

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ МОДУЛЯЦИИ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРАХ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В. С. ТОМАСОВ, А. А. УСОЛЬЦЕВ, К. М. ДЕНИСОВ, Д. А. ВЕРТЕГЕЛ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vertegeldenis@gmail.com*

С помощью математической модели пятиуровневого инвертора исследованы пульсации вектора тока нагрузки при различных алгоритмах управления инвертором. Показано, что требуется учет особенностей пространственно-векторной модуляции при разработке алгоритмов управления, обеспечивающих минимизацию пульсаций тока в широком диапазоне регулирования выходного напряжения. Отмечен присущий этому способу модуляции недостаток, заключающийся в скачкообразном изменении величины пульсаций тока при переходе с одного уровня модуляции на другой, что может приводить к резонансным явлениям в приборном приводе. Показано, что изменение уровня пульсаций свойственно для всех алгоритмов модуляции, но при синусоидальной ШИМ и ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой они существенно меньше и не имеют скачкообразного характера. Показано, что при переменной частоте модуляции в функции индекса выходного напряжения существенно снижается размах вариации пульсаций вектора тока и обеспечивается практически одинаковое их среднее значение во всем диапазоне регулирования выходного напряжения при всех алгоритмах модуляции. Это позволяет рассматривать пространственно-векторную модуляцию как альтернативу синусоидальной ШИМ и ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой в широком диапазоне регулирования напряжения. Исследовано влияние мертвого времени на зону нечувствительности регулировочной характеристики инвертора и, как следствие, на диапазон регулирования скорости вращения электропривода. Показано, что увеличение числа уровней практически пропорционально уменьшает зону нечувствительности и расширяет диапазон регулирования.

Ключевые слова: *многоуровневый инвертор напряжения, пульсации тока, алгоритмы модуляции, приборный электропривод переменного тока*

Введение. На сегодняшний день одним из перспективных решений для систем прецизионного электропривода является применение многоуровневых инверторов напряжения в качестве регулируемых источников питания. Это связано с тем, что многоуровневые инверторы позволяют существенно улучшить гармонический состав напряжения и тока нагрузки, а также сократить зону нечувствительности регулировочной характеристики и тем самым расширить диапазон регулирования скорости частотно-регулируемого электропривода. Такие преимущества обусловлены тем, что многоуровневые инверторы сочетают в себе свойства широтной и амплитудной модуляции. Но вместе с тем схемы многоуровневых преобразователей содержат большое число полупроводниковых ключей, они сложны, громоздки и дороги в сравнении с другими типами преобразователей частоты, при этом сложность формируемых алгоритмов управления увеличивается с ростом числа уровней [1—5].

В зависимости от числа уровней базовых векторов напряжения трехфазной системы, которое можно сформировать на выходе преобразователя, а также от способа их получения можно выделить несколько схем многоуровневых преобразователей с двумя основными топологиями построения силовых цепей: а) с разделением напряжения звена постоянного тока

на отдельные уровни при помощи конденсаторов; б) каскадные преобразователи с последовательным соединением нескольких однофазных автономных инверторов напряжения (АИН) в выходных фазах [1—4]. Каждая топология имеет свои достоинства и недостатки [1].

В настоящей работе рассматривается пятиуровневый каскадный инвертор напряжения (рис. 1), позволяющий в случае выхода из строя какого-либо силового ключа зашунтировать соответствующую H-мостовую ячейку и продолжить работу преобразователя при сниженной мощности, что повышает надежность функционирования такой системы. Кроме того, в данной топологии отсутствует проблема поддержания заданного уровня напряжения на конденсаторе звена постоянного тока [1].

