

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ МОДУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ И ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

А.С. Маклаков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Предложен гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник. Данный алгоритм позволит снизить потери в преобразователе, возникающие при переключении ключей при пространственно-векторной ШИМ, за счет снижения числа этих переключений при ШИМ с удалением выделенных гармоник. В работе были сформулированы основные требования к гибриднему алгоритму. Основное внимание было уделено рассмотрению возможных вариантов смены алгоритмов пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник в зависимости от состояний проводимости полупроводниковых ключей в силовой схеме преобразователя. Для трехуровневого преобразователя были определены четыре возможных варианта, два из которых удовлетворяют основным требованиям гибридного алгоритма. Результаты моделирования в программе Matlab/Simulink демонстрируют выполнение требований к минимизации числа переключений полупроводниковых модулей преобразователя. Практическое использование предложенного гибридного алгоритма модуляции позволит повысить КПД и улучшить показатели качества преобразованной электроэнергии. Наибольшую эффективность предложенный гибридный способ модуляции покажет в области больших мощностей, где применяются высоковольтные трёхуровневые преобразователи.

Ключевые слова: силовая электроника, широтно-импульсная модуляция, преобразователь, гибридная модуляция, удаление выделенных гармоник, пространственный вектор.

Введение

Совершенствование и разработка новых алгоритмов модуляции полупроводниковых преобразователей являются одними из приоритетных направлений исследований в области силовой преобразовательной техники. Одна и та же топология построения силовой схемы преобразователя может применяться в разных областях и при отличающихся параметрах точек и способов подключения к нагрузке или питающей энергосистеме. Это приводит к тому, что использовать стандартные методы модуляции становится неэффективно, особенно в условиях ужесточения требований к электромагнитной совместимости и действия программ по повышению энергетической эффективности объектов промышленности и электроэнергетики [1, 2].

Существует несколько методов модуляции и огромное количество вариантов реализации алгоритмов переключения полупроводниковых ключей преобразователя. При оптимальном выборе метода и правильной настройке алгоритма модуляции

возможно добиться наилучших форм преобразованного тока и напряжения для питания нагрузки, что приведет к минимальному влиянию высших гармоник, снизит коммутационные потери и уровень синфазного напряжения [3].

В основном используются методы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), представленные на рис. 1: ШИМ на базе несущей частоты, пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ) и ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) [4].

Метод ШИМ на основе несущей частоты опорного сигнала является наиболее популярным для преобразователей в области малых мощностей. Алгоритмы модуляции данного метода обладают не самыми лучшими показателями качества преобразованной электроэнергии по сравнению с ШИМ с УВГ при аналогичных частотах переключения ключей и величине выходного напряжения преобразователя [5].

Благодаря своей универсальности метод ПВШИМ применяется в большинстве серийно-

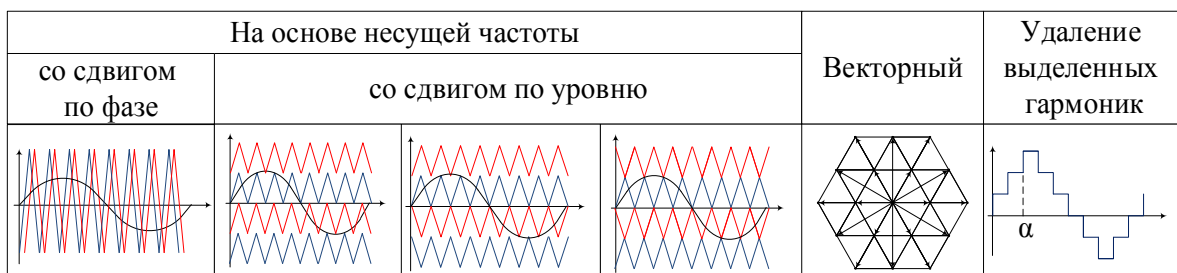


Рис. 1. Методы широтно-импульсной модуляции

выпускаемых автономных инверторов напряжения на всём диапазоне возможных мощностей, где в качестве нагрузки используется двигатель переменного тока. К основному недостатку ПВШИМ можно отнести нецелесообразно высокую частоту переключения в статическом режиме работы, когда не требуется изменять частоту и величину выходного тока/напряжения преобразователя [6].

