

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ШИМ ПЯТИУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ С АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ НА ПАРАМЕТРЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье проводится анализ энергетических показателей многоуровневых преобразователей напряжения. На актуальность исследования указывают возрастающие требования технологических процессов к экономичности использования электрической энергии, к сокращению потребляемой полупроводниковыми преобразователями мощности, а также к уровню регулируемой реактивной мощности. Рассматриваемый преобразователь представляет собой пятиуровневый инвертор напряжения. В качестве топологии преобразователя рассматривается структура инвертора на H-мостах. В статье приводится двухкаскадная трехфазная схема с соединением ячеек инвертора в звезду. Описываются возможные состояния электронных ключей и соответствующие им режимы работы. Напряжение источников постоянного напряжения составляет 535 В. В статье рассматриваются алгоритмы формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ): фазовая оппозиция (ФО), альтернативная фазовая оппозиция (АФО) и гибридные методы с синусоидальной нулевой последовательностью модулирующего сигнала или с треугольной нулевой последовательностью модулирующего сигнала. В качестве критерия оценивания качеств выходного напряжения инвертора был принят коэффициент гармонических искажений (КГИ), а также уровень линейного напряжения. Приводится гармонический спектр напряжения при различных способах управления преобразователем. Показаны возможные способы уменьшения коэффициента гармоник, а также увеличения коэффициента амплитудной модуляции за счет применения различных способов формирования широтно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: мостовые схемы, инверторы, многоуровневые преобразователи, широтно-импульсная модуляция, трехфазная электрическая мощность, коэффициент гармонических искажений.

Введение. Требования к качеству регулирования параметров электрической энергии, а также возможности современной элементной базы обуславливают применение, разработку и эксплуатацию полупроводниковых преобразователей энергии.

Одним из перспективных способов регулирования параметров электрической энергии, в том числе и уровня реактивной мощности, является применение топологий многоуровневых преобразователей. Данные многоуровневые преобразователи могут обеспечивать активное регулирование режимов работы совместно с питающей сетью или автономной энергетической установкой [1–4].

Нелинейная нагрузка обуславливает несинусоидальность потребляемых токов, что ведет к до-

полнительным потерям в сетях и снижает общий коэффициент мощности. Нелинейность характера нагрузки обеспечивает сдвиг основной гармоники тока относительно основной гармоники напряжения. В целом снижение коэффициента мощности значительно увеличивает потери мощности в линиях электропередачи [5–7].

Таким образом, для удовлетворения требований электромагнитной совместимости необходимы силовые полупроводниковые преобразователи с возможностью регулирования коэффициента мощности. Переход к многоуровневым преобразователям позволит значительно снизить гармонические искажения при широком диапазоне регулирования напряжения [8].

