

Синхронизация и симметрирование базовых напряжений силовых электронных преобразователей трансформаторного типа в зоне сверхмодуляции инверторов напряжения

В. И. Олещук

*Институт энергетики Технического университета Молдовы,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова
e-mail: oleschukv@hotmail.com*

Поступила в редакцию 29.05.2025

После доработки 04.06.2025

Принята к публикации 09.06.2025

В данной статье рассмотрены особенности синхронного регулирования инверторных блоков двух топологий фотопреобразовательных установок трансформаторного типа на базе двух и трех трехфазных инверторов напряжения, работающих в специфической зоне сверхмодуляции инверторов, характеризующейся повышенными, близкими к максимальным значениям, индексами модуляции инверторов. Показано, что, в случае двухдиапазонной стратегии управления инверторами в режиме сверхмодуляции, модифицированные алгоритмы синхронной векторной модуляции, включающие использование специализированных корректирующих коэффициентов для каждого поддиапазона зоны сверхмодуляции, позволяют обеспечить непрерывную синхронизацию и симметрию базовых форм напряжения на инверторных обмотках силового трансформатора фотопреобразовательных систем на протяжении всей зоны сверхмодуляции инверторов. Результаты моделирования процессов в системах подтверждают факт отсутствия в спектрах базовых напряжений анализируемых фотопреобразовательных устройств гармонических составляющих четного порядка и субгармоник (основной частоты фотопреобразовательных станций) на всем диапазоне двухэтапного регулирования инверторов в зоне сверхмодуляции. Подобное улучшение гармонического состава базовых напряжений приводит к снижению потерь и повышению эффективности функционирования фотопреобразовательных установок на базе инверторов с синхронной модуляцией, что особенно важно для систем повышенной мощности, характеризующихся относительно низкой частотой коммутации вентилей инверторных блоков.

Ключевые слова: трехфазный инвертор напряжения, синхронная широтно-импульсная модуляция, фотопреобразовательная установка, многообмоточный силовой трансформатор, гармонический состав напряжения

УДК 621.314.572

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.3.61>

ВВЕДЕНИЕ

Устройства силовоточной силовой электроники находят все более широкое применение как в энергетических системах, так и в различных областях промышленности и транспорта, а также в системах возобновляемой электроэнергетики [1].

В частности, одной из наиболее важных областей использования силовых электронных преобразовательных систем являются регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока на базе электронных преобразователей параметров электрической энергии – конверторов, выпрямителей, а также инверторов [2–16], в том числе системы электропривода переменного тока для электрического транспорта [3, 8, 10, 11, 15].

В связи с быстрым развитием систем возобновляемой энергетики важным направлением

широкого использования электронных преобразовательных систем являются также фотопреобразовательные станции и системы [17–19]. При этом автономные инверторы напряжения являются одними из базовых элементов фотопреобразовательных систем, обеспечивая преобразование низковольтного постоянного напряжения фотопреобразовательных панелей в переменное напряжение требуемой амплитуды и частоты [20–28].

Эффективность функционирования фотопреобразовательных систем инверторного типа оказывается в большой зависимости от методов и способов управления и широтно-импульсной модуляции (ШИМ), используемых для регулирования инверторов соответствующих устройств. При этом известно, что значительная часть диапазона регулирования инверторов напряжения с ШИМ находится в специфической зоне сверхмо-

дуляции инверторов, характеризующейся повышенными, близкими к максимальным значениями коэффициента модуляции инверторов [2]. Результаты исследования режимов работы преобразовательных систем на базе инверторов напряжения с ШИМ, работающих в зоне сверхмодуляции, приведены в [29–36], включая анализ функционирования в этой зоне инверторов фотопреобразовательных систем трансформаторного и бестрансформаторного типа [29, 32, 34, 35].

В данной публикации приводится краткий обзор результатов исследования методов и способов управления и модуляции инверторов фотопреобразовательных систем трансформаторного типа, регулируемых в зоне сверхмодуляции на базе алгоритмов синхронной двухступенчатой ШИМ, которые обеспечивают на всем диапазоне управления в зоне сверхмодуляции непрерывную синхронизацию и симметрию базовых форм напряжения в фотопреобразовательных системах с улучшенным гармоническим составом напряжения на обмотках силового трансформатора.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ С СИНХРОННОЙ ШИМ В ЗОНЕ СВЕРХМОДУЛЯЦИИ

На рис. 1 представлена упрощенная структура трехфазного двухуровневого инвертора, содержащая шесть управляемых силовых ключей (тириستоров или силовых транзисторов). Также на рис. 1 представлены пространственные векторы выходного напряжения устройства на периоде выходной частоты (шесть векторов активного (переключающего) состояния ключей инвертора 1–6 и два вектора непроводящего состояния ключей 0 и 7) [16].

На рис. 2 на верхней диаграмме представлена последовательность коммутационных состояний (switching sequence) и сопутствующие сигналы управления трехфазного инвертора напряжения, а также приведены на четверти периода выходной частоты соответствующие фазные (*Phase a*, *Phase b*, *Phase c*) и линейное (*V_{ab}*) напряжения инвертора, регулируемого согласно с алгоритмами прерывистой синхронной модуляции. Также на рис. 2 использованы стандартные условные обозначения для коммутационных состояний (2, 3, 4) вентиля инвертора применительно к фазам *abc* инвертора (см. рис. 1): 2 – 110; 3 – 010; 4 – 011 («1» – включенное состояние вентиля инвертора, «0» – выключенное состояние вентиля).