ШИМ с УВГ применяется для преобразователей в области больших мощностей, так как позволяет корректировать гармонический состав преобразуемых тока и напряжения. Данный метод показал свою практическую применимость для активных выпрямителей в сочетании с многопульсными схемами преобразования, где большую часть времени остаются неизменными амплитуда и частота вектора выходного напряжения. Главной трудностью при создании метода ШИМ с УВГ является необходимость вычисления углов коммутации ключей путём решения системы нелинейных уравнений. Однако при правильном выборе начальных приближений подходящие определённым условиям решения вычисляются алгоритмами итерации, как например, методом Ньютона – Рафсона [7–10].

Постановка проблемы

Величина динамических потерь, которая зависит от частоты коммутации ключей, остаётся основным показателем, снижающим КПД преобразователя. Уменьшение количества коммутаций в силовой цепи преобразователя приведёт к увеличению мощности, надёжности и эффективности, но может оказать существенное влияние на спектры преобразованных тока и напряжения. Добиться максимального КПД преобразователя при использовании одного метода модуляции на всем диапазоне частот и значений выходных напряжения и тока с сохранением требуемых показателей качества достаточно сложно. Для решения поставленной проблемы в статье предлагается гибридный алгоритм модуляции, позволяющий осуществить переход от ПВШИМ к алгоритму ШИМ с УВГ, когда наблюдается постоянство величины и час-

тоты вектора выходного напряжения преобразователя.

Пространственно-векторная ШИМ

ПВШИМ формирует выходное трёхфазное напряжение с помощью определенной последовательности включения базовых состояний силовой схемы преобразователя при вольт-секундном балансе:

$$\begin{cases} \bar{U}_x \cdot T_1 + \bar{U}_y \cdot T_2 + \bar{U}_z \cdot T_3 = \bar{U}_3 \cdot T_S, \\ T_1 + T_2 + T_3 = T_S \end{cases}, \quad (1)$$

где \bar{U}_3 – вектор выходного напряжения; \bar{U}_x , \bar{U}_y , \bar{U}_z – вершины базовых пространственных векторов; T_S – период квантования; T_1 , T_2 и T_3 – временные интервалы длительности базовых состояний.

Количество базовых состояний зависит от топологии преобразователя, а их последовательность выбирается по заданным алгоритмам, учитывая требования и характеристики нагрузки. Поддержание вольт-секундного баланса является ключевым требованием на всем диапазоне значений амплитуды и частоты выходного напряжения преобразователя, обеспечивая высокое быстродействие и стабильную работу в условиях резко-переменного задающего воздействия. Однако при ПВШИМ не контролируются спектры выходных токов и напряжений и возникает избыточность переключений ключей, приводящая к излишним потерям [11].

ШИМ с удалением выделенных гармоник

ШИМ с УВГ формирует выходное трёхфазное напряжение с удалением из общего спектра определенных гармоник посредством включения базовых состояний силовой схемы преобразователя при точно заданных углах включения относительно длительности периода. В качестве примера на рис. 2 представлено типовое выходное напряжение преобразователя при методе ШИМ с УВГ с четвертьволновой симметрией [12].

Расчет углов включения α выполняется с помощью различных математических алгоритмов

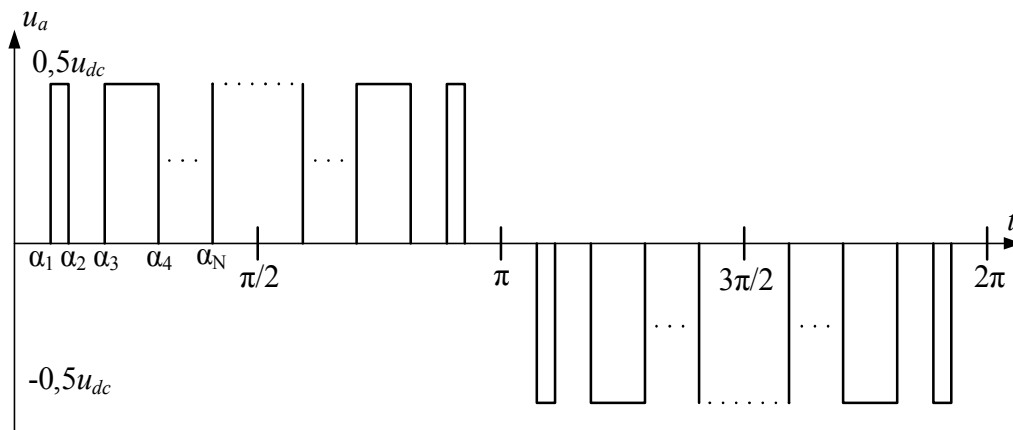


Рис. 2. Выходное напряжение преобразователя при ШИМ с УВГ

решений нелинейных систем уравнений при известных, подлежащих удалению гармониках.