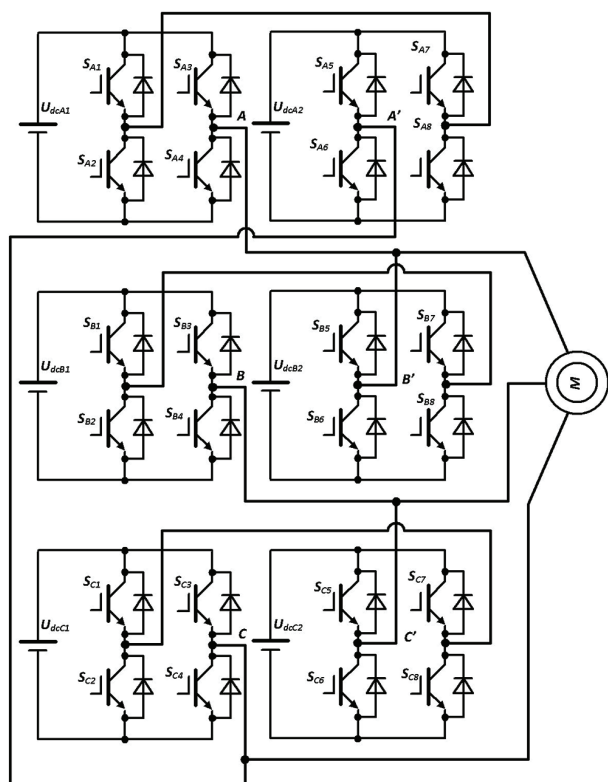


Рис. 1. Трехфазная конфигурация пятиуровневого Н-мостового инвертора

Таблица 1

Таблица состояний силовых ключей инвертора

State	S_{X1}	S_{X2}	S_{X3}	S_{X4}	S_{X5}	S_{X6}	S_{X7}	S_{X8}	U_{xx}
1	1	0	0	1	1	0	0	1	$2U_{dc}$
2	1	0	1	0	1	0	0	1	U_{dc}
4	0	1	0	1	1	0	0	1	U_{dc}
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	1	0	1	0	1	0	0
7	0	1	0	1	1	0	1	0	0
8	1	0	1	0	0	1	0	1	0
9	0	1	0	1	0	1	0	1	0
10	0	1	1	0	0	1	0	1	$-U_{dc}$
11	0	1	1	0	1	0	1	0	$-U_{dc}$
12	0	1	1	0	0	1	0	0	$-2U_{dc}$

Цель данной статьи исследовать влияние различных алгоритмов формирования ШИМ пятиуровневых инверторов на базе мостовых ячеек с активнo-индуктивной нагрузкой, на параметры выходного напряжения (уровень выходного напряжения, коэффициент гармонических искажений).

Трехфазная мостовая топология. Для реализации структуры многоуровневого инвертора напряжения используют однофазные мостовые ячейки инверторов (Н-ячейки, Н-bridges), каждая из которых имеет отдельный источник питания на постоянном токе.

Схема трехфазного инвертора напряжения, образованного из двух каскадов однофазных ячеек, соединенных в треугольник, показана на рис. 1.

Различная продолжительность включения импульсов напряжения отдельных ячеек каскада многоуровневого инвертора реализует амплитудную модуляцию выходного напряжения [9, 10]. Для каждой ячейки инвертора требуется независимый источник постоянного напряжения U_{dc} , что, как правило, требует применения многообмоточного трансформатора и неуправляемых выпрямителей со сглаживающими фильтрами на каждую обмотку.

Инверторы с каскадом Н-ячеек могут считаться более надежными по сравнению с трехфазными мостовыми инверторами, так как при возможном отказе одной из ячеек преобразователь может продолжать работать при снижении выходной мощности [11].

На рис. 1 представлена схема инвертора, в котором использованы две Н-мостовые ячейки. Данная структура имеет каскадную схему включения. Устройство состоит из восьми однонаправленных активных силовых ключей.

Для обозначения транзисторных ключей используются символы $S_{X1} - S_{X8}$. Коммутационные состояния ключей для одного полупериода и соответствующие уровни выходного напряжения приведены в табл. 1.

Если любые из диагональных ключей ($S_{X2'}$, $S_{X3'}$, $S_{X6'}$, $S_{X7'}$) или ($S_{X1'}$, $S_{X4'}$, $S_{X5'}$, $S_{X8'}$) открыты (имеется в виду 2 активных ключа), в этом случае фазное выходное напряжение будет равно $2U_{dc}$ или $-2U_{dc}$ (табл. 1). Положительные и отрицательные состояния U_{dc} и $-U_{dc}$ могут быть сформированы, если любые из ключей, например, ($S_{X2'}$, $S_{X3'}$, $S_{X5'}$, $S_{X7'}$) или ($S_{X1'}$, $S_{X4'}$, $S_{X5'}$, $S_{X8'}$) открыты (табл. 1), а все оставшиеся ключи находятся в закрытом состоянии. Выходное фазное напряжение принимает нулевое значение, когда закрыты все ключи в обоих каскадах Н-моста.

Схема соединений фазных ячеек — треугольник. Нагрузка также может быть соединена в треугольник или звезду. Такое соединение ячеек уменьшает коэффициент гармоник по сравнению с соединением звездой.

Алгоритмы формирования ШИМ. Существуют различные способы формирования ШИМ-сигнала с помощью нескольких несущих, которые могут быть использованы для управления многоуровневыми инверторами. В практических схемах применяются 3 основных метода формирования сигнала управления: фазовый сдвиг несущих (ФНС), различное положение несущих (РПН) и гибридный (ГМ) метод [9–11]. В данной работе мы будем рассматривать вариант РПН и гибридного метода, которые обеспечивают наилучшую форму выходного напряжения и низкий уровень потерь при достаточно простой реализации алгоритма управления Н-мостами.

