

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО КАСКАДНОГО ИНВЕРТОРА

Ю.В. Шевырев, До Тхань Лич

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

С увеличением количества уровней в инверторе усложняется схема, увеличивается количество полупроводниковых ключей. Поэтому представляют интерес топологии, которые позволяют получить увеличение уровней напряжения с уменьшением количества полупроводников, повысить производительность и надежность системы. Предложена схема гибридного каскадного инвертора, рассмотрен метод широтно-импульсной модуляции на основе несущей, приведена блок-схема алгоритма генерации опорных модулирующих сигналов в оптимизированном методе широтно-импульсной модуляции. Для управления гибридным инвертором в составе активного фильтра гармоник в работе предложен метод широтно-импульсной модуляции несущей, который позволяет уменьшить синфазное напряжение, коммутационные потери, минимизировать гармоники тока и напряжения. Приведено описание алгоритма ШИМ, на основе которого осуществляется модуляция управляющих сигналов и затем сравнение их с треугольной несущей для генерации последовательности импульсов, включающих или отключающих полупроводниковые ключи. Целью предложенных решений является улучшение гармонических искажений, вызванных нелинейной нагрузкой в низковольтной системе 0,4 кВ. Приведены результаты моделирования предложенной схемы активного фильтра гармоник. На основании выполненных исследований показано, что применение активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции является эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки, что позволяет решить задачу по устранению воздействия высших гармоник на производственную деятельность предприятия.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор, алгоритм оптимизации напряжения инвертора, синфазное напряжение, многоуровневый гибридный инвертор, широтно-импульсная модуляция.

Введение

В настоящее время перспективным средством повышения качества электроэнергии (КЭ) являются активные фильтры гармоник (АФГ), в которых применяются запираемые полупроводниковые приборы. При соответствующем законе управления осуществляется генерирование управляемых высших гармоник в противофазе с фактическими

гармониками полупроводниковых преобразователей, что позволяет получить практически синусоидальную форму напряжения сети.

На рис. 1 показана блок-схема базового активного фильтра гармоник, который подключен параллельно с системой шин низкого напряжения 0,4 кВ с целью фильтрации высших гармоник напряжения и тока, вызванных нелинейной нагрузкой.

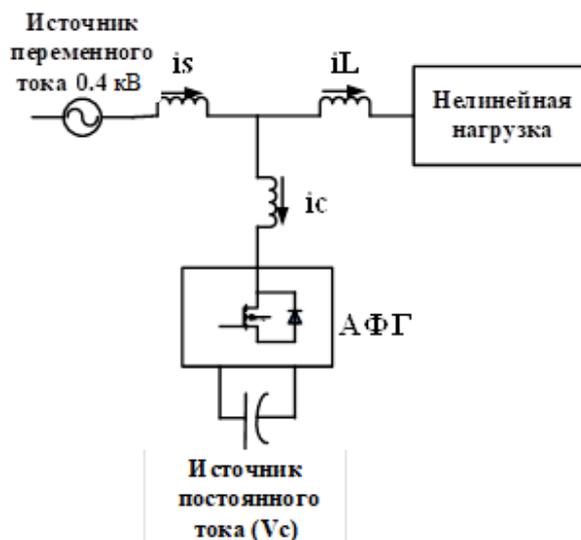


Рис. 1. Блок-схема базового активного фильтра гармоник

В данной статье предложена схема активного фильтра гармоник на основе гибридной топологии многоуровневых инверторов, позволяющая обеспечить нормативные показатели качества электроэнергии в системе электроснабжения при наличии нелинейной нагрузки.

Гибридная топология многоуровневого инвертора

Одним из достоинств многоуровневого инвертора по сравнению с двухуровневым заключается в том, что в схеме возможно получить высокое напряжение на выходе, используя стандартные низковольтные полупроводниковые элементы, такие как IGBT-модули, не прибегая к необходимости высоковольтных дорогостоящих полупроводников. Другим преимуществом многоуровневого инвертора является многоступенчатость кривой выходного напряжения, что позволяет уменьшить содержание высших гармоник в кривой выходного напряжения. С увеличением количества уровней уменьшаются ступени выходного напряжения и улучшается его качество [1].

Многоуровневые топологии можно разделить на три основные категории: с фиксированной нейтральной точкой, с плавающими конденсаторами и многоуровневый каскадный инвертор [2]. С увеличением количества уровней в инверторе усложняется схема, увеличивается количество полупроводниковых ключей. Поэтому представляют интерес топологии, которые позволяют получить увеличение уровней напряжения с уменьшением количества полупроводников, повысить производительность и надежность системы [3].

Гибридная топология заключается в том, что в гибридном каскадном инверторе несколько ячеек инвертора разных типов соединены последовательно в каждой фазе. Эти инверторные ячейки обычно представляют собой стандартные низко-

уровневые инверторы, такие как однофазный инвертор по схеме H-моста, двухуровневый инвертор и трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой (NPC) [4]. Иными словами, гибридные топологии – это топологии многоуровневых инверторов, основанные на применении существующих топологий для отдельных ячеек инвертора. Такое построение многоуровневого инвертора позволяет уменьшить содержание высших гармоник в выходном напряжении без увеличения количества силовых устройств [5–9].