ШИМ с УВГ может значительно улучшить электромагнитную совместимость и снизить коммутационные потери преобразователя, но обеспечить стабильную работу в условиях резко-переменного задающего воздействия на всем диапазоне частот и амплитуд выходного напряжения не представляется возможным [13–15].

Синтез гибридного алгоритма

Таким образом, для целого ряда промышленных электроприводов целесообразно использовать ПВШИМ в динамических режимах работы, а ШИМ с УВГ в статических режимах при определенных амплитудах и частотах выходного напряжения преобразователя. Наибольшую эффективность предложенный гибридный способ модуляции покажет в области больших мощностей, где в основном применяются трёхуровневые преобразователи. Фазная стойка и выходное напряжение такого преобразователя показаны на рис. 3, где [P], [O], [N] – базовые состояния силовой схемы преобразователя; VT_{1-4} – полупроводниковые ключи; VD_{1-4} – обратные диоды; VD_{c1-2} – нулевые диоды; u_a – фазное напряжение; u_{dc} – напряжение звена постоянного тока.

К гибриднему алгоритму модуляции были сформулированы основные требования, при выполнении которых будет обеспечиваться стабильная и автономная работа:

1. Амплитуда, частота и угол пространственного вектора напряжения не изменяются при смене алгоритмов;
2. Смена алгоритмов возможна в двух случаях: 1) без изменения состояний проводимости во всех фазах преобразователя; 2) при изменении только в одной фазе;

3. Смена алгоритмов осуществляется на границах полупериодов модуляции ПВШИМ.

Для трёхуровневого преобразователя были классифицированы все возможные моменты перехода между методами ПВШИМ и ШИМ с УВГ на четыре основные варианта.

Вариант 1. Без изменения состояний проводимости.

При первом варианте ни в одной фазе не меняются состояния полупроводниковых ключей в момент времени переключения $t_{пер}$, как показано на рис. 4. В этом случае процесс перехода будет осуществлен максимально эффективно. Вариант 1 удовлетворяет требованиям к гибриднему алгоритму модуляции.

Вариант 2. Изменяется одно состояние проводимости.

При втором варианте перехода в одной фазе меняется состояние проводимости в момент переключения $t_{пер}$, как показано на рис. 5. В этом случае процесс перехода также будет осуществлен максимально эффективно. Вариант 2 удовлетворяет требованиям к гибриднему алгоритму модуляции.

Вариант 3. Изменяются два состояния проводимости.

При третьем варианте перехода в двух фазах меняются состояния проводимости в момент переключения $t_{пер}$, как показано на рис. 6. Вариант 3 не удовлетворяет требованиям к гибриднему алгоритму модуляции.

Для уменьшения числа переключений до одного следует дожидаться следующего полупериода квантования, на котором вновь выполнить проверку на возможность перехода. Как показано на рис. 7, на следующем полупериоде ПВШИМ вариант 3 с двумя переключениями состояний становится вариантом 2 с одним переключением, удовлетворяющим требованиям к гибриднему алгоритму модуляции.

