

УДК 621.314

**АНАЛИЗ СКАЛЯРНОЙ И ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ
МОДУЛЯЦИЙ ДЛЯ ОДНОФАЗНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С ФИКСИРУЮЩИМИ ДИОДАМИ**

С.В. Брованов, Е.В. Гришанов

Новосибирский государственный технический университет

Многоуровневые преобразователи находят свое применение во многих областях электроэнергетики и электротехники. При этом качество преобразования электрической энергии в данных преобразователях во многом зависит от способа реализации широтно-импульсной модуляции (ШИМ) – скалярной или векторной. Выбор способа ШИМ во многом основывается на субъективных оценках разработчиков. В этой связи возникает необходимость проведения формального анализа и выявления взаимосвязи между скалярной и векторной ШИМ. Можно отметить, что данной задаче посвящены работы отечественных и зарубежных авторов, однако они направлены на исследование ШИМ для трехфазных многоуровневых схем. Отмечая актуальность применения однофазных многоуровневых преобразователей, авторы ставят перед собой цель – выявление взаимосвязи скалярной и векторной ШИМ в однофазных многоуровневых полупроводниковых преобразователях с фиксирующими диодами. В представленной работе проводится сопоставительный анализ и выявляется взаимосвязь между скалярной и векторной ШИМ для однофазных многоуровневых преобразователей с фиксирующими диодами. Определяются критерии данной взаимосвязи. Для подтверждения результатов был проведен синтез напряжений для фазных стоек однофазного трехуровневого преобразователя для скалярной и векторной ШИМ соответственно. Синтез проводился с использованием программного обеспечения *Mathcad* и выявленных критериев взаимосвязи. Полученные при этом результаты показали полное соответствие двух видов ШИМ.

Ключевые слова: многоуровневый полупроводниковый преобразователь, скалярная ШИМ, векторная ШИМ, весовой коэффициент, образующий вектор.

DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-47-56

Введение

Однофазные многоуровневые преобразователи востребованы в различных областях силовой преобразовательной техники. Первоначально данный тип преобразователей ориентировался для применения в высоковольтных устройствах и оборудовании, например в тяговых системах железнодорожного транспорта [1–5], так как они позволяют использовать более низкий класс коммутирующих элементов. Однако в силу того, что многоуровневые преобразователи позволяют синтезировать переменное напряжение с более низким коэффициентом гармоник, они хорошо себя зарекомендовали и в различных источниках питания с высокими показателями качества электрической энергии [6–8]. Также многоуровневые преобразователи находят все большее применение в системах компенсации реактивной мощности [9–13] и даже в аудиоусилительной технике [14]. В последнее время большое внимание уделяется развитию и применению многоуровневых преобразователей и в системах генерирования электрической энергии с использованием нетрадиционных источников энергии [15–17].

Работа выполнена в рамках программы стратегического развития НГТУ. Тема: «Повышение энергетической эффективности статических компенсаторов неактивной мощности, реализуемых на базе параллельно включенных многоуровневых преобразователей».

Известно, что качество преобразования электрической энергии в преобразователе определяется не только топологией его схемы, но и способами и законами управления. Можно заметить, что подавляющее количество способов управления преобразователями устройств силовой электроники строится на базе широтно-импульсной модуляции. Основными типами ШИМ, используемых в данных классах преобразователей, являются векторная и скалярная [18, 19].

На сегодняшний день нет четких критериев выбора типа ШИМ, и каждый разработчик отдает предпочтение тому или иному способу ШИМ, основываясь на субъективных оценках. Однако авторы данной работы полагают, что между скалярной и векторной ШИМ существует определенная взаимосвязь, отражающая их эквивалентность. Существует ряд отечественных и зарубежных работ [20–25], в которых рассматривается данная проблематика, однако они затрагивают только трехфазные трехуровневые преобразователи. При этом, как было отмечено выше, не меньшей популярностью пользуются однофазные трехуровневые преобразователи. Поэтому целью данной работы является выявление взаимосвязи скалярной и векторной ШИМ в однофазных трехуровневых полупроводниковых преобразователях с фиксирующими диодами.

Для упрощения анализа воспользуемся схемой однофазного трехуровневого преобразователя (рис. 1), а далее полученные результаты обобщим для многоуровневых схем.