Каждый силовой модуль этой гибридной структуры может работать при определенном напряжении постоянного тока и частоте переключения, что позволяет повысить эффективность работы инвертора. Использование ШИМ для управления инвертором позволяет:

- а) работать с более низкими частотами преобразования [10, 11];
- б) обеспечить селективное исключение низкочастотных составляющих в спектре выходного напряжения [12, 13];
- в) минимизировать коэффициент гармоник тока [14], напряжения [15];
- г) минимизировать потери в двигателе [16];
- д) минимизировать среднеквадратичное отклонение напряжения от желаемой формы [17].

Топология, обсуждаемая в этой статье, представляет собой гибрид трехуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой (NPC) и двухуровневого инвертора (H-мост), соединенных последовательно.

Схема однофазной двухуровневой ячейки H-моста показана на рис. 2а. В этой схеме выходное напряжение V_a имеет два значения: $+V_{DC}$ и $-V_{DC}$. Для получения уровня напряжения $+V_{DC}$ должны быть включены ключи S1 и S4; для получения уровня напряжения $-V_{DC}$ должны быть включены ключи S2 и S3.

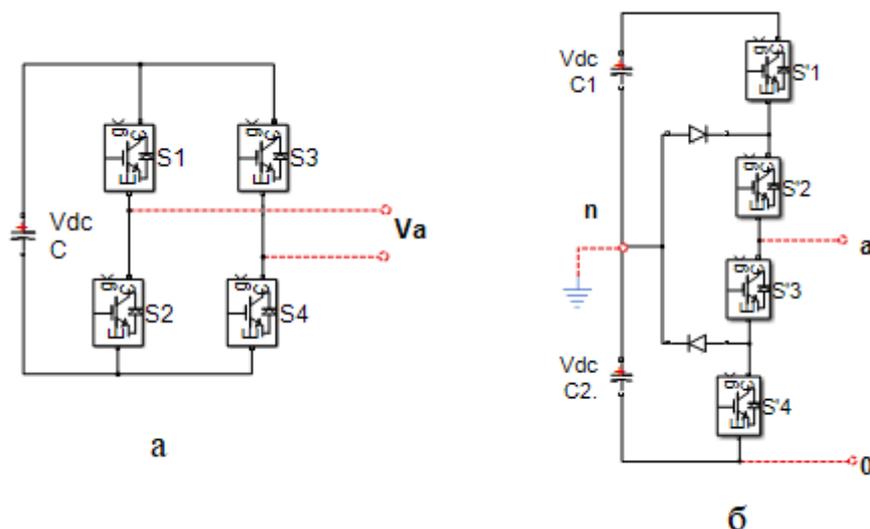


Рис. 2. Топологии однофазных двухуровневой ячейки H-моста (а) и трехуровневой инверторной цепи с фиксированной нейтральной точкой (б)

Трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой для одной фазы показан на рис. 2б. Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора С1 и С2. Средняя точка двух конденсаторов n может быть определена как нейтральная точка. Выходное напряжение Van между точками a и n имеет три состояния: $-V_{DC}$, 0 и $+V_{DC}$. Для получения уровня напряжения $+V_{DC}$ должны быть включены ключи S'1 и S'2; для получения уровня напряжения $-V_{DC}$ должны быть включены ключи S'3 и S'4; для получения уровня напряжения 0 должны быть включены S'2 и S'3.

На основе однофазных схем, приведённых на рис. 2, получим трехфазную структуру гибридного инвертора, показанную на рис. 3. В каждой фазе имеется восемь полупроводниковых ключей. Управляющие импульсы на 8 ключей фазы А, фазы В и

фазы С подаются со сдвигом фазы на 120 эл. градусов к соответствующей клемме затвора.

В табл. 1 приведены состояния ключей S и S' для одной фазы напряжения U_{0A} нагрузки инвертора в случае предлагаемой топологии гибридного инвертора. На рис. 4 показаны графики последовательности состояний ключей S и S' во времени и соответствующие им уровни напряжения нагрузки для одной фазы напряжения U_{0A} в случае предлагаемой топологии гибридного инвертора.

Предложенная топология гибридного инвертора позволяет получить 9 значений фазного напряжения нагрузки и тем самым получить кривую выходного напряжения, близкую к синусоиде. Это делает возможным снижение частоты переключения и снижения скачков напряжения на силовых компонентах.