Для фотопреобразовательных систем на базе трехфазных инверторов напряжения процесс регулирования выходного напряжения в зоне повышенных значений индекса (коэффициента) модуляции инверторов m , когда $1 \geq m > 0,907$ (что соответствует функционированию инверторов в зоне сверхмодуляции (overmodulation)), характеризуется специфическими свойствами [2, 34]. При этом в случае стандартного двухэтапного регулирования инверторов в зоне сверхмодуляции два граничных значения индекса модуляции инверторов m_{ov1} и m_{ov2} равны соответственно $m_{ov1} = 0,907$ и $m_{ov2} = 0,952$, и в этом случае максимальное значение коэффициента модуляции составляет $m_{\max} = 1$. Базовые функциональные зависимости (1)–(7) для определения текущего значения сигналов управления трехфазных инверторов с синхронной ШИМ векторного типа включают два специализированных коэффициента (индекса) сверхмодуляции $K_{ov1} = [1 - (m - m_{ov1}) / (m_{ov2} - m_{ov1})]$ и $K_{ov2} = [1 - (m - m_{ov2}) / (1 - m_{ov2})]$ [34].

В частности, при $0,952 \geq m > 0,907$:

$$\beta_1 = \tau, \quad (1)$$

$$\beta_j = \beta_1 \cos[(j-1)\tau K_{ov1}], \quad (2)$$

$$\gamma_j = \beta_{n-j+1} \{0,75 - 0,55 \tan[(n-j)\tau]\}, \quad (3)$$

$$\lambda_j = \tau - (\beta_j + \beta_{j+1}) / 2. \quad (4)$$

При $1 > m > 0,952$:

$$\beta_1 = \tau, \quad (5)$$

$$\beta_j = \beta_1 \cos[(j-1)\tau K_{ov2}], \quad (6)$$

$$\gamma_j = \beta_{n-j+1} \{0,75 - 0,55 \tan[(n-j)\tau]\} K_{ov2}, \quad (7)$$

где m – индекс модуляции трехфазного инвертора; $\beta_1 \div \beta_j$ – суммарная продолжительность активного (включенного) состояния вентиля инвертора на протяжении тактового подинтервала τ , γ_j – меньшая часть суммарной продолжительности активного состояния вентиля инвертора; λ_j – длительность выключенного (нулевого) состояния вентиля инвертора.

СИНХРОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ДВУХ ШИМ-ИНВЕРТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ЗОНЕ СВЕРХМОДУЛЯЦИИ

На рис. 3 представлена структура фотопреобразовательной системы трансформаторного типа на базе двух инверторов напряжения (VSI1 и

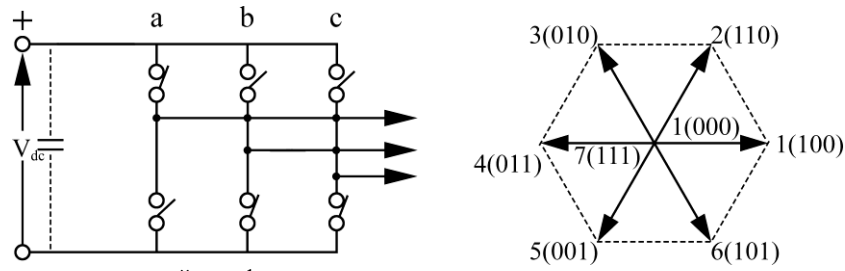


Рис. 1. Схема основных силовых цепей трехфазного инвертора напряжения и его пространственные векторы напряжения на периоде выходной частоты.

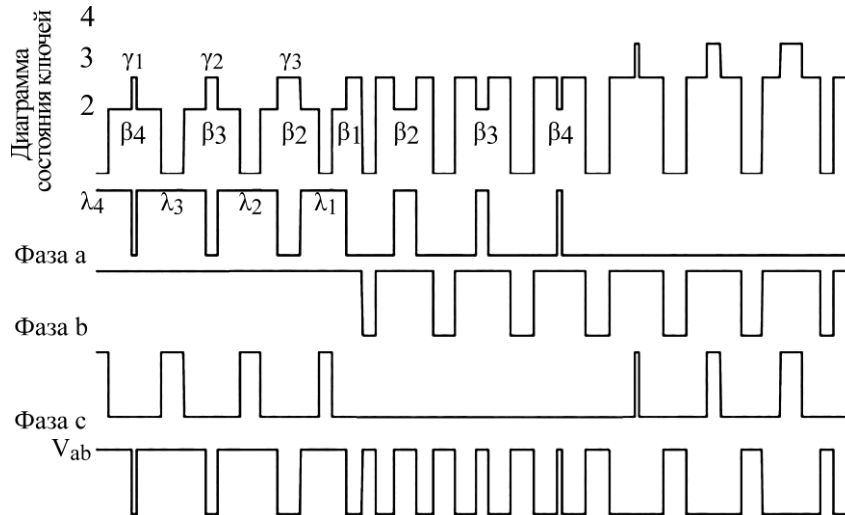


Рис. 2. Сигналы управления и соответствующие фазные (*Phase a*, *Phase b*, *Phase c*) и линейное (V_{ab}) напряжения трехфазного инвертора, регулируемого на базе алгоритмов прерывистой синхронной модуляции.