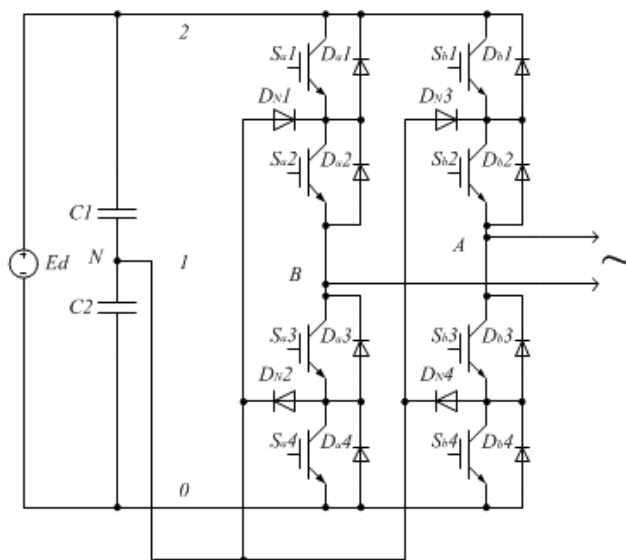


Рис. 1 – Однофазный трехуровневый инвертор с фиксирующими диодами

Fig. 1 – Single-phase three-level converter with clamping diodes

1. Сопоставительный анализ скалярной и векторной ШИМ

Для выявления взаимосвязи между скалярной и векторной ШИМ осуществим следующую процедуру.

1. Определим временные интервалы коммутаций ключей преобразователя для скалярного способа ШИМ, которые формируются путем сравнения опорного и модулирующего сигналов.

2. Найдем соответствие между полученными временными интервалами коммутаций ключей и весовыми коэффициентами комбинаций состояния ключей (КСК) для векторной ШИМ.

3. Синтезируем напряжения между зажимами A и $B - U_{AB}$ (рис. 1) для скалярной и векторной ШИМ по соответствующим временным интервалам коммутаций ключей преобразователя и весовыми коэффициентами, полученными ранее.

4. Проведем сравнительный анализ форм напряжений U_{AB} для скалярной и векторной ШИМ.

Временные интервалы коммутаций ключей преобразователя определяются точками пересечений опорных и модулирующих сигналов на такте ШИМ – T_s (рис. 2). Для определения временных интервалов коммутаций ключей запишем выражения для опорных и модулирующих сигналов и приравняем их друг другу соответственно.

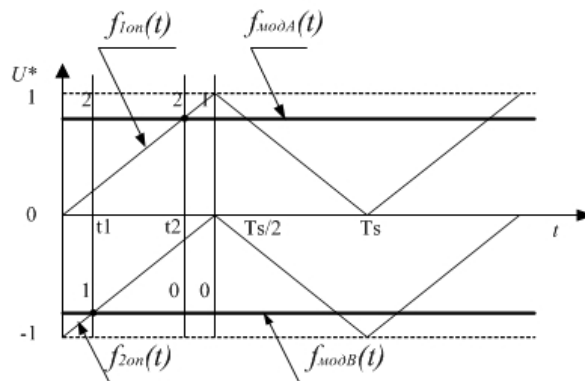


Рис. 2 – Опорные и модулирующие сигналы
Fig. 2 – Carrier and reference signals

Выражения для опорных сигналов на интервале половины такта ШИМ – $T_s/2$ (рис. 2) представлены в следующем виде:

$$f_{1on}(t) = \frac{2}{T_s}t; \quad f_{2on}(t) = \frac{2}{T_s}t - 1. \quad (1)$$

Выражения для модулирующих сигналов стойки A и стойки B имеют вид

$$f_{modA}(t) = M\cos(\omega t); \quad f_{modB}(t) = M\cos(\omega t + \pi). \quad (2)$$

Приравнявая выражения (1) и (2) соответствующим образом, находим относительные моменты точек пересечения – t_1/T_s и t_2/T_s :

$$\begin{cases} \frac{2}{T_s}t_1 - 1 = M \cos(\omega t_1 + \pi), \\ \frac{2}{T_s}t_2 = M \cos(\omega t_2) \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \frac{t_1}{T_s} = \frac{2 - 2M \cos(\omega t_1)}{4}, \\ \frac{t_2}{T_s} = \frac{2M \cos(\omega t_2) - 1}{4} + \frac{1}{4}. \end{cases} \quad (3)$$

Соотношения (3) представляют собой временные моменты точек пересечения опорных и модулирующих сигналов, отнесенные к длительности такта ШИМ – T_s .