Для управления многоуровневым преобразователем требуются четыре треугольных сигнала несущей частоты и три сигнала опорного напряжения, для случая трехфазного двухкаскадного Н-моста. Диаграммы напряжений формирователя управляющих ШИМ сигналов однофазного двухкаскадного Н-моста показаны на рис. 2.

Для формирования одного полупериода выходного фазного напряжения используется по две несущие треугольных сигнала.

По условиям алгоритма производится сравнение модулирующего сигнала (u_{rx}) с треугольными

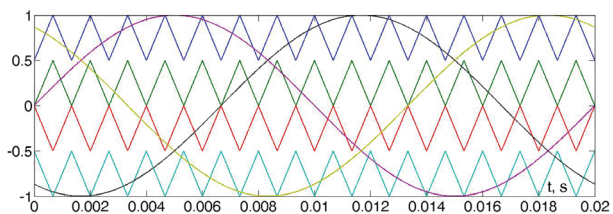


Рис. 2. Метод фазовой оппозиции (ФО) формирования ШИМ

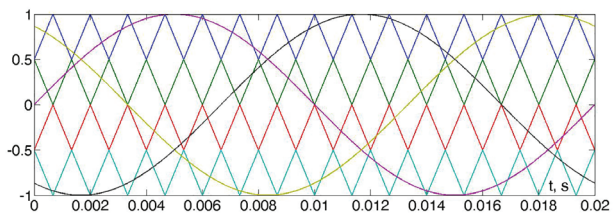


Рис. 3. Альтернативный метод фазовой оппозиции (АФО) формирования ШИМ

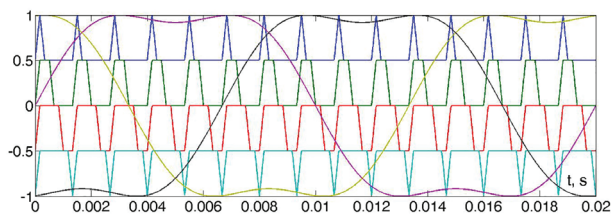


Рис. 4. Гибридный метод с синусоидальной нулевой последовательностью модулирующего сигнала (Hsin3w).

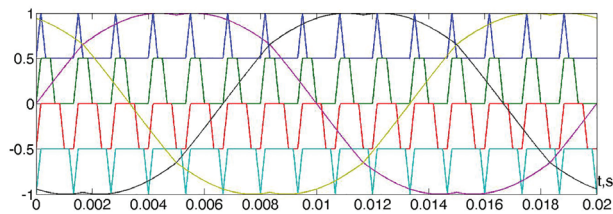


Рис. 5. Гибридный метод с треугольной нулевой последовательностью модулирующего сигнала (Htrig3w)

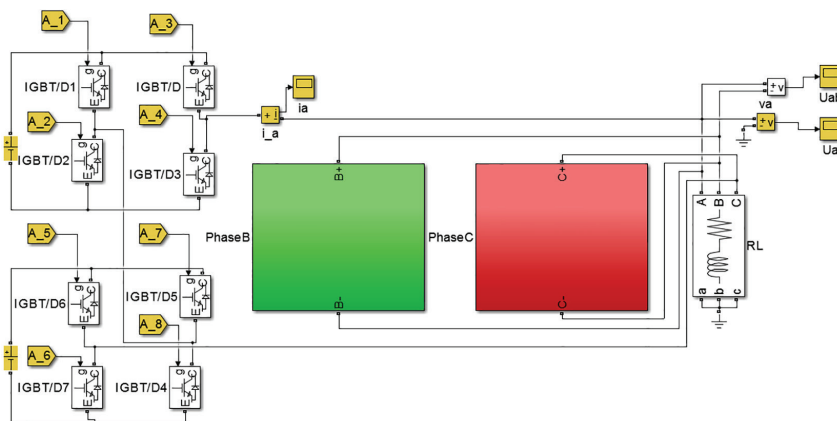


Рис. 6. Имитационная модель силовой части пятиуровневого инвертора

сигналами несущей частоты (u_{ci}), и в результате сравнения формируются сигналы управления (1). В соответствии с условиями алгоритма включается необходимый режим работы двухкаскадного H-моста (табл. 1). Таким образом, на одном полу-периоде производится 4 цикла коммутации.