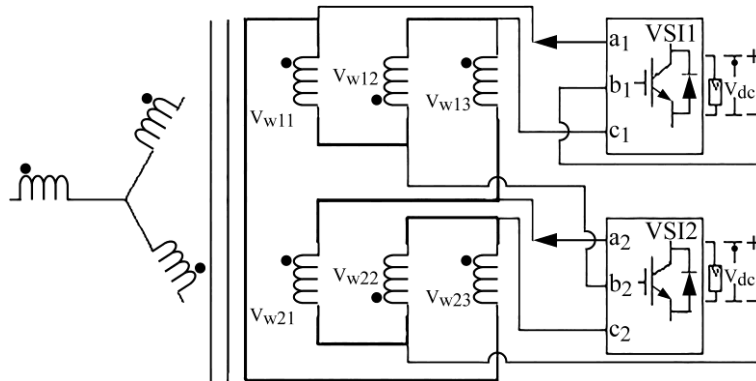


Рис. 3. Структура фотопреобразовательной установки трансформаторного типа на базе двух инверторов с ШИМ.

VSI2), регулируемых на базе алгоритмов синхронной векторной ШИМ, описанных в предыдущей части [34]. Данная топология системы характеризуется специфической схемой соединения инверторных обмоток трансформатора, показанных на рис. 3 жирными линиями.

На рис. 4, 5 представлены диаграммы, иллюстрирующие функционирование фотопреобразовательной системы с двумя инверторами с непрерывной синхронной ШИМ (рис. 4) и с прерывистой синхронной ШИМ (рис. 5) на первом поддиапазоне зоны сверхмодуляции инверторов, когда $0,952 \geq m > 0,907$. Таким образом, на рис. 4, 5 показаны полярные напряжения двух инверторов V_{a1} , V_{b1} , V_{a2} , V_{b2} , линейное напряжение V_{ab1} , напряжение на инверторных обмотках трансформатора V_{w11} , а

также соответствующий спектральный состав напряжения V_{w11} .

На рис. 6, 7 представлены аналогичные диаграммы, иллюстрирующие работу преобразовательной системы на втором поддиапазоне зоны сверхмодуляции инверторов, когда $1 > m > 0,952$. При этом рабочая частота системы равна 50 Гц, а усредненная частота переключения вентилей инверторов равна 1100 Гц для всех проанализированных режимов работы.

Представленные на рис. 4–7 диаграммы и спектрограммы подтверждают тот факт, что базовые формы напряжения анализируемой фотопреобразовательной системы характеризуются четвертьволновой симметрией, благодаря чему в спектрах указанных напряжений на всем диапазоне регулирования инверторов отсут-

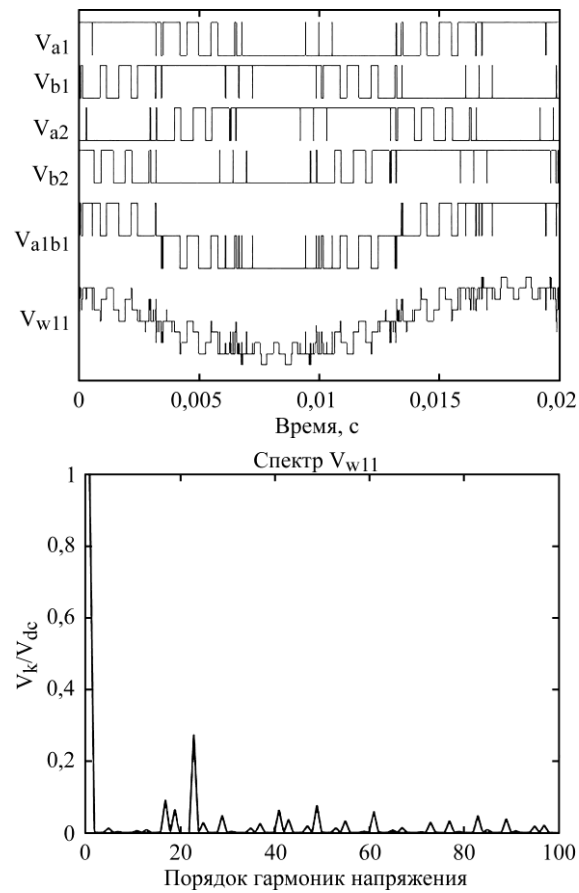


Рис. 4. Полярные и линейные напряжения инверторов с непрерывной синхронной ШИМ, напряжение на инверторных обмотках трансформатора V_{w11} и его спектральный состав в первой части зоны сверхмодуляции инверторов ($m = 0,94$).

