоянного тока изолированы, поэтому контурный ток не появляется. Когда источники постоянного тока имеют одинаковое напряжение, как предполагается в данной статье, конфигурация питания на рисунок 2 становится аналогичной трехуровневому инверторному источнику питания на рисунок 1 с удвоенным входным напряжением. Управление многофазными многоуровневыми преобразователями усложняется с увеличением количество фаз и расширением топологии.

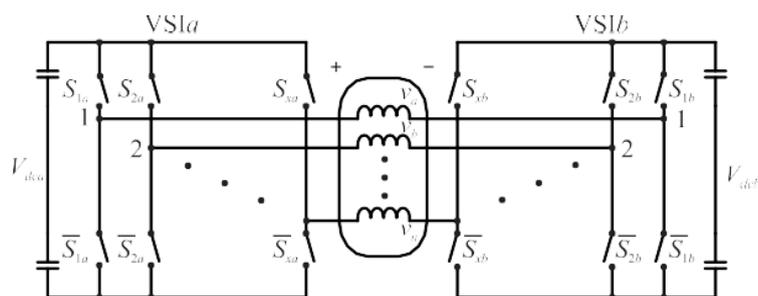


Рисунок 2 – эквивалентная структура двухинверторным питанием

На рисунок 3 показаны три метода ШИМ на основе несущей, используемые в сочетании с трехуровневыми VSI. ШИМ со сдвигом фазы (PS-PWM) и ШИМ со сдвигом уровня (LS-PWM) появились как расширение традиционного ШИМ на несущей для двухуровневых инверторов. PS-PWM хорошо подходит для многоуровневой топологии FC благодаря своей способности балансировки напряжения на конденсаторе. В PS-PWM между несущими сигналами ячеек, принадлежащих одному и тому же плечу инвертора, вводится фазовый сдвиг, заставляющий их переключаться в разные моменты времени. Таким образом создается ступенчатый многоуровневый сигнал [7]. Трехуровневая структура состоит из двух таких ячеек. Самый низкий КНИ достигается, когда несущие находятся в противофазе. Поскольку все ячейки эффективно управляются одной и той же несущей, которая изменяется только по фазе, т.е. несущие занимают одно и то же вертикальное положение (рисунок 3в), нагрузка переключателя и средняя мощность равномерно распределяются между ячейками [7]. Применительно к топологии FC конденсаторы заряжаются при запуске. Благодаря равномерному распределению мощности дальнейшего дисбаланса не будет [8]. В топологии с  $k$  ячейками выходное фазное напряжение имеет переключательную функцию, в  $k$  раз превышающую частоту переключения каждой ячейки. Таким образом, первые более высокочастотные гармоники появятся на частотах около  $k$  (здесь значение  $k = 2$ ) раз превышает несущую частоту [7].

ШИМ со сдвигом уровня также является естественным продолжением

биполярной ШИМ. Использование сравнения несущего сигнала с опорным определяет между верхним и нижним уровнями напряжения, которые являются положительными и отрицательными шинами в случае двухуровневого VSI. Для многоуровневого инвертора имеется  $(m-1)$  несущих, где  $m$  — количество уровней напряжения, по вертикали, а не по фазе (рисунок 3а и 9б).

Поскольку каждая несущая определяет границу между двумя уровнями напряжения, используется понятие «сдвинутый уровень». Сигналы управления должны передаваться на соответствующие переключатели для генерации стробирующих сигналов, соответствующих желаемым уровням напряжения, и это зависит от фактической топологии используемого инвертора.

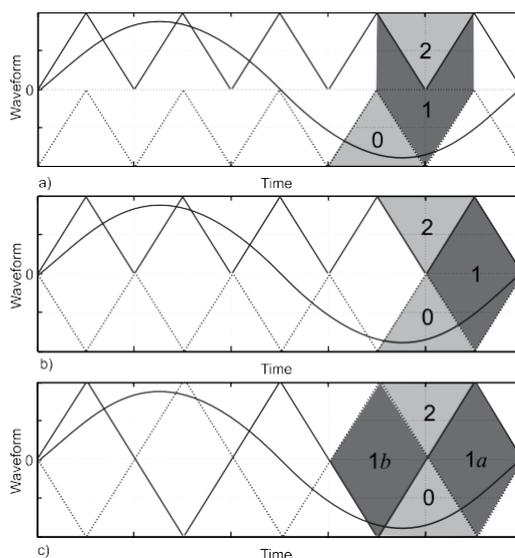


Рисунок 3 – Несущие и модулирующие сигналы для: а) методов модуляции PD-PWM, б) APOD-PWM и в) методов модуляции PS-PWM.