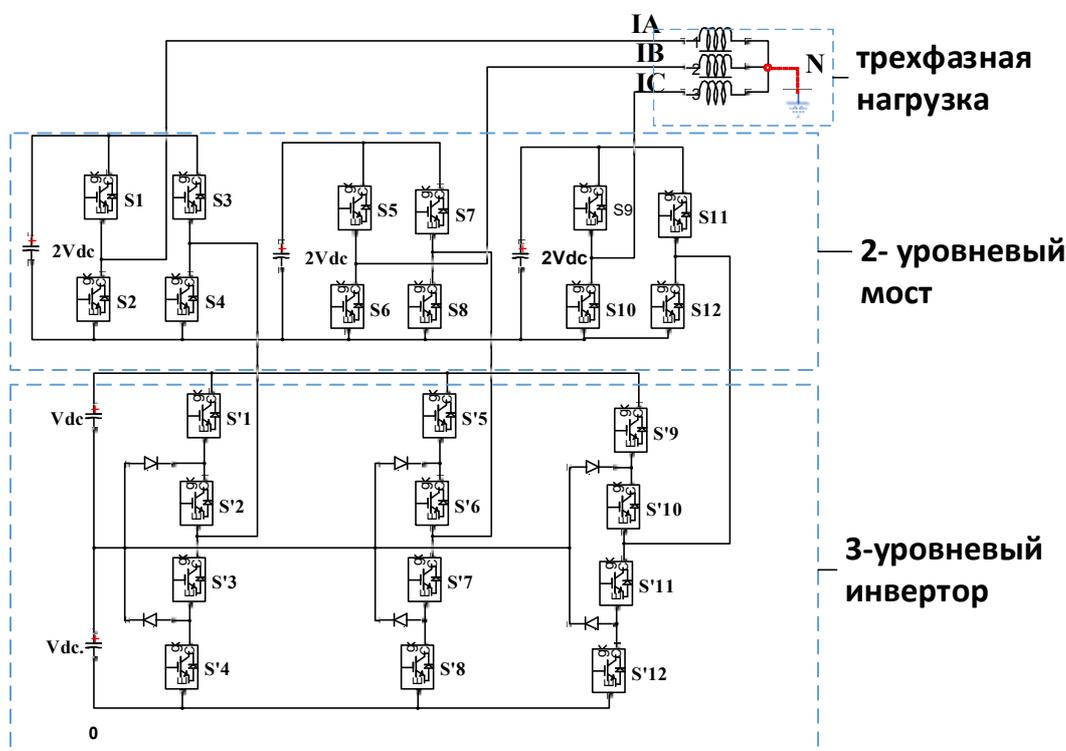


Рис. 3. Трехфазная структура гибридного инвертора, основанная на предлагаемой топологии

Таблица 1

Состояния ключей S и S' для одной фазы напряжения нагрузки инвертора в случае гибридного инвертора

№	Выходное напряжение 1 фазы (U_{0A})	S1	S2	S3	S4	S'1	S'2	S'3	S'4
1	4Vdc	1	0	0	1	1	1	0	0
2	3Vdc	1	0	0	1	0	1	0	0
3	2Vdc	0	1	0	1	1	1	0	0
4	Vdc	0	1	0	1	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0	0	1	1
6	-Vdc	0	1	1	0	0	1	0	0
7	-2Vdc	0	1	1	0	0	0	1	1
8	-3Vdc	1	0	0	1	0	1	0	1
9	-4Vdc	1	0	0	1	0	0	1	1