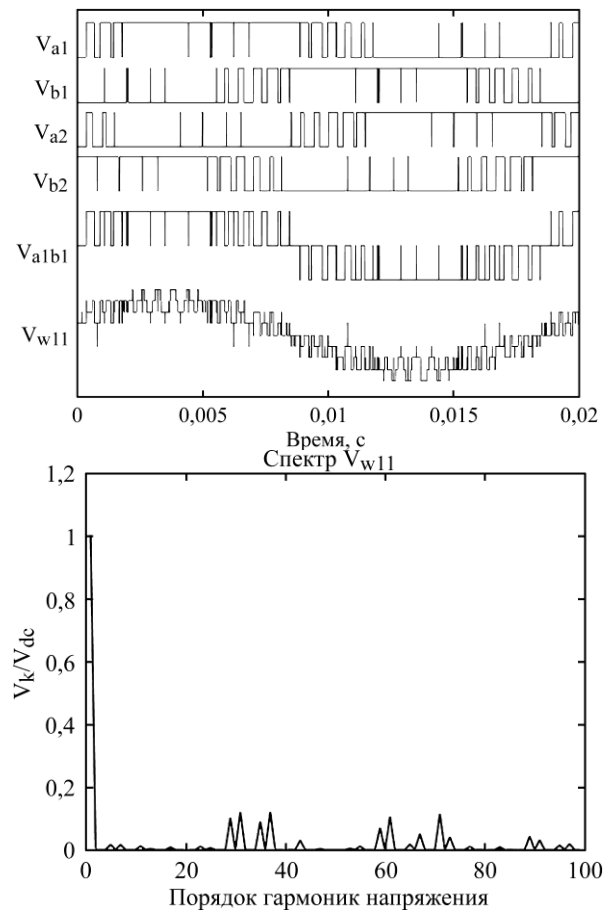


Рис. 5. Полярные и линейные напряжения инверторов с прерывистой синхронной ШИМ, напряжение на инверторных обмотках трансформатора V_{w11} и его спектральный состав в первой части зоны сверхмодуляции инверторов ($m = 0,94$).

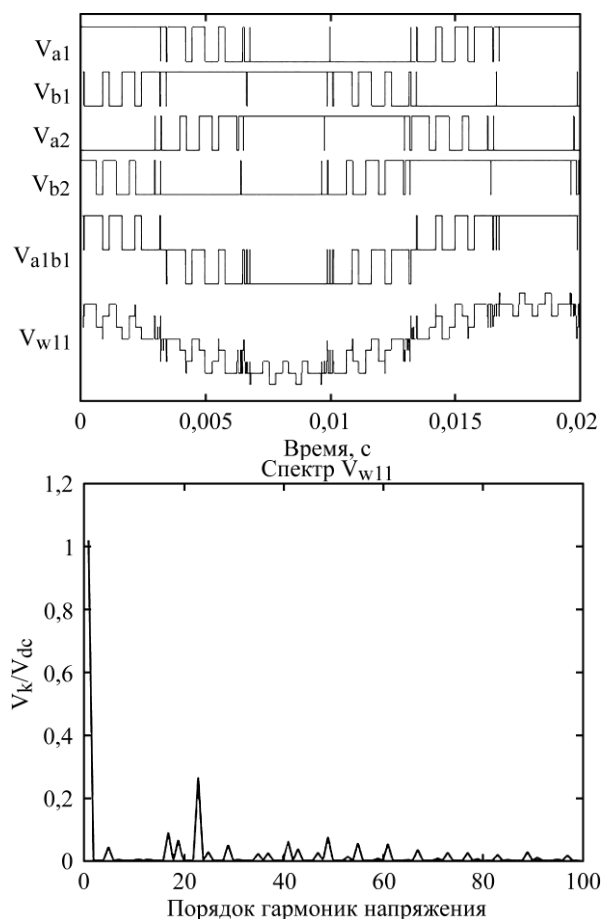


Рис. 6. Полярные и линейные напряжения инверторов с непрерывной синхронной ШИМ, напряжение на инверторных обмотках трансформатора V_{w11} и его спектральный состав во второй части зоны сверхмодуляции инверторов ($m = 0,975$).

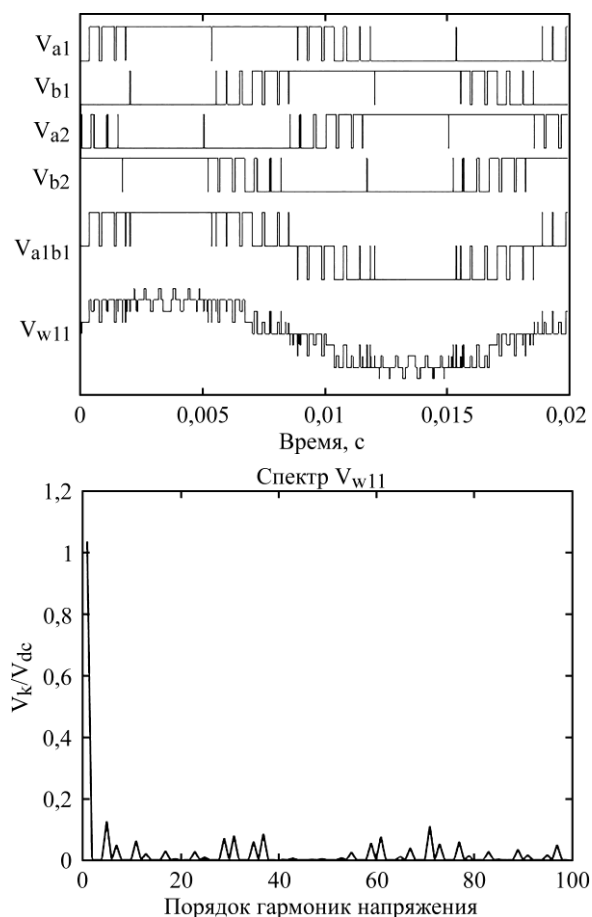


Рис. 7. Полярные и линейные напряжения инверторов с прерывистой синхронной ШИМ, напряжение на инверторных обмотках трансформатора V_{w11} и его спектральный состав во второй части зоны сверхмодуляции инверторов ($m = 0,975$).

