

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИММЕТРИЧНЫХ ФОРМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ВЕКТОРНОЙ ШИМ

**В.Олещук<sup>1</sup>**, докт.техн.наук, **В.Ермуратский<sup>1</sup>**, докт.техн.наук, **Ф.Барреро<sup>2\*</sup>**, PhD

<sup>1</sup> – Институт энергетики Академии наук Молдовы,

ул. Академическая, 5, Кишинев, MD-2028, Молдова.

E-mail: [oleschukv@hotmail.com](mailto:oleschukv@hotmail.com)

<sup>2</sup> – Департамент электроники, Университет Севилья, Севилья, Испания.

*Исследованы модуляционные процессы в силовом преобразователе с трехуровневым выходным напряжением на базе трех мостовых инверторов. Показано, что использование специальной стратегии переключения вентиляей и специализированного алгоритма синхронной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) векторного типа позволяет обеспечить четвертьволновую симметрию кривых фазного и линейного выходных напряжений преобразователя на всем диапазоне регулирования. Выполнен анализ гармонического состава выходного напряжения преобразователя в зонах средней и повышенной выходных частот системы. Определены усредненные интегральные спектральные характеристики выходного напряжения преобразователей с тремя основными разновидностями базовой схемы синхронной модуляции. Библ. 6, рис. 4.*

**Ключевые слова:** преобразователь каскадного типа, стратегия переключения вентиляей, спектры и гармоники.

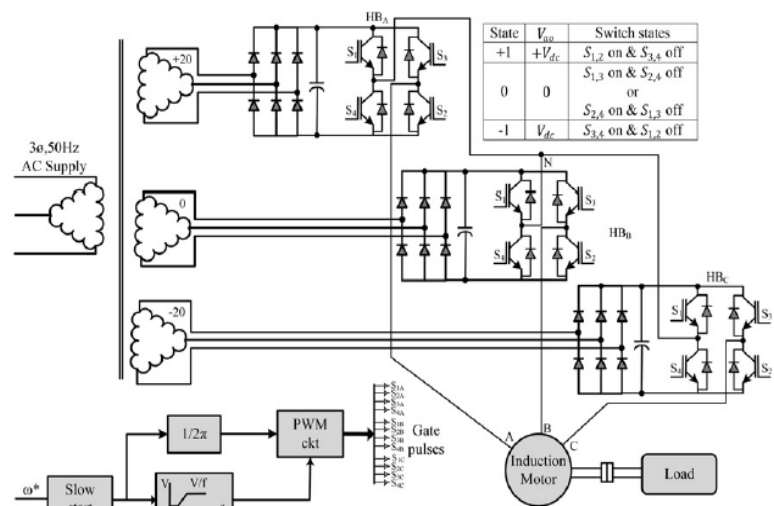
**Введение.** Силовые преобразователи с трехуровневым выходным напряжением являются одними из базовых устройств для преобразовательных систем повышенной мощности [1, 2, 5, 6]. На рис. 1 показана схема основных силовых цепей системы регулируемого асинхронного электропривода переменного тока на базе каскадного трехуровневого преобразователя, имеющего в своем составе три мостовых инвертора [1]. Частота переключения силовых вентиляей в подобных преобразовательных системах большой мощности является относительно невысокой, при этом важной проблемой для таких систем с целью минимизации величины субгармоник напряжения и тока основной частоты, являющихся крайне нежелательными в системах мощного электропривода, является непрерывное обеспечение синхронизации и симметрии форм выходного напряжения преобразователей в процессе регулирования.

**Синхронное и симметричное регулирование выходного напряжения трехуровневых преобразователей.** Целью работы является диссеминация базовой схемы синхронной векторной ШИМ, разработанной для стандартных трехфазных инверторов [3,4], применительно к трехуровневым преобразователям каскадного типа.

В этом случае алгоритмы синхронной ШИМ используются для расчета параметров (длительности и временного положения) импульсных управляющих и выходных сигналов преобразователя, а последовательность состояний ключей силовой схемы определяется в соответствии с базовой последовательностью переключения вентиляей для таких преобразователей [1]. При этом за счет свойств и особенностей стратегии синхронной ШИМ [3] обеспечивается синхронизация и четвертьволновая симметрия форм выходного напряжения при любом (целом или дробном) отношении частоты коммутации вентиляей трехуровневого преобразователя к выходной частоте.

На рис. 2–3 представлены кривые полярного  $V_{a0}$  и линейного  $V_{ab}$  напряжений трехуровневого преобразователя с синхронной векторной ШИМ при дробных соотношениях между частотой коммутации  $F_s$  и выходной частотой  $F$ . Представлены также соответствующие характеристики спектрального состава линейного выходного напряжения  $V_{ab}$ . Средняя частота коммутации вентиляей при этом равна  $F_s=1$  kHz.