Известно, что принцип векторной ШИМ основан на том, что длительности коммутаций КСК задаются согласно весовым коэффициентам образующих векто-

ров $\overline{V0} \dots \overline{V4}$, которые определяются по положению задающего вектора \overline{V}^* (рис. 3). Так как на периоде синтеза задающего вектора существует восемь сегментов (рис. 3), то в каждом сегменте действуют соответствующие весовые коэффициенты τ_{ij} [26], табл. 1, где i – номер сегмента; j – номер вектора. Из соотношений (3) видно, что их правые части соответствуют весовым коэффициентам первого сегмента. Таким образом, можно записать:

$$\begin{cases} \frac{t_1}{T_s} = \frac{\tau_{11}}{4} \\ \frac{t_2}{T_s} = \frac{\tau_{12}}{4} + \frac{1}{4}. \end{cases} \quad (4)$$

Подобным образом такое соответствие можно представить для всех сегментов векторной диаграммы.

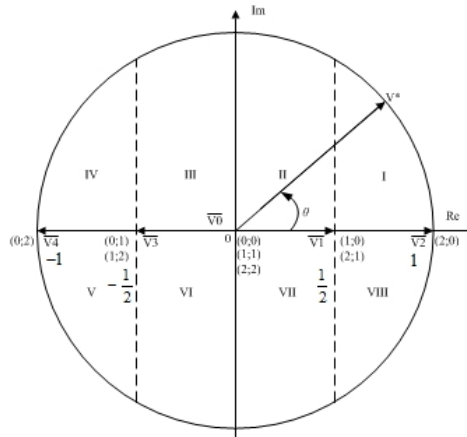


Рис. 3 – Образующие и задающий векторы для однофазного трехуровневого преобразователя

Fig. 3 – Space vector diagram for a single phase three-level converter

Таблица 1/Table 1

Сегмент/Region	Весовой коэффициент/Weighting factors
I, VIII	$\tau_{12}(\vartheta) = 2M \cos \vartheta - 1$ $\tau_{11}(\vartheta) = 2 - 2M \cos \vartheta$
II, VII	$\tau_{21}(\vartheta) = 2M \cos \vartheta$ $\tau_{20}(\vartheta) = 1 - 2M \cos \vartheta$
III, VI	$\tau_{33}(\vartheta) = -2M \cos \vartheta$ $\tau_{30}(\vartheta) = 1 + 2M \cos \vartheta$
IV, V	$\tau_{44}(\vartheta) = -1 - 2M \cos \vartheta$ $\tau_{43}(\vartheta) = 2 + 2M \cos \vartheta$

Далее определим длительности временных интервалов последовательности КСК, используемой для синтеза напряжения U_{AB} . Для этого найдем межкоммутационные интервалы на половине такта ШИМ $0 - T_s/2$, на основании соотношения (4): $\Delta t_1 = t_1 - 0$, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$, $\Delta t_3 = T_s/2 - t_2$:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t_1}{T_s} &= \frac{t_1}{T_s} = \frac{\tau_{11}}{4}; \\ \frac{\Delta t_2}{T_s} &= \frac{t_2}{T_s} - \frac{t_1}{T_s} = \frac{\tau_{12}}{4} + \frac{1}{4} - \frac{\tau_{11}}{4} = \frac{\tau_{12}}{4} + \frac{\tau_{12}}{4} + \frac{\tau_{11}}{4} - \frac{\tau_{11}}{4} = \frac{\tau_{12}}{2}; \\ \frac{\Delta t_3}{T_s} &= \frac{T_s}{2 \cdot T_s} - \frac{t_2}{T_s} = \frac{1}{2} - \frac{\tau_{12}}{4} - \frac{1}{4} = \frac{(\tau_{12} + \tau_{11})}{4} - \frac{\tau_{12}}{4} = \frac{\tau_{11}}{4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, для последовательности КСК вида (2;1) (2;0) (1;0) (рис. 2) получаем пропорции длительностей временных интервалов при синтезе напряжения U_{AB} в первом сегменте: для (2;1) ($\tau_{11}/4$); для (2;0) ($\tau_{12}/2$); для (1;0) ($\tau_{11}/4$); для (1;0) ($\tau_{11}/4$); для (2;0) ($\tau_{12}/2$); для (2;1) ($\tau_{11}/4$), соответствующие синтезу напряжения U_{AB} для скалярной ШИМ. Аналогичным образом можно получить пропорции длительностей временных интервалов в остальных сегментах.