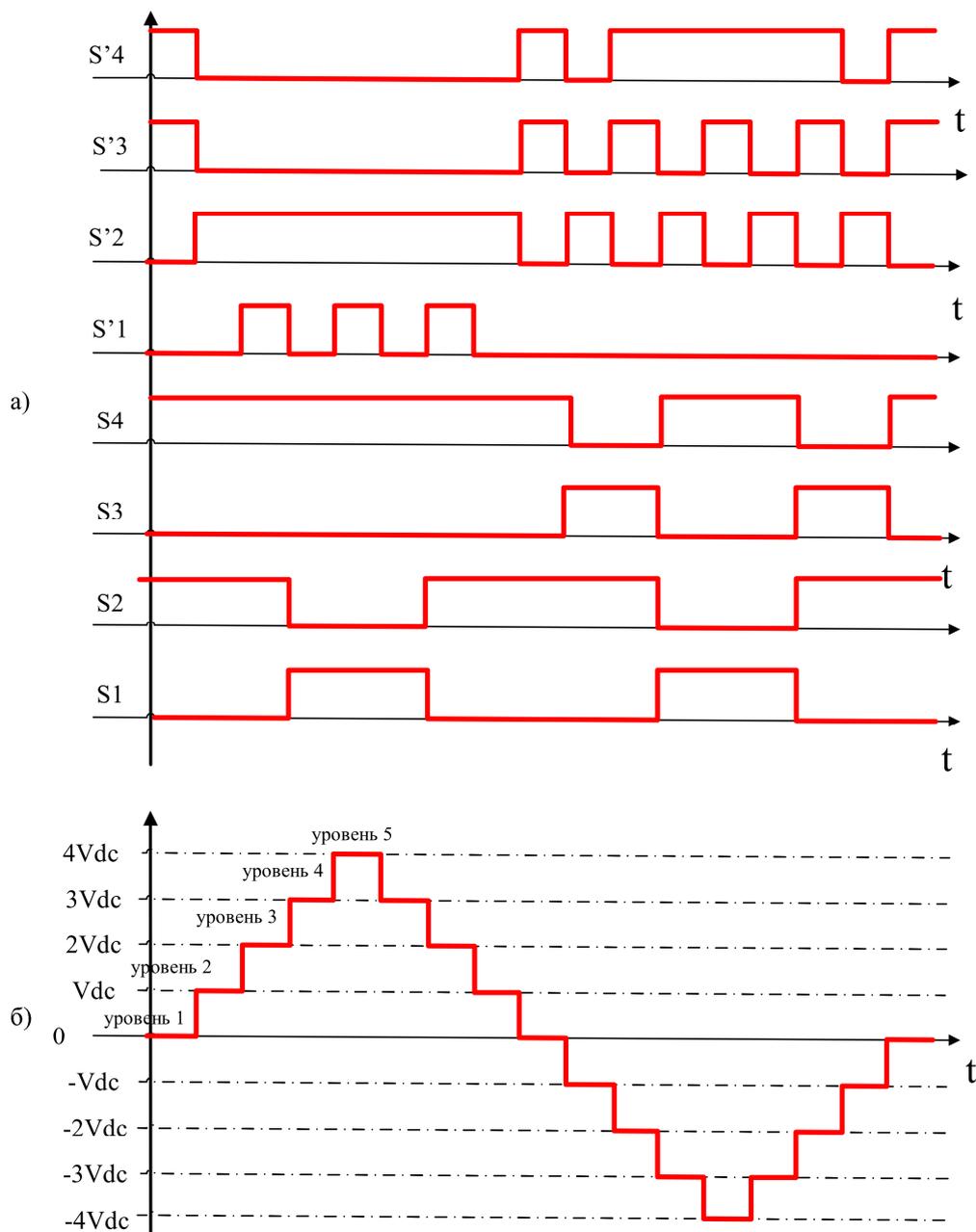


Рис. 4. Последовательность состояния ключей S и S' во времени (а) и соответствующие им уровни напряжения нагрузки для одной фазы U_{0a} в случае гибридного инвертора (б)

Алгоритм оптимизации напряжения инвертора

Алгоритм оптимизации напряжения инвертора должен обеспечивать поддержание баланса источников напряжения постоянного тока и устранять генерацию синфазного напряжения [9, 18], под которым понимается напряжение между нейтралью источника постоянного тока (точка 0) и нейтралью нагрузки (точка N «земля» нагрузки).

Для управления гибридным инвертором в составе активного фильтра гармоник в работе предложен метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) несущей. Метод широтно-импульсной

модуляции используется для уменьшения синфазного напряжения, коммутационных потерь, минимизации гармоник тока и гармоник напряжения [14, 15], получения близкой к синусоидальной волны напряжения и волны тока.

На рис. 5 показана схема подачи управляющих сигналов на полупроводниковые ключи, где $\xi_x \dots$ ($x = \text{фаза a, фаза b, фаза c}$) – управляющий сигнал. Данный управляющий сигнал модулируется в соответствии с алгоритмом, приведённым на рис. 6, и далее сравнивается с треугольной несущей для генерации управляющих импульсов, которые включают или выключают ключи на IGBT-транзисторах (S... и S'...).

На рис. 6 показана блок-схема алгоритма ШИМ, на основе которого осуществляются модуляция управляющих сигналов ξ_x и затем сравнение их с треугольной несущей для генерации последовательности импульсов, включающих или отключающих 24 полупроводниковых ключа ($S\dots, S'\dots$) в соответствии с табл. 1 и рис. 4.

На блок-схеме алгоритма ШИМ сигнал V_x ($x = a, b, c$) является напряжением обратной свя-

зи от измерительного трансформатора нагрузки [18]:

$$V_a = V_A \cos \theta;$$

$$V_b = V_B \cos(\theta - \frac{2\pi}{3});$$

$$V_c = V_C \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}).$$

Сигнал обратной связи по напряжению нагрузки V_x изменяется в зависимости от нагрузки, колеблющейся во времени.