На рис. 2 показаны диаграммы, иллюстрирующие работу системы в зоне средних выходных частот ( $F=35$  Hz,  $F_s/F=1000/35=28.6$  в этом случае): а – работа системы с непрерывной синхронной модуляцией; б – работа системы с прерывистой синхронной модуляцией с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентиляей; в – работа системы с прерывистой модуляцией с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентиляей. На рис. 3 показаны аналогичные диаграммы, иллюстрирующие работу системы в зоне повышенных выходных частот (в зоне сверхмодуляции) ( $F=47.5$  Hz,  $F_s/F=1000/47.5=21.05$  в этом случае). Анализ спектрограмм на рис. 2–3 показывает, что в спектре выходного напряжения преобразователей с синхронной ШИМ (при дробных соотношениях  $F_s/F$ ) содержится только нечетные (не кратные трем) гармоники, при этом в спектрах полностью отсутствуют субгармоники и четные гармоники.



**Рис. 1**

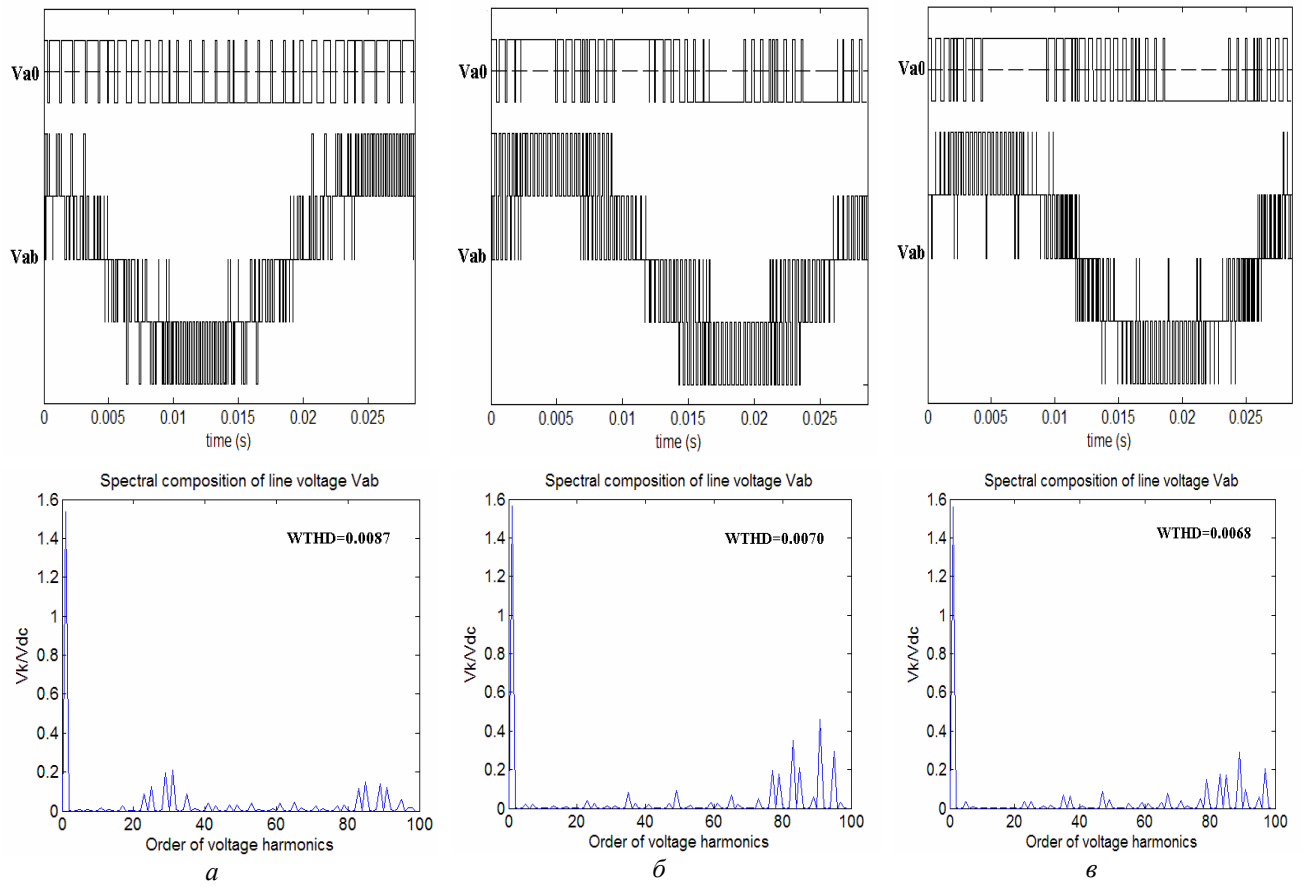


Рис. 2

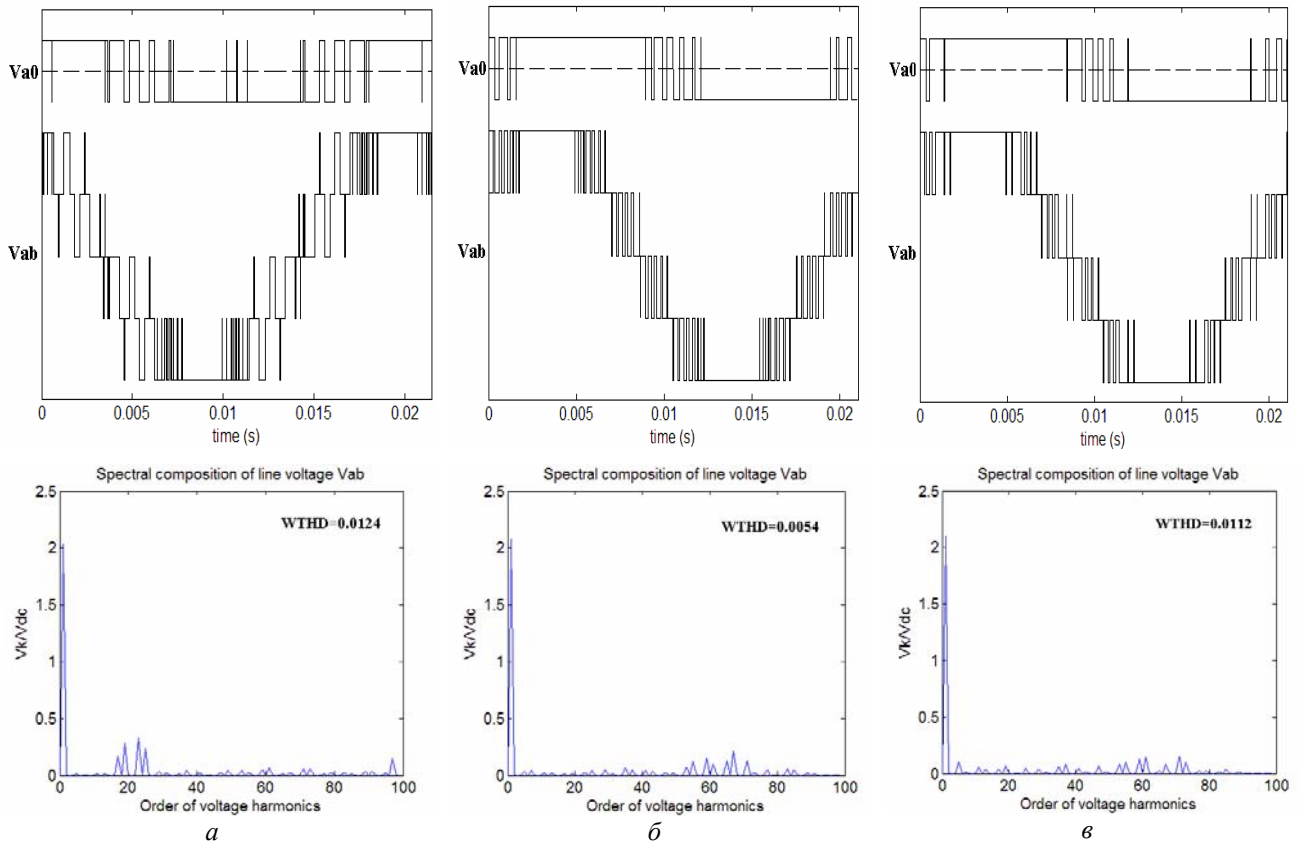


Рис. 3

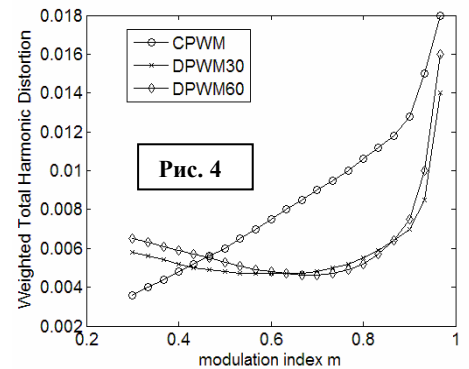
На рис. 4 представлен усредненный результат анализа интегральных спектральных характеристик выходного напряжения трехуровневых преобразователей с синхронной ШИМ. В частности, был рассчитан взвешенный коэффициент искажений линейного напряжения  $V_{ab}$  (Weighted Total Harmonic Distortion factor (WTHD)),

$$WTHD = (1/V_{abl}) \sqrt{\sum_{i=2}^{1000} (V_{abi}/i)^2}$$

в функции коэффициента модуляции

$m$  для системы с непрерывной ШИМ (CPWM) и с двумя вариантами прерывистой модуляции (DPWM30 и DPWM60). Средняя частота коммутации вентилей при этом принята равной 1 kHz, режим управления соответствует стандартному режиму с постоянством отношения величины напряжения к выходной частоте.