Следовательно, можно отметить, что полученные пропорции весовых коэффициентов в последовательности КСК при синтезе напряжения U_{AB} являются некоторым критерием для взаимосвязи скалярной и векторной ШИМ.

В качестве подтверждения вышесказанного на рис. 4 показаны формы напряжения U_{AB} , полученные при использовании скалярной и векторной ШИМ. Анализируя данные формы напряжения U_{AB} , можно отметить, что они идентичны. Таким образом, скалярная и векторная ШИМ полностью соответствуют друг другу при применении ранее полученных временных пропорций КСК.

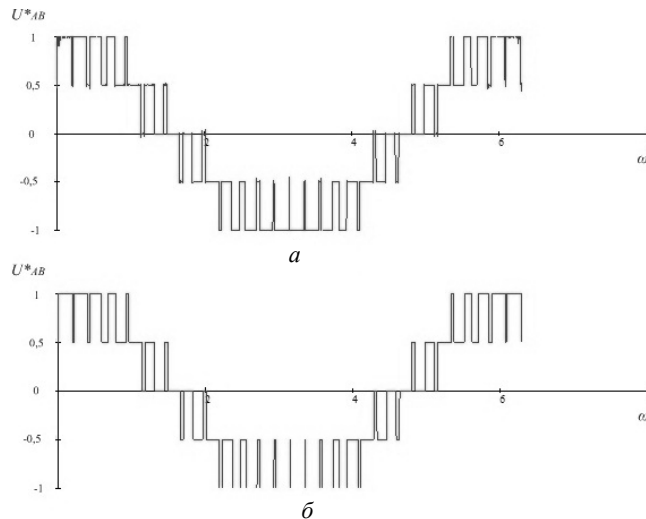


Рис. 4 – Напряжение U_{AB}^* для:

a – векторной ШИМ; *б* – скалярной ШИМ

Fig. 4 – Output voltage U_{AB}^* :

a – for SV PWM case; *b* – for the carrier-based PWM

Рассмотренная методика выявления взаимосвязи скалярной и векторной ШИМ может быть распространена и на схемы с другим числом уровней. Так, например, для однофазной четырехуровневой схемы [26] последовательность КСК в первом сегменте имеет следующие временные пропорции: для (3;1) ($\tau_{12}/4$); для (3;0) ($\tau_{13}/2$); для (2;0) ($\tau_{12}/4$); для (2;0) ($\tau_{12}/4$); для (3;0) ($\tau_{13}/2$); для (3;1) ($\tau_{12}/4$).

Заключение

В результате проведенного анализа была выявлена взаимосвязь между векторной и скалярной ШИМ для однофазных многоуровневых преобразователей с фиксирующими диодами. Получены критерии взаимосвязи между скалярной и векторной ШИМ. Критериями являются временные пропорции весовых коэффициентов КСК, используемых при синтезе задающего вектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nabae A., Takahashi I., Akagi H.** New neutral-point-clamped PWM inverter // IEEE IAS Annual Meeting Record. – 1980. – Vol. 2. – P. 761–766. – doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.
2. **Dieckerhoff S., Bernet S., Krug D.** Power loss-oriented evaluation of high voltage IGBTs and multilevel converters in transformerless traction applications // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20, iss. 6. – P. 1328–1336. – doi: 10.1109/TPEL.2005.857534.
3. **Rahmani S., Al-Haddad K.** A single phase multilevel hybrid power filter for electrified railway applications // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 9–13 July 2006. – Montreal, Quebec, 2006. – Vol. 2. – P. 925–930. – doi: 10.1109/ISIE.2006.295759.
4. **Tan P.C., Loh P.C., Holmes D.G.** A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, iss. 4. – P. 1043–1052. – doi: 10.1109/TPEL.2004.830038.
5. **Hinago Y., Koizumi H.** A single-phase multilevel inverter using switched series/parallel dc voltage sources // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57, iss. 8. – P. 2643–2650. – doi: 10.1109/TIE.2009.2030204.
6. A new single-phase HF-link multilevel inverter / J. Beristain, J. Bordonau, O. Raventys, J. Rocabert, S. Busquets, M. Mata // IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference PESC'05, 16 June 2005. – Recife, 2005. – P. 237–243. – doi: 10.1109/PESC.2005.1581630.
7. A new single-phase multilevel current-source inverter / Y. Xiong, D. Chen, S. Deng, Z. Zhang // Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC '04, 22–26 Feb. 2004. – Anaheim, California, USA, 2004. – Vol. 3. – P. 1682–1685. – doi: 10.1109/APEC.2004.1296091.
8. **Adabi J., Soltani H., Zare F.** A pulse width modulation technique for a multilevel converter in high voltage high frequency applications // 13th Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008, 1–3 Sept. 2008. – Poznan, 2008. – P. 718–722. – doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635350.
9. Hybrid control scheme for a single-phase shunt active power filter based on multilevel cascaded inverter / H. Miranda, V. Cardenas, G. Sandoval, G. Espinosa-Perez // IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007, 17–21 June 2007. – Orlando, Florida, 2007. – P. 1176–1181. – doi: 10.1109/PESC.2007.4342159.
10. An active power filter implemented with multilevel single-phase NPC converters / P. Acuna, L. Moran, C. Weishaupt, J. Dixon // IECON 2011 – 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7–10 Nov. 2011. – Melbourne, Victoria, 2011. – P. 4367–4372. – doi: 10.1109/IECON.2011.6120027.
11. An active power filter implemented with a three-level NPC voltage-source inverter / V. Aburto, L. Moran, M. Schneider, J. Dixon // 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 22–27 June 1997, PESC'97 Record. – St. Louis, Missouri, 1997. – Vol. 2. – P. 1121–1126. – doi: 10.1109/PESC.1997.616889.