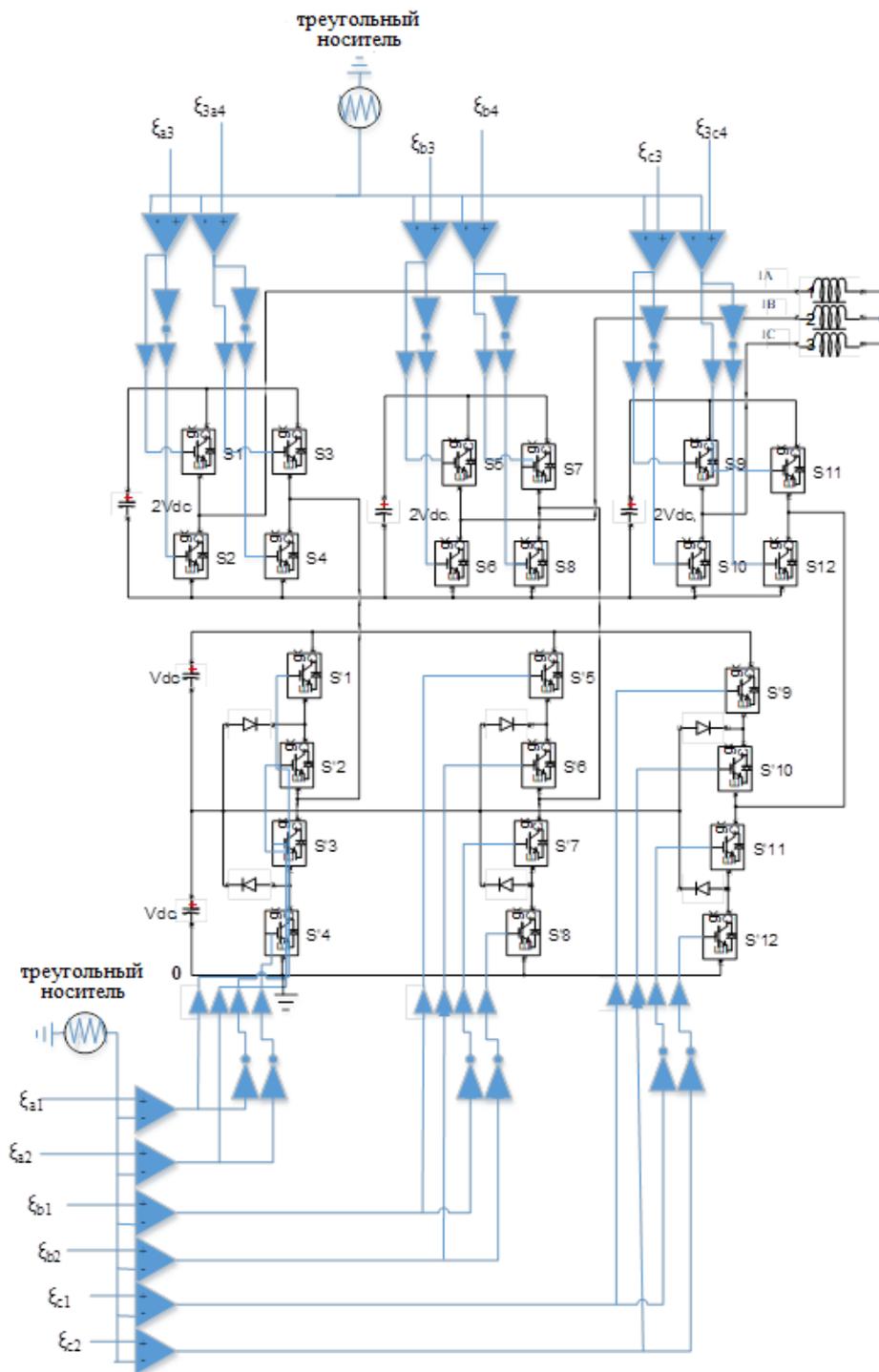


Рис. 5. Схема подачи управляющих сигналов $\xi_x\dots$ на полупроводниковые ключи (IGBT-транзисторы)

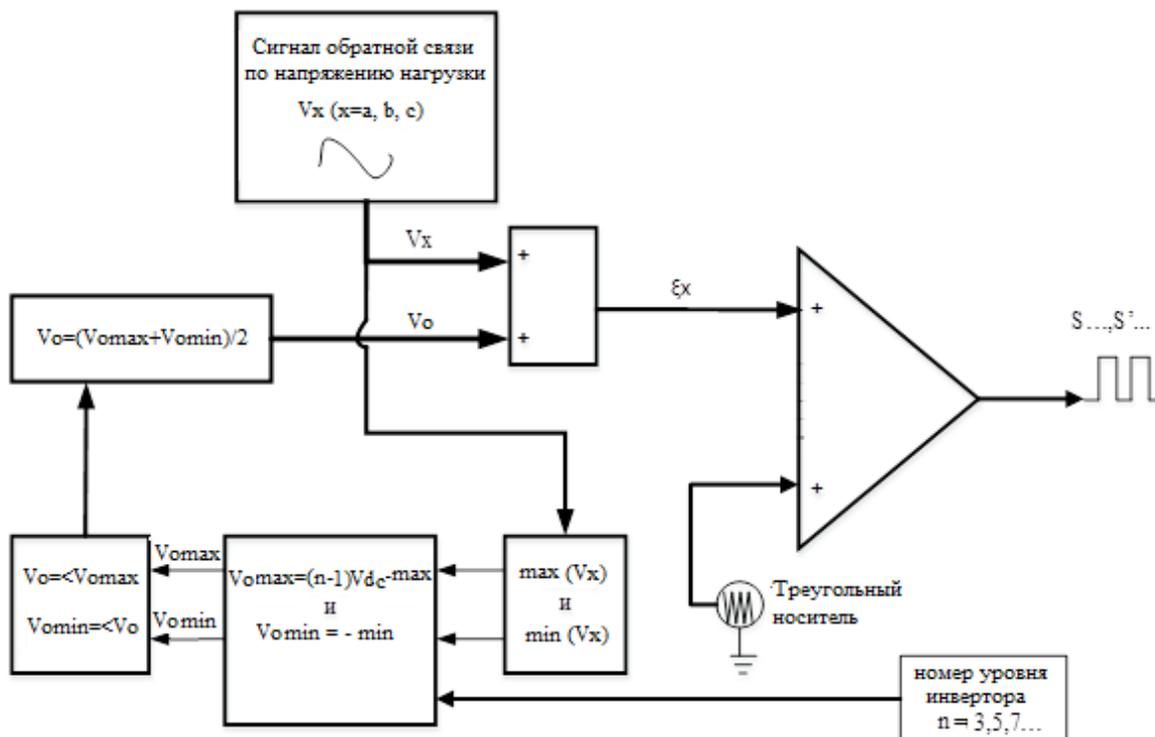


Рис. 6. Блок-схема алгоритма ШИМ на основе несущей для гибридного каскадного инвертора