$$\begin{cases} 2U_{dc}, & \text{if}(u_X \geq u_{C1}) \\ U_{dc}, & \text{if}(u_{C2} \leq u_X < u_{C1}) \\ 0, & \text{if}((u_{rX} < u_{C2}) \text{ and } (u_X > u_{C3})) \\ -U_{dc}, & \text{if}(u_{C4} < u_X \leq u_{C3}) \\ -2U_{dc}, & \text{if}(u_X \leq u_{C4}) \end{cases} \quad (1)$$

РПН способ формирования ШИМ, в свою очередь, может быть реализован как метод фазовой оппозиции (ФО) (рис. 2) или как метод альтернативной фазовой оппозиции (АФО) (рис. 3) [12–14].

В гибридном методе формирования ШИМ, треугольная несущая разделена на ряд несущих, сдвинутых друг относительно друга (рис. 4–5).

В настоящее время применяются скалярные способы ШИМ с вводом в гармонический модулирующий сигнал дополнительно сигналов нулевой последовательности [15, 16]. Для трехфазных систем — это гармоники, кратные трем, и их комбинации. Ос-

новное достоинство этих способов — расширение линейного диапазона регулирования первой гармоники выходного напряжения без перехода в режим перемодуляции (для трехфазного инвертора напряжения расширение составляет 15,5 %).

На рис. 4. приведена синусоидальная ШИМ с введением третьей гармоники синусоидальной формы и гибридным методом формирования несущих сигналов (2).

$$u_X = u_m \sin(\omega t + \varphi_X) + u_0 \sin 3\omega t. \quad (2)$$

Разновидностью синусоидальной ШИМ с введением третьей гармоники синусоидальной формы является синусоидальная ШИМ с введением третьей гармоники треугольной формы (рис. 5).

Кроме рассмотренных алгоритмов ШИМ, существуют векторные ШИМ, исследование которых выходит за рамки данной статьи [17–18].

Численное моделирование. При проведении численных экспериментов использовалась модель пятиуровневого инвертора мощностью 110 кВт, $\cos\varphi=0,9$. Схема соединения нагрузки звезда. В качестве силовых ключей использовались IGBT. При коммутации транзисторов принято допущение, что сквозные токи отсутствуют. Внутренне сопротивление IGBT 0,001 Ом, сопротивление снаббера

Параметры инвертора с различными алгоритмами ШИМ

M	КГИ _{U'} , %	КГИ _{I'} , %	U _{ab'} , В	I _{a'} , А	P _{out'} , кВт
ФО метод					
1	23,72	3,95	792,9	27,8	34,32
0,8	40,53	5,8	661,1	22,1	22,75
0,7	49,01	7,83	603,4	19,57	18,38
0,6	61	10,1	554,1	17,12	14,77
0,4	368,7	45,91	566,1	5,87	5,17
0,3	664,2	83,9	515,4	3,59	2,88
АФО метод					
1	27,04	3,87	786,1	27,34	33,46
0,8	34,28	6,2	666,9	22,76	23,63
0,7	39,33	6,73	604,3	20,3	19,10
0,6	49,61	8,25	548,8	17,76	15,18
0,4	368,7	45,9	566	5,87	5,17
0,3	664,3	83,89	515,4	3,592	2,88
Гибридный метод (Hsin3w)					
1,15	14,91	3,35	930,3	33,14	48,00
1	17,23	2,77	898,8	31,9	44,64
0,8	21,64	2,66	854,1	30,06	39,97
0,7	26,81	4,0	825,8	28,74	36,95
0,6	44,91	9,56	743	24,52	28,37
0,4	82,88	20,87	609,1	17,25	16,36
1,15	14,91	3,35	930,3	33,14	48,00
Гибридный метод (Htrig3w)					
1,15	14,13	3,007	927,5	33,08	47,77
1	16,93	2,551	896,2	31,82	44,40
0,8	21,69	2,667	854,8	30,08	40,03
0,7	26,1	3,56	828,5	28,88	37,25
0,6	47,00	10,13	722,4	23,66	26,61
0,4	83,15	20,99	608,1	17,202	16,29