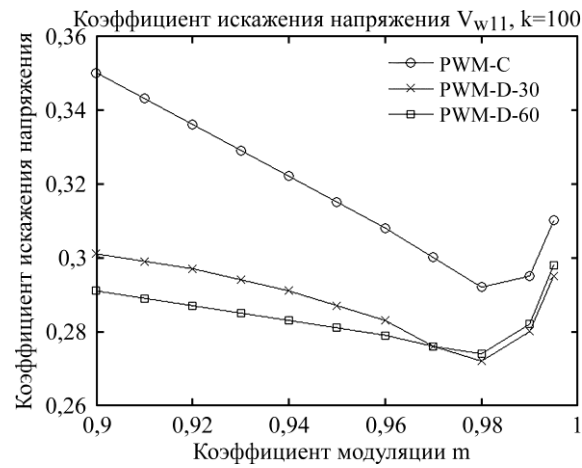


Рис. 8. Коэффициент искажения напряжения V_{w11} в системе с двумя инверторами, работающими в зоне сверхмодуляции.

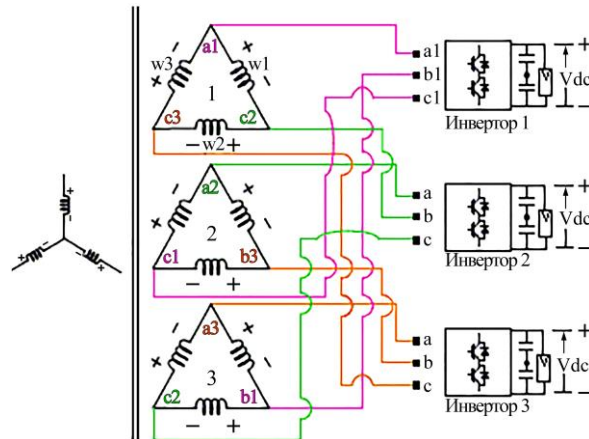


Рис. 9. Структура фотопреобразовательной системы трансформаторного типа на базе трех инверторов с ШИМ.

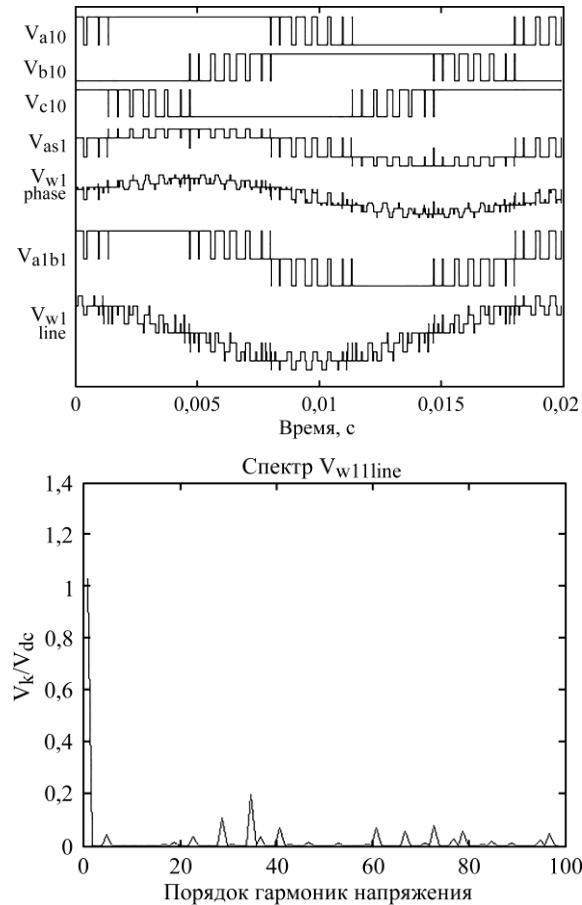


Рис. 10. Полярные и линейные напряжения инверторов с прерывистой синхронной ШИМ, напряжение на инверторных обмотках трансформатора $V_{w11line}$ и его спектральный состав в первой части зоны сверхмодуляции инверторов ($m = 0,95$).