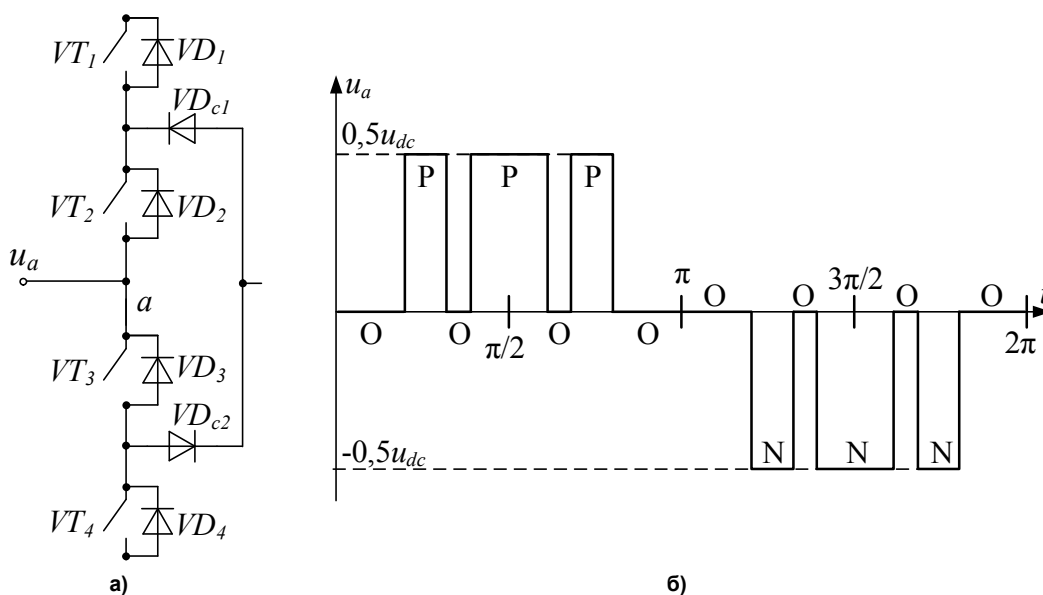


Рис. 3. Фазная стойка (а) и выходное напряжение преобразователя (б)