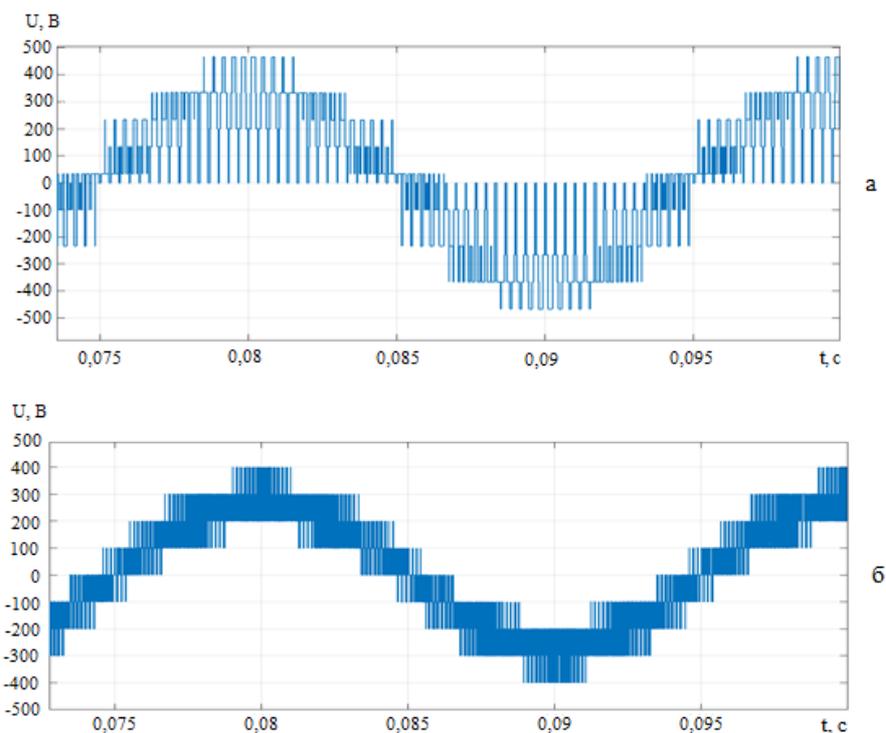


Рис. 7. Выходное напряжение инвертора U0A при отсутствии сигнала V_0 (а) и его наличии (б)

Управляющий сигнал ξ_x ($0 \leq \xi_x \leq 1$) равен $\xi_x = V_x + V_0$, где сигнал V_0 – синфазное смещение напряжения.

Добавление сигнала V_0 к управляющему напряжению V_x позволяет получить сбалансированное, близкое к синусоиде выходное напряже-

ние инвертора U0A. Сигнал ξ_x сравнивается с треугольной несущей (фиксированная установка) для переключения полупроводниковых приборов IGBT.

Значение V_0 находится следующим образом. Определим величины \max и \min как макси-

мальное и минимальное значения для трехфазных напряжений:

$$\begin{aligned} \max &= \max(V_a, V_b); \\ \min &= \min(V_a, V_b, V_c). \end{aligned}$$

Запишем неравенство

$$V_{0\min} \leq V_0 \leq V_{0\max},$$

где $V_{0\max} = (n - 1)V_{dc} - \max$; $V_{0\min} = -\min$;
 n – номер уровня инвертора; V_{dc} – напряжение конденсатора постоянного тока.

Отсюда находим V_0 :

$$V_0 = \frac{(V_{0\max} + V_{0\min})}{2}.$$

Номер уровня инвертора $n = 3, 5, 7, \dots$, так как многоступенчатая гибридная инверторная структура генерирует уровни напряжения $n > 3$ и не содержит четные числа уровней напряжения.

На рис. 3 представлена трехфазная 5-уровневая гибридная инверторная структура на основе предложенной топологии, следовательно, $n = 5$. На рис. 7 приведены формы выходного напряжения инвертора V_0a с одинаковой нагрузкой при отсутствии сигнала V_0 (рис. 7а) и при его добавлении к управляющему напряжению V_x в соответствии с алгоритмом на рис. 6 (рис. 7б). Сравнение выходных напряжений инвертора для этих двух случаев позволяет сделать вывод о том, что добавление сигнала V_0 приводит к сбалансированному выходному напряжению, форма которого близка к синусоидальной.

Модель АФГ и результаты моделирования

Для изучения свойств предложенной структуры АФГ на основе гибридной топологии многоуровневого инвертора и алгоритма его управления разработана модель с использованием пакета MATLAB и его инструментов Sim Power System и Simulink.

На рис. 8 приведена модель трёхфазной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении АФГ. В качестве нелинейной нагрузки взяты частотно-регулируемые электропри-

воды общей мощностью 1007 кВт, получающие питание от шин 0,4 кВ. Основу модели АФГ представляет рассмотренный ранее гибридный 5-уровневый каскадный инвертор с использованием ШИМ. Активный фильтр подключен параллельно нелинейной нагрузке.

Результаты моделирования приведены в табл. 2, где показаны формы кривых фазных напряжений и токов на шинах 0,4 кВ, а также значения коэффициентов нелинейных искажений напряжения $KНИ_U$ и тока $KНИ_I$ для этих кривых при отсутствии и включении АФГ.

На основе анализа результатов, приведённых в табл. 2, сделаны следующие выводы.