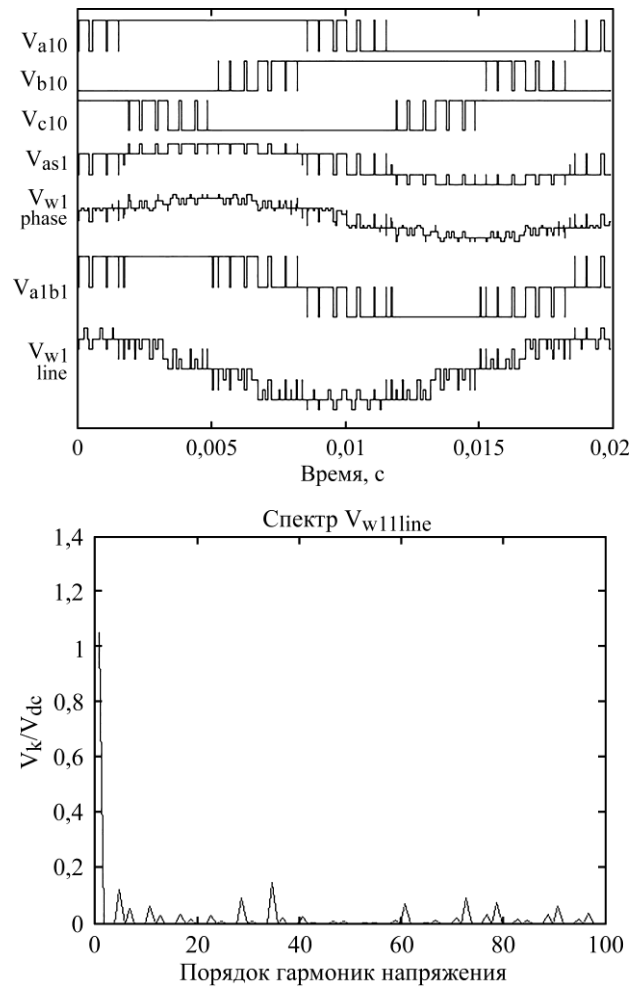


Рис. 11. Полярные и линейные напряжения инверторов с прерывистой синхронной ШИМ, напряжение на инверторных обмотках трансформатора V_{w1line} и его спектральный состав во второй части зоны сверхмодуляции инверторов ($m = 0,975$).

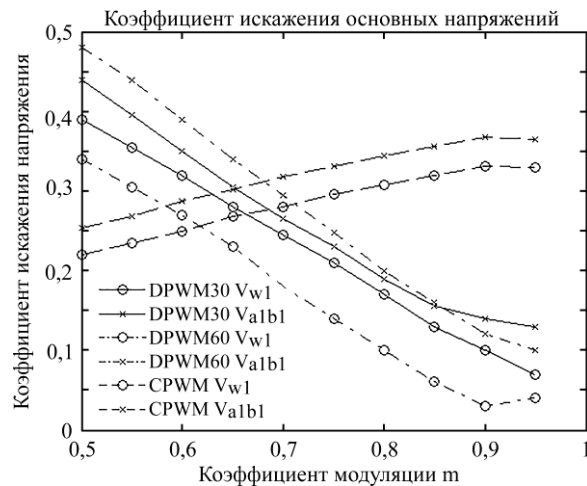


Рис. 12. Коэффициент искажения (THD) основных напряжений в системе на базе трех инверторов с синхронной ШИМ.

ствуют четные гармоники и субгармоники (основной частоты).

На рис. 8 представлены результаты определения коэффициента искажения напряжения ($Total Harmonic Distortion - THD$) на обмотках трансформатора V_{w1} в функции коэффициента модуляции инверторов m

($THD = (1/V_{w1_1}) \cdot \sqrt{\sum_{k=2}^{100} V_{w1_k}^2}$) в фотопреобразовательной системе на базе двух инверторов с

алгоритмами непрерывной (PWM-C) и двумя разновидностями прерывистой (PWM-D-30 и PWM-D-60) синхронной векторной модуляции [34]. Частота переключения вентиля инверторов в данном случае принята равной 1100 Гц. Таким образом, представленные на рис. 8 результаты расчета коэффициента напряжения на обмотках трансформатора подтверждают тот факт, что при работе инверторов в зоне сверхмодуляции улучшенные спектральные характеристики

базового напряжения в системе достигаются при использовании алгоритмов прерывистой синхронной модуляции.

СИНХРОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ТРЕХ ШИМ-ИНВЕРТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ЗОНЕ СВЕРХМОДУЛЯЦИИ

На рис. 9 представлена топология трехинверторной фотопреобразовательной системы трансформаторного типа, характеризующаяся специфическим соединением инверторных обмоток силового трансформатора по схеме треугольника [22].

Фазовые напряжения V_{as1} , V_{bs1} и V_{cs1} первого трехфазного инвертора системы (Inverter 1 на рис. 9) определяются в соответствии с (8)–(10) [22]:

$$V_{as1} = V_{a10} + (V_{a10} + V_{b10} + V_{c10})/3, \quad (8)$$

$$V_{bs1} = V_{b10} + (V_{a10} + V_{b10} + V_{c10})/3, \quad (9)$$

$$V_{cs1} = V_{c10} + (V_{a10} + V_{b10} + V_{c10})/3, \quad (10)$$

где V_{a10} , V_{b10} и V_{c10} – соответствующие фазные напряжения первого инвертора системы.

Напряжения на инверторных обмотках силового трансформатора (V_{w1} , V_{w2} , V_{w3} на рис. 9) определяются в функции соответствующих фазовых напряжений трех инверторов системы в соответствии с (11)–(13) [22].

$$V_{w1} = 0,667V_{as1} - 0,333V_{bs2} - 0,333V_{cs3}, \quad (11)$$

$$V_{w2} = -0,333V_{as1} + 0,667V_{bs2} - 0,333V_{cs3}, \quad (12)$$

$$V_{w3} = -0,333V_{as1} - 0,333V_{bs2} + 0,667V_{cs3}. \quad (13)$$

Сигналы управления инверторов, определяемые согласно (1)–(7), и, соответственно, кривые выходного напряжения трех инверторов анализируемой системы сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов. Также в данной схеме управления инверторами обеспечивается дополнительный фазовый сдвиг между сигналами инверторов, равный одной трети длительности тактового подинтервала.

На рис. 10, 11 представлены диаграммы, иллюстрирующие работу фотопреобразовательной системы на базе трех инверторов с прерывистой синхронной ШИМ на первом поддиапазоне зоны сверхмодуляции инверторов (рис. 10), а также на втором поддиапазоне зоны сверхмодуляции трех инверторов (рис. 11). При этом фундаментальная частота системы равна 50 Гц, а частота переключений вентилей инверторов – 1,13 кГц.