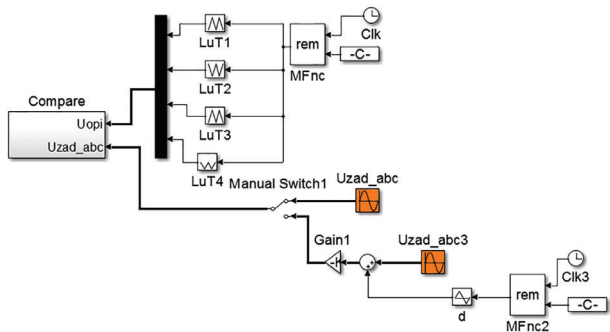


Рис. 7. Имитационная модель системы управления пятиуровневого инвертора

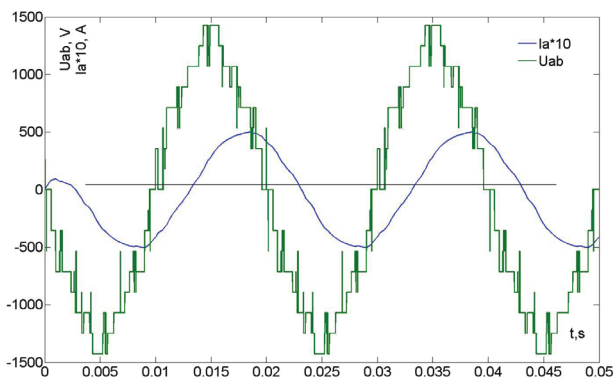


Рис. 8. Линейное напряжение (U_{ab}) и ток (I_a)

10⁶ (Ohms), емкость снаббера бесконечно большая. Напряжение источника питания одной ячейки составляет 535 В. Принято допущение, что источник питания идеальный, нагрузка симметричная. Кратность несущей частоты (отношение несущей частоты к частоте модулирующего сигнала) 15. Частота модулирующего напряжения 50 Гц. В качестве программной среды использовался MatLab; имитационная модель, использующаяся при проведении экспериментов, приведена на рис. 6, 7.

Модель системы управления [19] (рис. 7) содержит блок сравнения (Compare), который сравнивает опорные сигналы, подаваемые на вход Uopi блока сравнения, и задающие сигналы (Uzad_abc). Изменяя параметры генератора опорного (блоки LuT1-LuT4) и задающего (блоки Uzad_abz, Uzad_abz3) напряжений, реализуют методы формирования ШИМ: фазовой опозиции, альтернативной фазовой опозиции и гибридные методы. Выходными параметрами блока сравнения являются состояния управляющих сигналов силовых ключей A₁-A₆ (рис. 6).

Для инвертора напряжения определяющими выходными характеристиками являются параметры его выходного напряжения (рис. 8). Причем наиболее целесообразно для анализа использовать линейное напряжение преобразователя. Это обусловлено тем, что данное напряжение не зависит от схемы соединения нагрузки, в том числе от ее наличия.

В качестве критерия оценивания качеств выходного напряжения был принят коэффициент гармонических искажений [20].

Результаты численных экспериментов представлены в табл. 2 в виде численных значений, а также в виде спектра гармоник линейного напряжения при различных способах формирования ШИМ (рис. 9–12).

Выводы. Полученные данные (табл. 2, рис. 9–12) позволяют сказать, что наименьший коэффициент гармонических искажений можно получить, используя гибридный метод с синусоидальной нулевой последовательностью модулирующего сигнала (Hsin3w) или гибридный метод с треугольной нулевой последовательностью модулирующего сигнала (Htrig3w). ФО и АФО методы формирования ШИМ имеют более значительные высокочастотные составляющие по сравнению с Hsin3w и Htrig3w. Использование нулевой последовательности третьей гармоники позволяет существенно увеличить выходное напряжение многоуровневого инвертора. С уменьшением коэффициента амплитудной модуляции КГИ возрастает, причем очень сильно это