12. **Narimani M., Moschopoulos G.** A new single-phase single-stage three-level power factor correction AC–DC converter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2012. – Vol. 27, iss. 6. – P. 2888–2899. – doi: 10.1109/TPEL.2011.2174256.
13. **Wu H., He X.** A novel single phase three-level power factor correction with passive lossless snubber // *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, 10–14 March 2002*. – Dallas, Texas, 2002. – Vol. 2. – P. 968–974. – doi: 10.1109/APEC.2002.989362.
14. **Antunes V.M.E., Pires V.F., Silva J.F.A.** Narrow pulse elimination PWM for multilevel digital audio power amplifiers using two cascaded H-bridges as a nine-level converter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2007. – Vol. 22, iss. 2. – P. 425–434. – doi: 10.1109/TPEL.2006.889912.
15. **Sotoodeh P., Miller R.D.** A new single-phase inverter with D-STATCOM capability for grid-connected small wind turbines // *Power and Energy Conference at Illinois PECE 2013, 22–23 Febr. 2013*. – Champaign, Illinois, 2013. – P. 175–179. – doi: 10.1109/PECE.2013.6506054.
16. **Rodríguez J., Lai J.-S., Peng F.Z.** Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2002. – Vol. 49, iss. 4. – P. 724–738. – doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
17. **Burger B., Kranzer D.** Extreme high efficiency PV-power converters // *13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'09, 8–10 Sept. 2009*. – Barcelona, 2009. – P. 1–13.
18. **Шрейнер П.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
19. **Брованов С.В., Харитонов С.А.** Однофазный многоуровневый выпрямитель с улучшенным гармоническим спектром входного тока // *Силовая интеллектуальная электроника*. – 2008. – № 3 (9). – С. 27–32.
20. **Zhou K., Wang D.** Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2002. – Vol. 49, iss. 1. – P. 186–196. – doi: 10.1109/41.982262.
21. **Sidney R., Bowes R., Lai Y.-S.** The relationship between space-vector modulation and regular-sampled PWM // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 1997. – Vol. 44, iss. 5. – P. 670–679. – doi: 10.1109/41.633469.
22. **Holmes D.G.** The general relationship between regular-sampled pulse-width-modulation and space vector modulation for hard switched converters // *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 4–9 Oct. 1992*. – Houston, Texas, 1992. – Vol. 1. – P. 1002–1009. – doi: 10.1109/IAS.1992.244437.
23. **Holmes D.G.** The significance of zero space vector placement for carrier-based PWM schemes // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1996. – Vol. 32, iss. 5. – P. 1122–1129. – doi: 10.1109/28.536874.
24. **Wang F.** Sine-triangle versus space-vector modulation for three-level PWM voltage-source inverters // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2002. – Vol. 38, iss. 2. – P. 500–506. – doi: 10.1109/28.993172.
25. **Yao W., Hu H., Lu Z.** Comparisons of space-vector modulation and carrier-based modulation of multilevel inverter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2008. – Vol. 23, iss. 1. – P. 45–51. – doi: 10.1109/TPEL.2007.911865.
26. A new approach for current calculation in a single-phase three-level NPC converter with space vector PWM / S. Brovanov, S. Kharitonov, M. Dybko, E. Grishanov // *IEEE Region 8 International Conference Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), Listvyanka, 11–15 July 2010*. – Irkutsk, 2010. – P. 639–644. – doi: 10.1109/SIBIRCON.2010.5555145.