Рис. 4. Переход от ШИМ с УВГ к ПВШИМ при Варианте 1

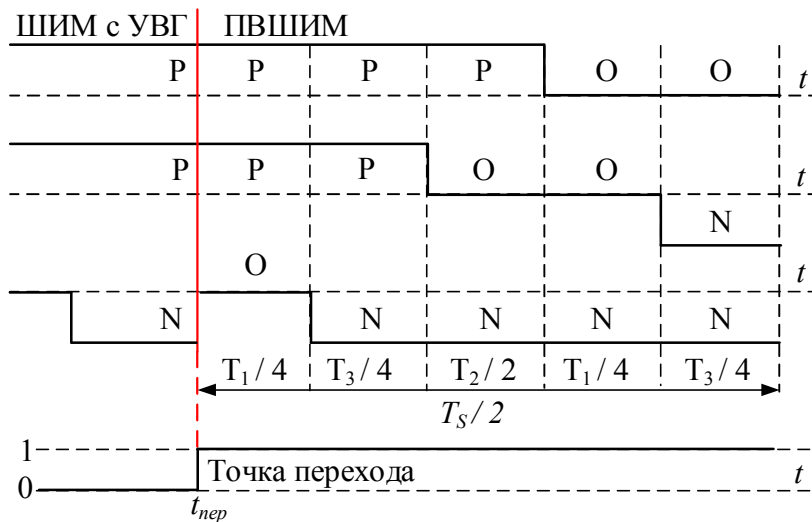


Рис. 5. Переход от ШИМ с УВГ к ПВШИМ при Варианте 2

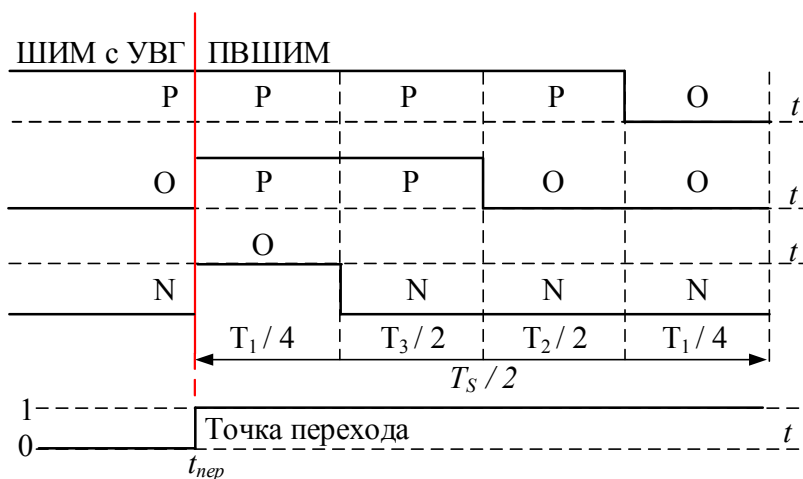


Рис. 6. Переход от ШИМ с УВГ к ПВШИМ при Варианте 3

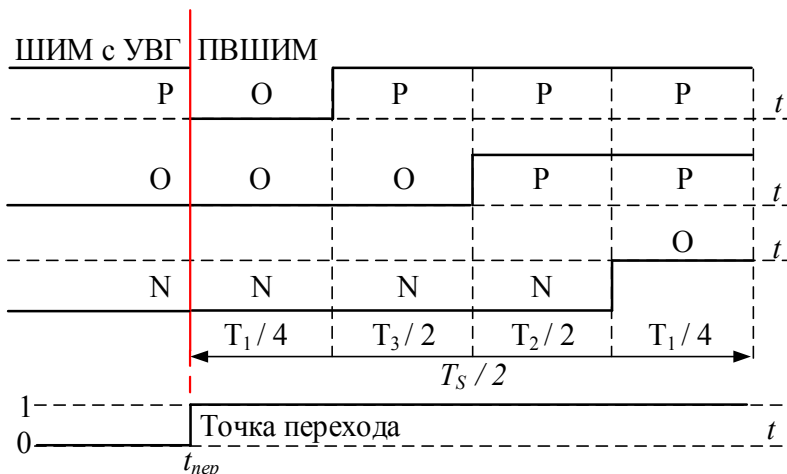


Рис. 7. Переход от ШИМ с УВГ к ПВШИМ при Варианте 2

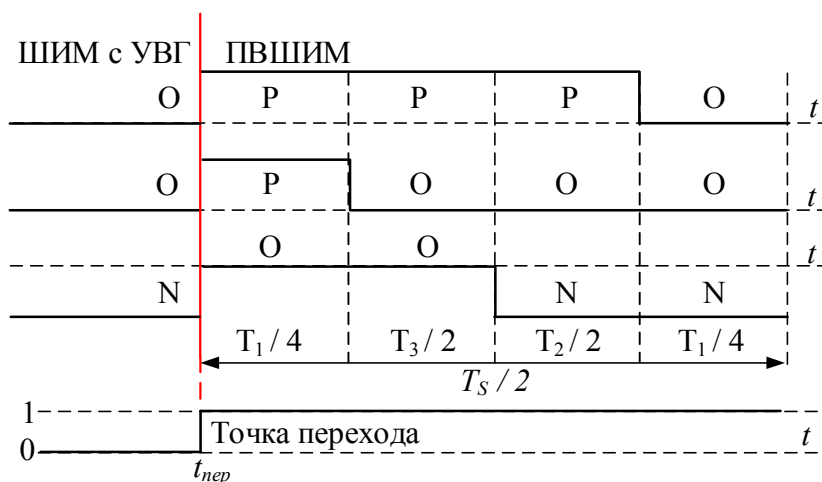


Рис. 8. Переход от ШИМ с УВГ к ПВШИМ при Варианте 4

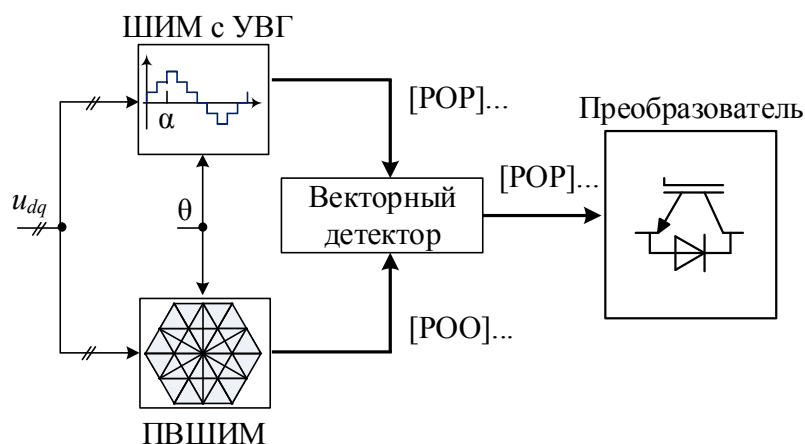


Рис. 9. Функциональная схема гибридного алгоритма ШИМ

Вариант 4. Изменяются три состояния проводимости.

При четвертом варианте перехода все три фазы меняют состояния проводимости в момент переключения $t_{пер}$, как показано на рис. 8. Вариант 4 не удовлетворяет требованиям к гибричному алгоритму модуляции.

Как и в предыдущем случае, следует дождаться следующего полупериода квантования, на котором вновь выполнить проверку на возможность перехода. Все вышеизложенные варианты справедливы для перехода от ПВШИМ к ШИМ с УВГ и обратно. Функциональная схема гибридного алгоритма модуляции представлена на рис. 9.