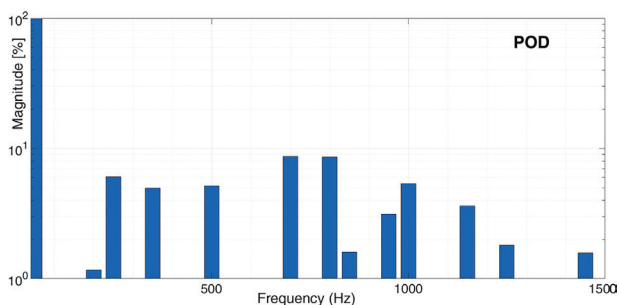


Рис. 9. Спектр линейного напряжения при ФО методе формирования ШИМ

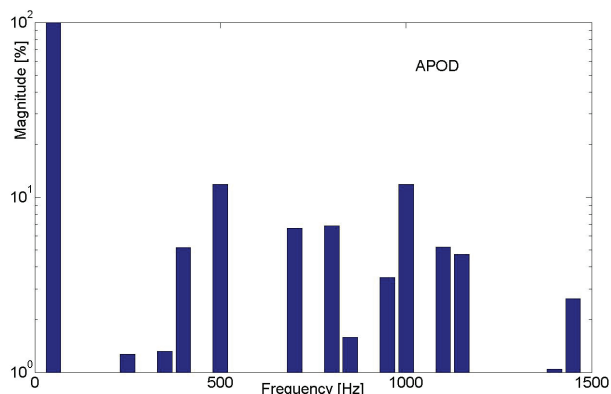


Рис. 10. Спектр линейного напряжения при АФО методе формирования ШИМ

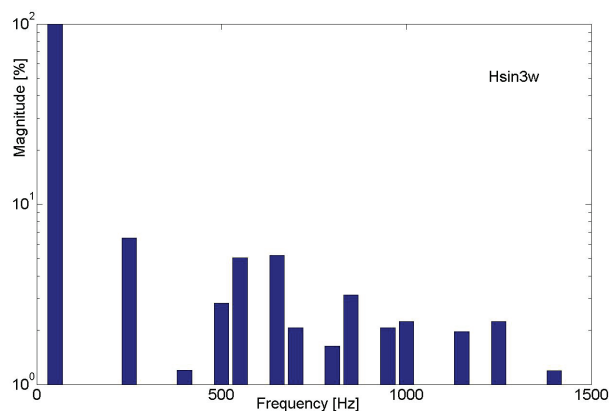


Рис. 11. Спектр линейного напряжения при гибридном (Hsin3w) методе формирования ШИМ

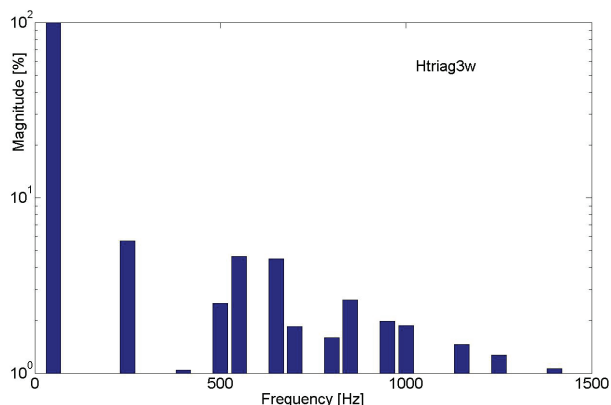


Рис. 12. Спектр линейного напряжения при гибридном (Htriag3w) методе формирования ШИМ

проявляется в ФО и АФО методах, что существенно ограничивает как диапазон регулирования так и область применения многоуровневых инверторов, с этими способами управления.