На рис. 12 представлены результаты определения коэффициента искажения напряжения (*Total Harmonic Distortion* –

$$THD = (1/V_{w1line_1}) \cdot \sqrt{\sum_{k=2}^{40} V_{w1line_k}^2} \quad \text{основных}$$

форм напряжения (V_{w11} и V_{a1b1}) в функции коэф-

фициента модуляции инверторов m в фотопреобразовательной системе на базе трех инверторов с тремя разновидностями алгоритмов синхронной ШИМ (SPWM – непрерывная синхронная ШИМ, DPWM30 и DPWM60 – две версии прерывистой синхронной ШИМ) [22]. Частота переключения вентилей инверторов в данном случае принята равной 1400 Гц. Таким образом, представленные на рис. 12 результаты расчета коэффициента искажения напряжения на обмотках трансформатора подтверждают тот факт, что при работе инверторов в зоне повышенных значений коэффициента модуляции инверторов при $m > 0,65$, в том числе в зоне сверхмодуляции инверторов, улучшенные спектральные характеристики вышеупомянутого базового напряжения в системе достигаются при использовании для регулирования инверторов алгоритмов прерывистой синхронной модуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ процессов синхронного управления и регулирования инверторами напряжения фотопреобразовательных систем с многообмоточным силовым трансформатором, связанным с электрической сетью, при режимах управления, характеризующихся повышенными значениями коэффициента модуляции инверторов (при режимах сверхмодуляции инверторов). Для обеспечения синхронизации и симметрирования напряжения на инверторных обмотках трансформатора выполнена модификация базовых алгоритмов векторной модуляции инверторов за счет включения в схему управления специализированных корректирующих коэффициентов при регулировании в каждом из двух поддиапазонов зоны сверхмодуляции инверторов.

Представленные на рис. 4–7, 10, 11 спектрограммы главных напряжений в фотопреобразовательных системах на базе двух и трех инверторов с модифицированными алгоритмами синхронной ШИМ подтверждают отсутствие в спектре напряжения на обмотках силового трансформатора четных гармоник и субгармоник при двухступенчатом регулировании инверторов в зоне сверхмодуляции. Такое улучшение спектрального состава напряжения на инверторных обмотках силового трансформатора способствует снижению потерь в силовом трансформаторе и общему повышению эффективности функционирования фотопреобразовательных устройств трансформаторного типа повышенной установленной мощности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bose, B.K., Power electronics, smart grid, and renewable energy systems, *Proc. IEEE*, 2017, vol. 105, no. 11, p. 2011.
2. Holtz, J. and Qi, X., Optimal control of medium-voltage drives: An overview, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2013, vol. 60, no. 12, p. 5472.
3. Oleschuk, V., Ermuratskii, V. and Barrero, F., Modified algorithms of synchronized PWM for six-phase traction system with two DC sources, *Proc. IEEE Int. Conf. Vehicle Power and Propulsion (VPPC'2014)*, 2014, 6 p.
4. Dargahi, V., Sadigh, A., Abarzadeh, M., Eskandari, S., et al., A new family of modular multilevel converter based on modified flying-capacitor multicell converters, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2015, vol. 30, no. 1, p. 138.
5. Oleschuk, V., Ermuratskii, V. and Barrero, F., Combined PWM control of multi-inverter installation with two dc-links, *Proc. IEEE Int. Conf. on Electrical Drives and Power Electron. (EDPE'2015)*, 2015, p. 94.
6. Glose, D. and Kennel, R., Continuous space vector modulation for symmetrical six-phase drives, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, vol. 31, no. 5, p. 3837.
7. Levi, E., Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2016, vol. 63, no 1, p. 433.
8. Quraan, M., Yeo, T. and Tricoli, P., Design and control of modular multilevel converters for battery electric vehicles, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, vol. 31, no. 1, p. 507.
9. Oto, Y., Noguchi, T., Sasaya, T., Yamada, T., et al., Space vector modulation of dual-inverter system focusing on improvement of multilevel voltage waveforms, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2019, vol. 66, no. 12, p. 9139.
10. Oleschuk, V., Ermuratskii, V. and Pastor, M., Alternative methods of synchronous space-vector PWM for transport-oriented converters and drives, *Proc. IEEE Int. Conf. Electrical Drives and Power Electron. (EDPE'2019)*, 2019, p. 327.
11. Afonso, J.L., Cardoso, L.A.L., Pedrosa, D., Sousa, T.J.C., et al., A review on power electronics technologies for electric mobility, *Energies*, 2020, vol. 13, p. 6343.
12. Gonzalez-Prieto, A., Gonzalez-Prieto, I., Yepes, A.G., Duran, M.G., et al., Symmetrical six-phase induction machines: A solution for multiphase direct control strategies, *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technology (ICIT'2021)*, 2021, p. 1362.
13. Kihyang, Kim and Yongsoon, Park, PWM method to balance the loss distribution of dual inverter to drive open-end winding motor, *J. Power Electron.*, 2022, vol. 22, no. 5, p. 809.
14. Олещук, В., Синхронно регулируемые электронные преобразовательные устройства повышенной мощности на базе инверторов с отсекающими диодами, регулируемых с помощью широтно-импульсной модуляции, *ЭОМ*, 2023, № 5, с. 90.
15. Rodriguez, J., Blaabjerg, F. and Kazmierkowski, M.P., Energy transition technology: The role of power electronics, *Proc. IEEE*, 2023, no. 4, vol. 111, p. 329.
16. Олещук, В., Мощные электронные преобразовательные системы с нелинейным синхронным широтно-импульсным регулированием выходного напряжения, *ЭОМ*, 2024, № 4, с. 67.
17. Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A.A., et al., Solar energy: potential and future prospects, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, vol. 82, p. 894.
18. Mansouri, N., Lashab, A., Sera, D., Guerrero, J.M., et al., Large photovoltaic power plants integration: A review of challenges and solutions, *Energies*, 2019, vol. 12, art. ID 3798.
19. Maka, A.O.M. and Alabid, J.M., Solar energy technology and its roles in sustainable development, *Clean Energy*, 2022, vol. 6, no. 3, p. 476.
20. Oleschuk, V. and Ermuratskii, V., Dual-inverter-based photovoltaic system with discontinuous synchronized PWM, *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS'2014)*, 2014, p. 86.
21. Kumar, N., Saha, T.K. and Dey, J., Modeling, control and analysis of cascaded inverter based grid-connected photovoltaic system, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2016, vol. 78, p. 165.
22. Oleschuk, V., Cernat, M., Pastor, M. and Sanjeevikumar, P., Synchronous PWM control of triple transformer-connected inverters for photovoltaic system, *Proc. IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Motion Control (PEMC'2016)*, 2016, p. 216.
23. Jana, J., Saha, H. and Bhattacharya, D.K., A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017, vol. 72, p. 1256.
24. Dogga, R. and Pathak, M.K., Recent trends in solar PV inverter topologies, *Solar Energy*, 2019, vol. 183, p. 57.
25. Kolantla, D., Mikkili, S., Pendem, S.R. and Desai, A.A., Critical review on various inverter topologies for PV system architectures, *IET Renew. Power Gener.*, 2020, vol. 14, p. 3418.
26. Hao Xue and Jinwei He, A simplified power balance strategy for three-phase cascaded H-bridge photovoltaic inverter, *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'2022)*, 2022, 6 p.
27. Oleschuk, V., Flexible synchronous regulation of power electronic blocks of transformer-based photovoltaic stations, *J. Eng. Sci.*, 2024, vol. 31, no. 3, p. 54.