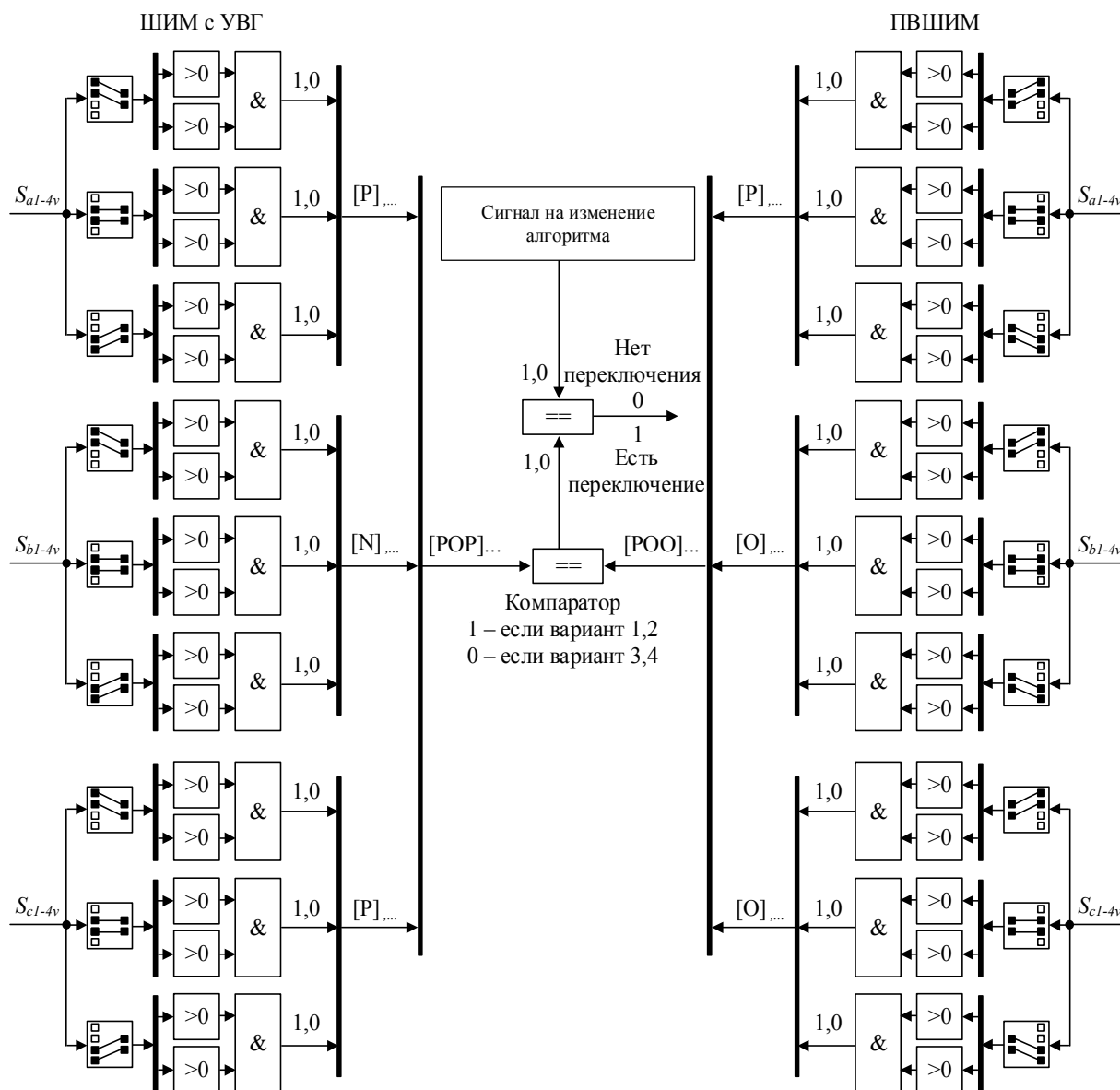


Рис. 10. Функциональная схема векторного детектора

Блок определения момента перехода на функциональной схеме представлен как «векторный детектор» (рис. 10), осуществляющий слежение за состояниями проводимости [P], [O] и [N] у ПВШИМ и ШИМ с УВГ, а в момент появления разрешающего сигнала осуществляет смену алгоритмов, если все условия работы гибридного алгоритма выполняются.

Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены на рис. 11. Сигнал на переход от ПВШИМ к ШИМ с УВГ поступает в момент времени $t = 0,349$ с, где можно видеть, что последним состоянием ПВШИМ является [OON], а алгоритм ШИМ с УВГ имеет состояния [PPO]. Данный случай соответствует Варианту 4 и не обеспечивает переход между алгоритмами без дополнительных переключений.

Переход становится возможным на следующем полуинтервале периода квантования ПВШИМ. В момент времени $t = 0,35$ с последним состоянием ПВШИМ является [OON], что соответствует Варианту 1 и смена алгоритмов выполняется.