ANALYSIS OF CARRIER-BASED AND SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION FOR SINGLE PHASE MULTILEVEL SEMICONDUCTOR CONVERTERS WITH CLAMPING DIODES

Брованов С.В., Гришанов Е.В.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Multilevel converters (MLC) are widespread in various fields of electrical and power engineering at present. The quality of converting energy generated by a multilevel converter depends on the type of pulse width modulation (PWM) used in MLC. There are two types of PWM, namely carrier-based PWM and space-vector PWM. The purpose of this work is finding the relationship between space-vector PWM and carrier-based PWM. Many researchers are concerned with the problem of comparison of carrier-based and space vector pulse width modulation but they mostly deal with three-phase systems. At present single-phase converters are becoming more and more widely used, so the goal of this research is finding the relationship between different types of PWM in single-phase NPC converters. To verify the results obtained waveforms of load voltages were synthesized. The synthesis was carried out by using the MathCAD software. As a result criteria for revealing the relationship between space vector PWM and carrier-based PWM have been found. These criteria made it possible to generate identical waveforms of the load voltage.

Keywords: multilevel semiconductor converter, carrier-based PWM, space vector PWM, weighting factor

REFERENCES

1. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter. *IEEE IAS Annual Meeting Record*, 1980, vol. 2, pp. 761–766. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992
2. Dieckerhoff S., Bernet S., Krug D. Power loss-oriented evaluation of high voltage IGBTs and multilevel converters in transformerless traction applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, vol. 20, iss. 6, pp. 1328–1336. doi: 10.1109/TPEL.2005.857534
3. Rahmani S., Al-Haddad K. A single phase multilevel hybrid power filter for electrified railway applications. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, Quebec, 9–13 July 2006, vol. 2, pp. 925–930. doi: 10.1109/ISIE.2006.295759
4. Tan P.C., Loh P.C., Holmes D.G. A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, iss. 4, pp. 1043–1052. doi: 10.1109/TPEL.2004.830038
5. Hinago Y., Koizumi H. A single-phase multilevel inverter using switched series/parallel dc voltage sources. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, iss. 8, pp. 2643–2650. doi: 10.1109/TIE.2009.2030204
6. Beristain J., Bordonau J., Raventys O., Rocabert J., Busquets S., Mata M. A new single-phase HF-link multilevel inverter. *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference PESC'05*, Recife, 16 June 2005, pp. 237–243. doi: 10.1109/PESC.2005.1581630
7. Xiong Yu., Chen D., Deng S., Zhang Zh. A new single-phase multilevel current-source inverter. *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC '04*, Anaheim, California, USA, 22–26 Feb. 2004, vol. 3, pp. 1682–1685. doi: 10.1109/APEC.2004.1296091
8. Adabi J., Soltani H., Zare F. A pulse width modulation technique for a multilevel converter in high voltage high frequency applications. *13th Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008*, Poznan, 1–3 Sept. 2008, pp. 718–722. doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635350
9. Miranda H., Cardenas V., Sandoval G., Espinosa-Perez G. Hybrid control scheme for a single-phase shunt active power filter based on multilevel cascaded inverter. *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007*, Orlando, Florida, 17–21 June 2007, pp. 1176–1181. doi: 10.1109/PESC.2007.4342159
10. Acuna P., Moran L., Weishaupt C., Dixon J. An active power filter implemented with multilevel single-phase NPC converters. *IECON 2011 – 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, Victoria, 7–10 Nov. 2011, pp. 4367–4372. doi: 10.1109/IECON.2011.6120027