28. Tanguturi, J. and Keerthipati, S., Power balancing strategy for cascaded H-bridge inverter in a grid-connected photovoltaic system under asymmetrical operating conditions, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2024, vol. 71, no. 6, p. 5853.
29. Park, Y., Sul, S.-K. and Hong, K.-N., Linear overmodulation strategy for current control in photovoltaic inverter, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2016, vol. 52, no. 1, p. 322.
30. Guo, X., He, M. and Yang, Y., Over modulation strategy of power converters: A review, *IEEE Access*, 2018, vol. 6, art. ID 69528.
31. Stumpf, P. and Halasz, S., Optimization of PWM for the overmodulation region of two-level inverters, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2018, vol. 54, no. 4, p. 3393.
32. Li, L., Wang, H., Chen, X., Bukhari, A.A.S., et al., High efficiency solar power generation with improved discontinuous pulse width modulation (DPWM) overmodulation algorithms, *Energies*, 2019, vol. 12, p. 1765.
33. Paul, S. and Basu, K., A three-phase inverter based overmodulation strategy of asymmetrical six-phase induction machine, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2021, vol. 36, no. 5, p. 5802.
34. Oleschuk, V., Vasiliev, I. and Griva, G., Overmodulation operation of two-level PWM inverters of photovoltaic system with double-delta configuration of power transformer, *Proc. IEEE Int. Conf. Modern Power Systems (MPS'2021)*, 2021, 5 p.
35. Dannier, A., Guerriero, P. And Coppola, M., PV-BESS CHB operating in the overmodulation region, *Proc. IEEE Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM'2024)*, 2024, p. 407.
36. Paul, S. and Basu, K., Overmodulation techniques of asymmetrical six phase machine with minimum RMS

current ripple, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2024, vol. 39, no. 8, p. 10079.

Summary

This article discusses the features of the synchronous regulation of inverter blocks of two topologies of the transformer-based photovoltaic installations based on two and three three-phase voltage source inverters operating in a specific over-modulation zone characterized by increased, close to maximum values, modulation indices of inverters. It is shown that, in the case of a two-range inverter control strategy in the over-modulation mode, the modified algorithms of a synchronous pulse-width modulation, including the use of specialized correction coefficients for each sub-range of the over-modulation zone, allowed for the continuous synchronization and symmetry of the basic voltage waveforms on the inverter-side windings of the power transformer of photovoltaic systems throughout the entire inverter over-modulation zone. The results of modeling the processes in the systems confirm the fact of the absence of harmonic components of even-order and subharmonics (of the fundamental frequency of photovoltaic stations) in the spectra of the basic voltages of the analyzed photovoltaic installations over the entire range of two-stage regulation of inverters in the over-modulation zone. Such an improvement in the harmonic composition of the basic voltages leads to a decrease in losses and an increase in the efficiency of the functioning of photovoltaic installations based on inverters with synchronous modulation, which is especially important for high-power systems characterized by a relatively low switching frequency of the power switches of the inverters.

Keywords: three-phase voltage inverter, synchronous pulse-width modulation, photoconverter installation, multi-winding power transformer, harmonic composition of voltage