Заключение

В работе предложен гибридный алгоритм модуляции, который позволит снизить потери, возникающие при переключении вентилей при ПВШИМ за счет снижения числа этих переключений при ШИМ с УВГ. Были рассмотрены варианты перехода для трёхуровневого преобразователя и сформулированы требования для реализации гибридного алгоритма модуляции. Результаты моделирования демонстрируют выполнение требований к минимизации числа переключений полупроводниковых модулей преобразователя. Практиче-

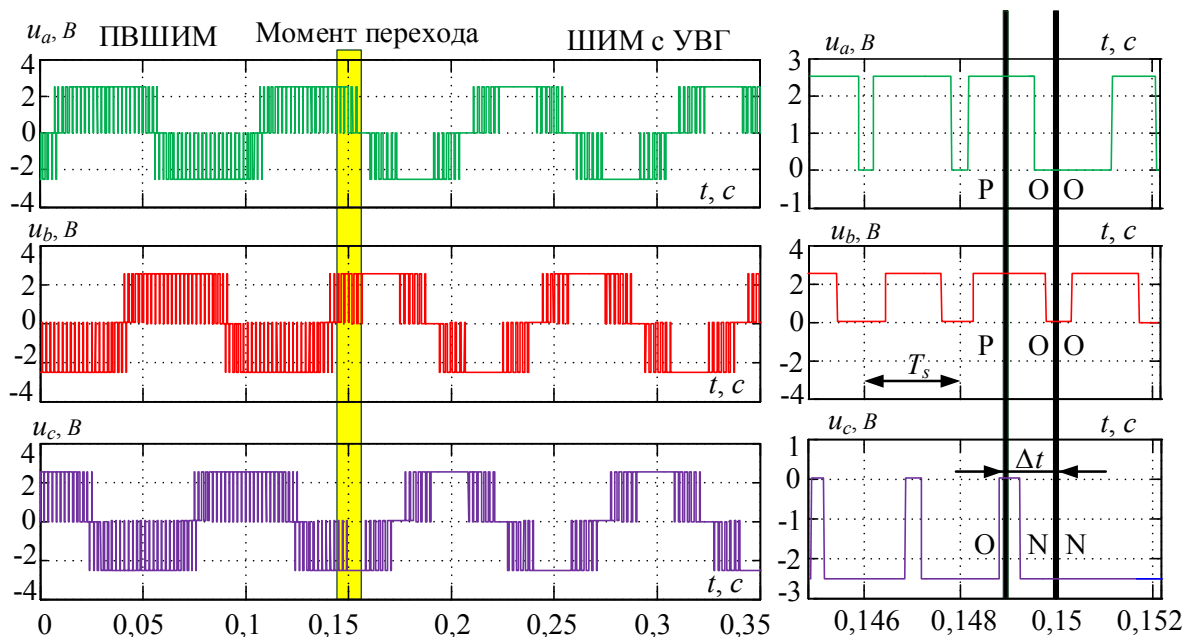


Рис. 11. Переход от алгоритма ПВШИМ к ШИМ с УВГ при Варианте 2

ское использование предложенного гибридного алгоритма модуляции позволит повысить КПД и улучшить показатели качества преобразованной электроэнергии. Наибольшую эффективность предложенный гибридный способ модуляции покажет в области больших мощностей, где применяются высоковольтные трёхуровневые преобразователи.

Литература

1. Rodriguez, J. Multilevel inverter: a survey of topologies, controls, and applications / J. Rodriguez, J. Lai, F. Peng // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2002. – Vol. 49, iss. 4. – P. 724–738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
2. Храмин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 48–52.
3. Пьей Пью Тун. Совершенствование импульсных преобразователей в составе автономных систем электропитания электротехнических комплексов: дис. ... канд. техн. наук / Пьей Пью Тун. – СПб., 2014. – 188 с.
4. Радионов, А.А. Трёхуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2015. – № 6 (542). – С. 80–87. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-6-80-87
5. Jose, I.L. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-

source inverters in the past, present, and future power electronics / J.I. Leon, S. Kouro, L.G. Franquelo, J. Rodriguez, B. Wu. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2016. – Вып. 63, № 5. – С. 2688–2701. DOI: 10.1109/TIE.2016.2519321

6. Wu, B. High-power converters and AC drives / Bin Wu. – Wiley-IEEE Press, 2006. – 333 с. DOI: 10.1002/9780471773719.about

7. Храмин, Т.Р. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Вып. 1, № 1. – С. 3–7.