Библиографический список

1. Дмитриев Б. Ф., Пьей Пью Тун. Топологии силовой части многоуровневых преобразователей электрической энергии для судовых электроэнергетических систем // Морской вестник. № 1S (10). 2013. 22–24.
2. Tolbert L. M., Peng F. Z., Habetler T. G. Multilevel converters for large electric drives // IEEE Transactions on Industry Applications. 1999. Vol. 35 (1). P. 36–44.
3. Мальнев А. И., Баховцев И. А., Зиновьев Г. С. Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 7. С. 15–26.
4. Жульева В. В., Кабалык Ю. С. Многоуровневый инвертор напряжения для питания тяговых двигателей электроваза // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2016. Т. 1. С. 24–28.
5. Hemic K., Zegaoui A., A. Aissa Bokhtache [et al.]. Three-Phases Flying-Capacitor Multilevel Inverter with Proportional Natural PWM Control // Energy Procedia. 2015. Vol. 74. P. 1061–1070. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.744.
6. Mahalakshmi R., Sindhu K. C. Thampatty Grid Connected Multilevel Inverter for Renewable Energy Applications // Procedia Technology. 2015. Vol. 21. P. 636–642. DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.076.
7. Донской Н., Иванов А., Матисон В. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. 2008. № 15. С. 43–46.
8. Иванов А., Ушаков И. Бестрансформаторный многоуровневый инвертор для высоковольтного электропривода // Силовая электроника. 2011. Т. 4, № 32. С. 42–45.
9. Kannan C., Nalin Kant Mohanty, Selvarasu R. A new topology for cascaded H-bridge multilevel inverter with PI and Fuzzy control // Energy Procedia. 2017. Vol. 117. P. 917–926. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.211.
10. Макаров В. Г., Хайбрахманов Р. Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19, № 22. С. 134–138.
11. Ahmed M., Sheir A., Orabi M. Asymmetric cascaded half-bridge multilevel inverter without polarity changer // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57, Issue 4. P. 2415–2426. DOI: 10.1016/j.aej.2017.08.018.
12. Крутиков М. Б., Рожков В. В., Петрухин Ю. В. Симплексные алгоритмы управления трехфазными многоуровневыми автономными инверторами напряжения // Электричество. 2008. № 3. С. 33–40.
13. Иванчин И. И. Алгоритм коммутаций силовых приборов в многоуровневом инверторе напряжения // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 109–114.
14. Ganesan K., Barathi K., Chandrasekar P. [et al.]. Selective Harmonic Elimination of Cascaded Multilevel Inverter Using BAT Algorithm // Procedia Technology. 2015. Vol. 21. P. 651–657. DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.078.
15. Thakre K., Mohanty B. K., Chatterjee A. Reduction of circuit devices in symmetrical voltage source multilevel inverter based on series connection of basic unit cells // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57, Issue 4. P. 2703–2712. DOI: 10.1016/j.aej.2017.11.001.
16. Kannan C., Kishore C. K. A comparison of three phase 27 level inverter scheme under no load and multiple load conditions // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2014. Vol. 3. P. 245–250. DOI: 10.11591/eei.v3i4.302.
17. Mekhilef S., Kadir M. N. A. Novel vector control method for three-stage hybrid cascaded multilevel inverter // IEEE

Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. P. 1339–1349. DOI: 10.1109/TIE.2010.2049716.

18. 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 (1). P. 186–196. DOI: 10.1109/41.982262.

19. Бомбик В. С. Компьютерное моделирование системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2016. № 3. С. 19–28.

20. Garapati D. P., Jegathesan V., Veerasamy M. Minimization of power loss in newfangled cascaded H-bridge multilevel inverter using in-phase disposition PWM and wavelet transform based fault diagnosis // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9, Issue 4. P. 1381–1396.

ЛЫСЕНКО Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 4975-9193

AuthorID (РИНЦ): 643928

ORCID: 0000-0002-7924-5494

AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ResearcherID: N-5528-2015

Адрес для переписки: deolas@mail.ru

ОХОТНИКОВ Александр Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

AuthorID (РИНЦ): 762487

Адрес для переписки: alex.okhotnikoff@yandex.ru

ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Электроника».

SPIN-код: 2501-4655

AuthorID (РИНЦ): 685994

ResearcherID: E-5359-2014

КОБЕНКО Вадим Юрьевич, доктор технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроника».

SPIN-код: 9011-1591

ResearcherID: D-7342-2013

Для цитирования

Лысенко О. А., Охотников А. А., Захаренко В. А., Кобенко В. Ю. Исследование влияния алгоритмов формирования ШИМ пятиуровневых инверторов с активно-индуктивной нагрузкой на параметры выходного напряжения // Омский научный вестник. 2019. № 6 (168). С. 34–39. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-34-39.

Статья поступила в редакцию 22.10.2019 г.

© О. А. Лысенко, А. А. Охотников, В. А. Захаренко, В. Ю. Кобенко