**Заключение.** Показано, что использование базового алгоритма и функциональных зависимостей метода синхронной векторной ШИМ (разработанного для стандартных двухуровневых инверторов напряжения [3]) для определения параметров управляющих и выходных сигналов трехуровневого преобразователя позволяет обеспечить синхронизацию выходного напряжения в системе на всем диапазоне регулирования при любых (в том числе дробных) соотношениях между частотой коммутации вентилей и выходной частотой.



1. Beig A.R., Kanukollu S., Dekka A. Space vector-based three-level discontinuous pulse-width modulation algorithm // IET Power Electronics. – 2013. – Vol. 6,8. – Pp. 1475–1482.
2. Bruckner T., Holmes D.G. Optimal pulse-width modulation for three-level inverters // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – Vol. 20,1. – Pp. 82–89.
3. Oleschuk V., Blaabjerg F. Synchronized scheme of continuous space-vector PWM with the real-time control algorithms // Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC'2004). – 2004. – Pp. 1207–1213.
4. Oleschuk V., Bojoi R., Griva G., Profumo F. Dual three-phase traction drive with dc sources power balancing based on synchronized PWM // Proc. of IEEE Int'l Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC'2007). – 2007. – Pp. 260–265.
5. Rodriguez J., Bernet S., Steimer P.K., Lizama I.E. A survey on neutral-point-clamped inverters // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2009. – Vol. 57,7. – Pp. 2219–2230.
6. Trzynadlowski A. Introduction to Modern Power Electronics. – John Wiley & Sons, 1998. – 456 p.

#### ANALYSIS AND SYNTHESIS OF SYMMETRICAL OUTPUT VOLTAGE OF THREE-LEVEL CONVERTERS WITH SPACE-VECTOR PWM

V.Oleschuk<sup>1</sup>, V.Ermuratskii<sup>1</sup>, F.Barrero<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova,

5 Academy Str., Kishinev, MD-2028, Moldova. E-mail: [oleschukv@hotmail.com](mailto:oleschukv@hotmail.com)

<sup>2</sup> – Department of Electronic Engineering, University of Seville, Seville, Spain.

*Modulation processes have been analyzed in three-level H-bridge converter with low switching frequency. It has been shown, that the use of special switching strategy combined with specific technique of PWM allows insuring of quarter-wave symmetry of the output voltage waveforms of converters during entire adjustment range. Investigation of harmonic composition of spectra of the output voltage of converter has been executed. Averaged integral spectral characteristics of the output voltage have been determined for converters with low switching frequency and with three basic versions of pulsewidth modulation. References 6, figures 4.*

**Key words:** cascaded converter, switching strategy, spectra and harmonics.

#### АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИМЕТРИЧНИХ ФОРМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ТРИРІВНЕВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВЕКТОРНОЮ ШІМ

В.Олещук<sup>1</sup>, докт.техн.наук, В.Єрмуратський<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Ф.Барреро<sup>2</sup>, PhD

<sup>1</sup> – Інститут енергетики Академії наук Молдови,

вул. Академічна, 5, Кишинів, MD-2028, Молдова. E-mail: [oleschukv@hotmail.com](mailto:oleschukv@hotmail.com)

<sup>2</sup> – Департамент електроніки, Університет Севільї, Севілья, Іспанія.

*Досліджено модуляційні процеси у силовому перетворювачі з трирівневою вихідною напругою на базі трьох мостових інверторів. Показано, що використання спеціальної стратегії перемикання вентилів та спеціалізованого алгоритму синхронної ШІМ векторного типу дозволяє забезпечити чвертьхвильову симетрію кривих фазної та лінійної вихідних напруг перетворювача у всьому діапазоні регулювання. Виконано аналіз гармонічного складу вихідної напруги перетворювача у зонах середньої та підвищеної вихідних частот системи. Визначено усереднені інтегральні спектральні характеристики вихідної напруги перетворювачів з трьома основними різновидами базової схеми модуляції. Бібл. 6, рис. 4.*

**Ключові слова:** перетворювач каскадного типу, стратегія перемикання вентилів, спектри та гармоніки.

Надійшла 03.02.2016  
Остаточний варіант 07.04.2016