8. Melício, R. Comparative study of power converter topologies and control strategies for the harmonic performance of variable-speed wind turbine generator systems / R. Melício, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão // *Energy*. – 2011. – № 36. – С. 520–529. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.012

9. Храмин, Т.Р. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 4. – С. 7–13.

10. Храмин, Т.Р. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 3–9.

11. Храмин, Т.Р. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМа / Т.Р. Храмин, И.Р. Абдулвелев, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 38–46.

12. Маклаков, А.С. Энергоэффективное управ-

ление двунаправленным преобразователем частоты в составе электропривода ветрогенератора / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 21–26.

13. Маклаков, А.С. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 30–37.

14. Маклаков, А.С. Влияние на сеть трёхфаз-

ного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 40–47.

15. Маклаков, А.С. Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2016. – Т. 4, № 1. – С. 66–73.

Маклаков Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; alexandr.maklakov.ru@ieee.org.

Поступила в редакцию 17 марта 2018 г.

DOI: 10.14529/power180112

HYBRID MODULATION BASED ON SHEPWM AND SVPWM

A.S. Maklakov, alexandr.maklakov.ru@ieee.org

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

A hybrid modulation algorithm based on the space-vector PWM and selective harmonic elimination PWM is proposed in the article. This algorithm will reduce the losses in the power converter that occur at space-vector PWM switching by reducing the number of these switching at selective harmonic elimination PWM. The main requirements for the hybrid algorithm were formulated. The paper was focused on the consideration of possible variants of changing the algorithms of the space-vector PWM and selective harmonic elimination PWM depending on the states of the semiconductor switches in the power converter circuit. Four possible variants were identified for a three-level converter, two of which satisfy the requirements of the hybrid algorithm. The results of simulation in the Matlab/Simulink program show minimization in the number of switching semiconductor modules of the power converter. The practical use of the proposed hybrid modulation algorithm has able to increase the efficiency and improve the quality of converted energy. The proposed hybrid method of modulation will be most effective in the high power application, where medium voltage three-level converters are used.

Keywords: power electronics, pulse-width modulation, power converters, hybrid modulation, selective harmonic elimination, space vector.

References

- Rodriguez J., Lai J., Peng F. Multilevel Inverter: Survey of Topologies, Controls, and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49 (4), pp. 724–738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
- Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. [Evaluation of Methods PWM Voltage Active Rectifiers Rolling Mills]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 48–52. (in Russ.)
- P'ey P'o Tun. *Sovershenstvovanie impul'snykh preobrazovateley v sostave avtonomnykh sistem elektropitaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving of Switching Converters in Autonomous Power Electrical Systems: Cand. Sci. Diss.]. St. Petersburg, 2014. 188 p.
- Radionov A.A., Maklakov A.S. [Three Level Back to Back Converters as Part of Medium Voltage AC Drives: Contemporary Condition and Control Methods]. *Russian Electromechanics*, 2015, no. 6, pp. 80–87. (in Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2015-6-80-87
- Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 2688–2701. DOI: 10.1109/TIE.2016.2519321
- Wu B. *High-Power Converters and AC Drives*. Wiley-IEEE Press, 2006. 333 p. DOI: 10.1002/9780471773719.about

7. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7. (in Russ.)
8. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Comparative Study of Power Converter Topologies and Control Strategies for the Harmonic Performance of Variable-Speed Wind Turbine Generator Systems. *Energy*, 2011, no. 36, pp. 520–529. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.012
9. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Methods PWM of Large Power Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 7–13. (in Russ.)
10. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical Model of the Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9. (in Russ.)
11. Khramshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. [Mathematical Model of the Power Circuit of STATCOM of Large Capacity]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 18–46. (in Russ.)
12. Maklakov A.S., Radionov A.A. [Energy-Efficient Control of Active Converters in Wind Generator Electric Drive Systems]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 21–26. (in Russ.)
13. Maklakov A.S., Radionov A.A. [Study of SVPWM with Various Vector Selection Tables of Three Level Converter]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30–37. (in Russ.)
14. Maklakov A.S., Radionov A.A. [Influence of AFE Rectifier with Different Types of PWM on Supply Power]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 40–47. (in Russ.)
15. Maklakov A.S., Maklakova E.A. [EMC Analysis of 18-pulse Connection Circuit Based on 3L-AFE with SHEPWM]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 66–73. (in Russ.)

Received 17 March 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Маклаков, А.С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник / А.С. Маклаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 92–100. DOI: 10.14529/power180112

FOR CITATION

Maklakov A.S. Hybrid Modulation Based on SHEPWM and SVPWM. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 92–100. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180112