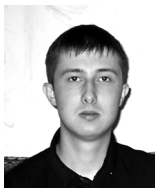
11. Aburto V., Moran L., Schneider M., Dixon J. An active power filter implemented with a three-level NPC voltage-source inverter. 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'97 Record, St. Louis, Missouri, 22–27 June 1997, vol. 2, pp.1121–1126. doi: 10.1109/PESC.1997.616889
12. Narimani M., Moschopoulos G. A new single-phase single-stage three-level power factor correction AC-DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, iss. 6, pp. 2888–2899. doi: 10.1109/TPEL.2011.2174256
13. Wu H., He X. A novel single phase three-level power factor correction with passive lossless snubber. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, Dallas, Texas, 10–14 March 2002, vol. 2, pp. 968–974. doi: 10.1109/APEC.2002.989362
14. Antunes V.M.E., Pires V.F., Silva J.F.A. Narrow pulse elimination PWM for multilevel digital audio power amplifiers using two cascaded H-bridges as a nine-level converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 425–434. doi: 10.1109/TPEL.2006.889912
15. Sotoodeh P., Miller R. A new single-phase inverter with D-STATCOM capability for grid-connected small wind turbines. Power and Energy Conference at Illinois PEI 2013, Champaign, Illinois, 22–23 Febr. 2013, pp. 175–179. doi: 10.1109/PEI.2013.6506054
16. Rodríguez J., Lai J.-S., Peng F.Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, iss. 4, pp. 724–738. doi: 10.1109/TIE.2002.801052
17. Burger B., Kranzer D. Extreme high efficiency PV-power converters. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'09, Barcelona, 8–10 Sept. 2009, pp. 1–13.
18. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with solid-state frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p.
19. Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Odnofaznyi mnogourovnevnyi vypryamitel' s uluchshennym garmonicheskim spektrom vkhodnogo toka [A single-phase multilevel rectifier with an improved harmonic spectrum of the input current]. *Silovaya intellektual'naya elektronika – Intellectual Power Electronics*, 2008, no. 3, pp. 27–32.
20. Zhou K., Wang D. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, iss. 1, pp. 186–196. doi: 10.1109/41.982262
21. Sidney R., Bowes R., Lai Y.-S. The relationship between space-vector modulation and regular-sampled PWM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, vol. 44, iss. 5, pp. 670–679. doi: 10.1109/41.633469
22. Holmes D.G. The general relationship between regular-sampled pulse-width-modulation and space vector modulation for hard switched converters. Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, Texas, 4–9 Oct. 1992, vol. 1, pp. 1002–1009. doi: 10.1109/IAS.1992.244437
23. Holmes D.G. The significance of zero space vector placement for carrier-based PWM schemes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, iss. 5, pp. 1122–1129. doi: 10.1109/28.536874
24. Wang F. Sine-triangle versus space-vector modulation for three-level PWM voltage-source inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 38, iss. 2, pp. 500–506. doi: 10.1109/28.993172
25. Yao W., Hu H., Lu Z. Comparisons of space-vector modulation and carrier-based modulation of multilevel inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, iss. 1, pp. 45–51. doi: 10.1109/TPEL.2007.911865
26. Brovanov S., Kharitonov S., Dybko M., Grishanov E. A new approach for current calculation in a single-phase three-level NPC converter with space vector PWM. IEEE Region 8 International Conference Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), Irkutsk, Listvyanka, 11–15 July 2010, pp. 639–644. doi: 10.1109/SIBIRCON.2010.5555145

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Брованов Сергей Викторович – родился в 1964 году, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительной техники, НГТУ. Область научных интересов: разработка энергоэффективных систем преобразования электрической энергии. Опубликовано 87 научных работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: brovanov@corp.nstu.ru).

Brovanov Sergei Viktorovich (b. 1964) – D. Sc (Eng.), professor, head of the Computer Science Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on design the effective power converters. He is author of 87 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: brovanov@corp.nstu.ru)



Гришанов Евгений Валерьевич – родился в 1988 году, аспирант НГТУ. Область научных интересов: системы генерирования на базе многоуровневых полупроводниковых преобразователей. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: grev88@yandex.ru).

Grishanov Evgenii Valer'evich (b. 1988) – Postgraduate of the Computer Science Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on generation systems based on NPC. He is author of 3 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, E-mail: grev88@yandex.ru).

*Статья поступила 16 октября 2014 г.
Received October 16, 2014*

To Reference:

Brovanov S.V., Grishanov E.V. Analiz skalyarnoi i vektornoj shirotno-impul'snykh modulyatsii dlya odnofaznykh mnogourovnevnykh poluprovodnikovykh preobrazovatelei s fiksiruyushchimi diodami [Analysis of carrier-based and space vector pulse width modulation for single phase multilevel semiconductor converters with clamping diodes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4, pp. 47–56.