При наличии нелинейной нагрузки и отсутствии АФГ формы кривых напряжений и токов существенно отличаются от синусоидальной. Коэффициент нелинейных искажений напряжения на шине низкого напряжения 0,4 кВ равен $KНИ_U = 6,47\%$. Коэффициент нелинейных искажений тока $KНИ_I = 26,64\%$. Данные значения существенно превышают допустимые пределы $KНИ_U \leq 5\%$, $KНИ_I \leq 20\%$, установленные международным стандартом IEEE ST519-2014 [19].

При наличии нелинейной нагрузки и включении АФГ формы кривых напряжений и токов приближаются к синусоидальной форме. В этом случае коэффициент нелинейных искажений напряжения на шине низкого напряжения 0,4 кВ уменьшился с 6,47 до 1,64%. Коэффициент нелинейных искажений тока уменьшился с 26,64 до 9,95%. Данные значения меньше допустимых норм, установленных международным стандартом IEEE ST519-2014 [19].

Таким образом, АФГ на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции ШИМ является эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки.

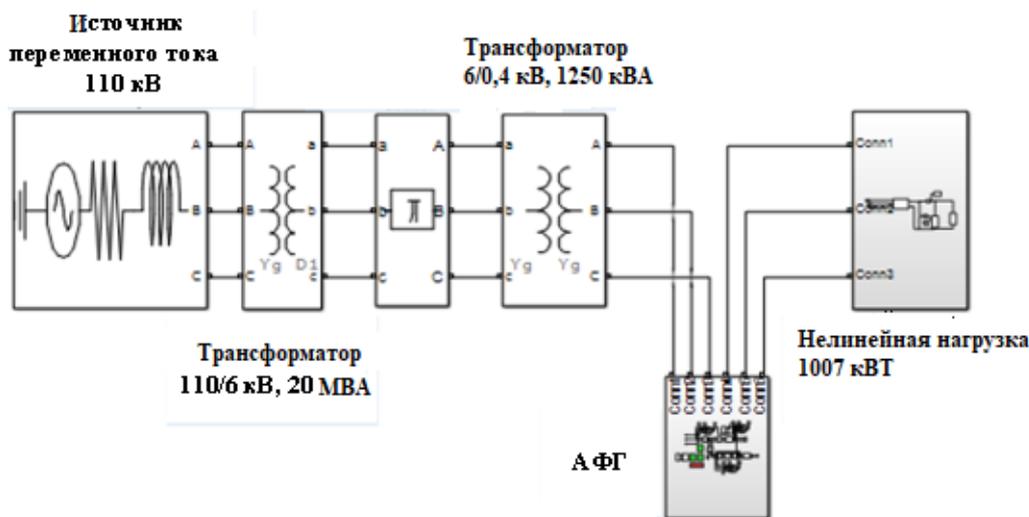


Рис. 8. Модель системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении АФГ

Результаты моделирования

Шина 0,4 кВ	Vabc	Iabc
АФГ отключён		
АФГ включён		
Шина 0,4 кВ	КНИ _U %	КНИ _I %
АФГ отключён	6,47	26,64
АФГ включён	1,64	9,95

Заключение

Предложена схема активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции ШИМ для систем электроснабжения 0,4 кВ при нелинейной нагрузке.

Выполнено моделирование электрических систем с нелинейной нагрузкой. Результаты моделирования позволили оценить эффективность применения активного фильтра гармоник для улучшения качества электроэнергии.

Анализ результатов моделирования показал, что при наличии нелинейной нагрузки и отсутствии АФГ коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока на шине низкого напряжения 0,4 кВ превышают допустимые пределы, установленные международным стандартом IEEE ST519-2014.

Включение активного фильтра гармоник при наличии нелинейной нагрузки приводит к существенному уменьшению уровня высших гармоник напряжения и тока на шине низкого напряжения 0,4 кВ по сравнению со случаем отсутствия АФГ. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока не превышают допустимых пределов, установленных международным стандартом IEEE ST519-2014.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что разработанный активный фильтр гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции ШИМ является эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки.

Литература/References

1. Alishah R.S., Nazarpour D., Hosseini S.H., Sabahi M. Reduction of power electronic elements in multilevel converters using a new cascade structure. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2015, vol. 62, no. 1, pp. 256–259. DOI: 10.1109/tie.2014.2331012
2. Jos Rodriguez, Jih-Sheng Lai. Multilevel Inverters: An Overview of Topologies, Controls, and Applications. *IEEE Transactions in Industrial Electronics*, 2002, vol. 49 (4), pp. 2703–2712. DOI: 10.1109/tie.2002.801052
3. Sourabh Rathod, Mukesh Kirar, Bharadwaj S.K. A review of Cascaded Multilevel inverter control techniques and its application. *International research journal of Engg and Technology*, 2015.
4. Nguyen Van Nho, Nguyen Xuan Bac. Carrier pwm control of cascaded hybrid npc 3-level inverter and two-level inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, September 2011.
5. Sadigh A.K., Abarzadeh M., Corzine K.A., Dargahi V. A new breed of optimized symmetrical and asymmetrical cascaded multilevel power converters. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 1160–1170. DOI: 10.1109/jestpe.2015.2459011