Существует несколько форм метода LS-PWM. Когда все несущие находятся в фазе друг с другом, метод называется фазовым расположением (PD-PWM, рис. 3а), когда все положительные несущие находятся в фазе друг с другом и в противофазе с отрицательными несущими, этот метод известен как противофазный (POD-PWM). Наконец, альтернативный противофазный метод расположения (APOD-PWM) достигается за счет наличия фазового сдвига для каждой двух соседних несущих [9]. В трехуровневом случае POD-PWM и APOD-PWM идентичны, рис. 3б. Из-за очень хороших характеристик

и преобладания в промышленных приложениях PD-PWM — это метод, который в литературе обычно обозначается как LS-PWM. LS-PWM приводит к меньшим искажениям напряжения по сравнению с PS-PWM. Однако PD-PWM не может обеспечить балансировку напряжения конденсаторов в инверторах FC, поэтому его необходимо применять к инверторам NPC.

### **Заключение**

Совокупные преимущества, предлагаемые многофазными и многоуровневыми топологиями, делают их привлекательным предложением для высокомоощных и отказоустойчивых приложений. Однако многоуправление топологиями требуют значительно большего количества элементов. В этой статье представлен обзор некоторых недавно опубликованных решений по модуляции многофазных многоуровневых преобразователей как для модуляции на основе несущей, так и для методов SVM.

### **Список литературы:**

1. E. Levi, “Multiphase electric machines for variable-speed applications,” IEEE Transactions on Ind. Electronics, vol. 55, no. 5, pp. 1893-1909, 2008.
2. E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, and S. Williamson, “Multiphase induction motor drives - A technology status review,” IET Electric Power Applications, vol. 1, no. 4, pp. 489-516, 2007.
3. S. Gataric, “A polyphase cartesian vector approach to control of polyphase AC machines,” in Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS, Rome, Italy, pp. 1648-1654, 2000.
4. S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, G. Franquelo, J. Pou, J. Rodriguez, B. Wu, and A. Perez, “Recent advances and industrial applications of multilevel converters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, 2010.
5. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, “Multilevel

voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, 2007.

6. J. Rodriguez, L. G. Franquelo, S. Kouro, J. I. Leon, R. C. Portillo, M. A. M. Prats, and M. A. Perez, “Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications,” Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1786-1817, 2009.

7. R. H. Wilkinson, T. A. Meynard, and H. du Toit Mouton, “Natural balance of multicell converters: The general case,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 6, pp. 1658-1666, 2006.

8. G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutari, and G. Sciutto, “A new multilevel PWM method: A theoretical analysis,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 7, no. 3, pp. 497-505, 1992

**UDC 621.314.58**

## **METHODOLOGY FOR ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF RURAL DEVELOPMENT**

**Nikolay G. Chernyshov**

doctor of technical sciences

nchtamb@yandex.ru

**Mohammed Albahri**

phd student

albahri.m@mail.tstu.ru

Tambov State Technical University

Tambov, Russia

**Abstract.** Multiphase variable speed drives are now considered as serious contenders for various applications due to certain advantages they offer over three-

phase drives. On the other hand, multi-level (mostly three-level) voltage inverter (VSI) has become an industrially accepted technology for three-phase medium voltage drives. The next logical step is to integrate multi-level VSI and multi-phase drive technologies, since the advantages of each can then be combined. This article will review the latest advances in this area.

**Key words:** Multiphase drives, multilevel voltage source inverters, open-end winding topology.

Статья поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 13.06.2024; принята к публикации 27.06.2024.

The article was submitted 03.05.2024; approved after reviewing 13.06.2024; accepted for publication 27.06.2024.