6. Babaei E., Laali S. Optimum structures of proposed new cascaded multilevel inverter with reduced number of components. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2015, vol. 62, no. 11, pp. 6887–6895. DOI: 10.1109/tie.2015.2437330
7. Nadeem Ahmad, Binsy joseph. A Review Paper on Multilevel Inverters with Its Control and Power Quality Parameters. *International journal of interdisciplinary*, Research 2017.
8. Sourabh Rathod, Mukesh Kirar, Bharadwaj S.K. A review of Cascaded Multilevel inverter control techniques and its application. *International research journal of Engineering and Technology*, July 2015.
9. Chan R, Baek J, Kwak S. Simple algorithm with fast dynamics for cascaded H-bridge multilevel inverter based on model predictive control method. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2017 IEEE*, 2017, pp. 696–702. DOI: 10.1109/apec.2017.7930770
10. Tu Nguyen T.-K., Nguyen N.-V. Novel eliminated common mode voltage PWM sequences and an online algorithm to reduce current ripple for a three-level inverter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2017, vol. 32, no. 10, pp. 7482–7493. DOI: 10.1109/tpel.2016.2634009
11. Uddin M., Mirzaeva G., Goodwin G., Stepien P. A simplified model predictive control to eliminate common mode voltage of an AC motor fed by a neutral point clamped inverter. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/icems.2017.8056507
12. Liu P., Duan S., Yao C., Chen C. A double modulation wave CBPWM strategy providing neutral-point voltage oscillation elimination and CMV reduction for three-level NPC inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 16–26. DOI: 10.1109/tie.2017.2723866
13. Tsai M.-J., Chen H.-C., Tsai M.-R., Wang Y.-B., Cheng P.-T. Evaluation of carrier-based modulation techniques with common-mode voltage reduction for neutral point clamped converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 3268–3275. DOI: 10.1109/tpel.2017.2707583
14. Lewandowski M., Szelag A. Minimizing harmonics of the output voltage of the chopper inverter. *Archiv fur Elektrotechnik*, 1986, vol. 69, no. 4, pp. 223–226. DOI: 10.1007/bf01573601
15. Hava A.M., Un E. Performance analysis of reduced common mode voltage PWM methods and comparison with standard PWM methods for three-phase voltage source inverters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 241–252. DOI: 10.1109/tpel.2008.2005719
16. Chandini G.S., Shiny G. Common mode voltage elimination technique for an open-end winding induction motor using carrier-based PWM. *International Conference on Technological Advancements in Power and Energy*, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/tapenergy.2017.8397239
17. Takashi I., Mochikawa H. A new control of PWM inverter for minimum loss operation of an induction motor drive. *IEEE Transactions Industry Applications*, 1985, vol. 21, no. 3, pp. 580–587. DOI: 10.1109/tia.1985.349713
18. Nho N.V., Youn M.J. Comprehensive study on space vector PWM and carrier based PWM correlation in multilevel inverters. *Proc. Inst. Elect. Eng.–Elect. Power Appl.*, 2006, vol. 153, no. 1, pp. 149–158. DOI: 10.1049/ip-epa:20050046
19. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. American national standards institute. 2014. 29 p.

Шевырев Юрий Вадимович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва; uvshv@yandex.ru.

До Тхань Лич, аспирант кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва; lichdalat@gmail.com.

Поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.

**JUSTIFICATION OF THE HARMONICS ACTIVE FILTER CIRCUIT
BASED ON A HYBRID CASCADE INVERTER**

Yu.V. Shevyrev, *uvshev@yandex.ru*,

Do Thanh Lich, *lichdalat@gmail.com*

National University of Science and Technology "MISiS", Moscow, Russian Federation

With an increase in the number of levels in the inverter, the circuit becomes more complicated, the number of semiconductor switches increases. Therefore, topologies, which make it possible to obtain an increase in voltage levels with a decrease in the number of semiconductors, to increase the performance and reliability of the system, are of great interest. The paper proposes a scheme of a hybrid cascade inverter, considers a method of pulse-width modulation based on a carrier, and presents a block diagram of an algorithm for generating reference modulating signals in an optimized method of pulse-width modulation. To control a hybrid inverter as part of an active harmonic filter, a method of pulse-width modulation of the carrier is proposed. It allows reducing the common-mode voltage, switching losses, and minimizing current and voltage harmonics. The paper describes the PWM algorithm, on the basis of which the control signals are modulated and then compared with a triangular carrier to generate a sequence of pulses that turn on or turn off semiconductor switches. The purpose of the proposed solutions is to improve harmonic distortion caused by non-linear load in a 0.4 kV low-voltage system. The results of modeling the proposed active harmonic filter circuit are presented. Based on the studies performed, it is shown that the use of an active harmonic filter based on a 5-stage hybrid inverter with pulse-width modulation control is an effective means of filtering higher harmonics on 0.4 kV low voltage buses in the presence of a nonlinear load, which allows solving the problem of eliminating the impact of higher harmonics on the production activities of the enterprise.

Keywords: multi-level inverter, inverter voltage optimization algorithm, common-mode voltage, multi-level hybrid inverter, pulse-width modulation.

Received 12 April 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шевырев, Ю.В. Обоснование схемы активного фильтра гармоник на основе гибридного каскадного инвертора / Ю.В. Шевырев, До Тхань Лич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 105–114. DOI: 10.14529/power210211

FOR CITATION

Shevyrev Yu.V., Do Thanh Lich. Justification of the Harmonics Active Filter Circuit Based on a Hybrid Cascade Inverter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 105–114. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210211