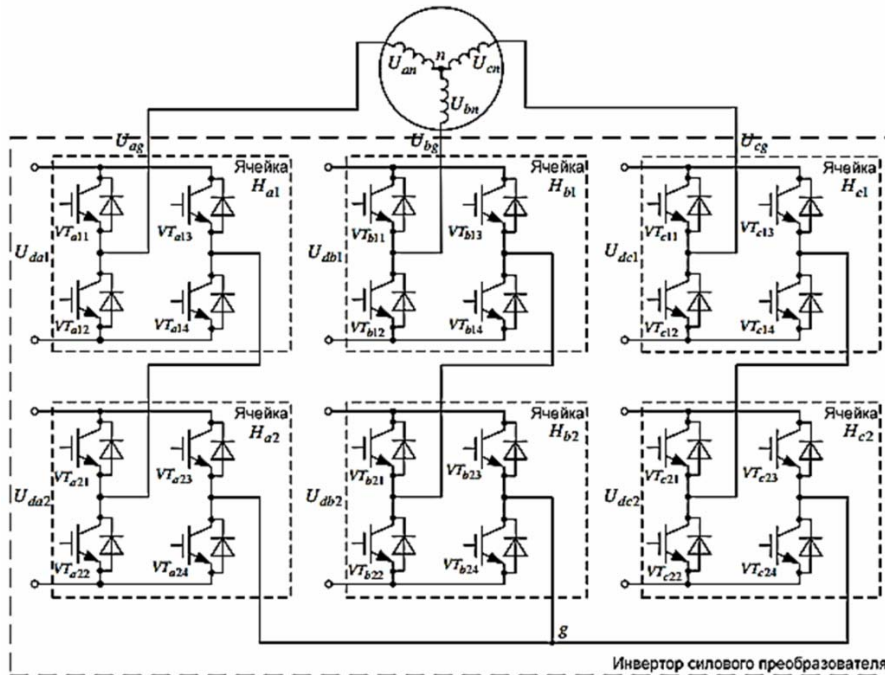


Рис. 1

Снижение уровня пульсаций тока в нагрузке и источнике питания достигается не только за счет выбора топологии преобразователя, но также за счет совершенствования алгоритмов управления силовыми ключами. В последнее время большое внимание уделяется исследованию алгоритмов пространственно-векторной модуляции (ПВМ), отличающейся высоким уровнем основной гармоники выходного напряжения, низким коэффициентом искажения тока в нагрузке, меньшими коммутационными потерями и хорошей совместимостью с микропроцессорными системами управления. Однако повысить качество формируемого напряжения и тока нагрузки можно и с применением классических алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) за счет перехода от постоянной частоты модуляции к переменной.

Так как инвертор напряжения является импульсным преобразователем частоты, то помимо гладкой составляющей основной гармоники напряжения и тока он создает в нагрузке высокочастотные пульсации, частота которых кратна частоте коммутации силовых ключей. Генерируемые пульсации тока, в свою очередь, неизбежно приводят к пульсациям момента двигателя, что крайне нежелательно для приборного электропривода [5—10].

Следует отметить, что вращающий момент электрической машины является векторным произведением потокосцепления ротора и тока статора. В машинах переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов потокосцепление ротора практически постоянно и величина электромагнитного момента определяется вектором тока статора. Эту величину легко измерить и на этой основе выбрать критерий оценки качества преобразования энергии инвертором. Спектральные оценки качества, такие как суммарный коэффициент гармонических составляющих (THD, total harmonic distortion) или коэффициент искажений, некорректно от-

ражают процессы во временной области и не могут использоваться в задачах оптимизации работы преобразователей частоты. Наиболее точно оценить пульсации модуля вектора тока позволяет коэффициент вариации CV (*coefficient of variation*), представляющий собой отношение среднеквадратичного значения пульсаций к среднему значению модуля вектора тока за период основной гармоники [1, 7, 8].

Алгоритмы широтно-импульсной модуляции. В современной практике широко используются ПВМ, синусоидальная ШИМ (СШИМ), ШИМ с пассивной фазой (ПФШИМ, *discontinuous modulation*) и ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой (ПШИМ) (рис. 2).

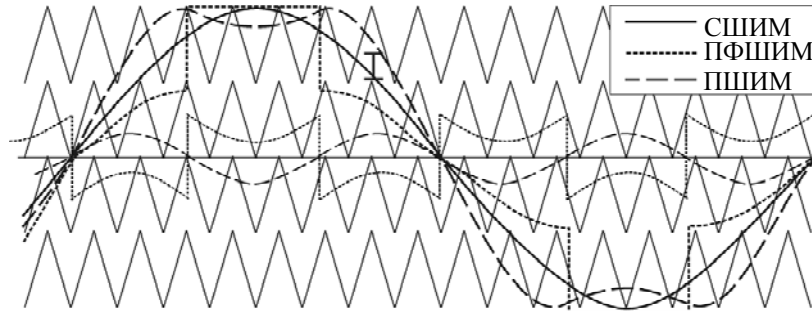


Рис. 2

При ПВМ возможные состояния инвертора представляются в виде базовых векторов (БВ). Концы БВ делят плоскость на треугольные равносторонние сегменты и секторы, расположенные между фазными осями. При этом сигнал модуляции также представляется вектором $U^* = U^* e^{j\vartheta^*}$, вращающимся внутри области, ограниченной БВ. При этом модуль вектора U^* определяет среднее за период развертки фазное напряжение, равное его проекции на соответствующую фазную ось. На рис. 3 представлена плоскость БВ для пятиуровневого инвертора напряжения. Числа в вершинах сегментов обозначают суммарные относительные значения напряжений H-мостов в соответствующих последовательных фазных соединениях [7, 11, 12].

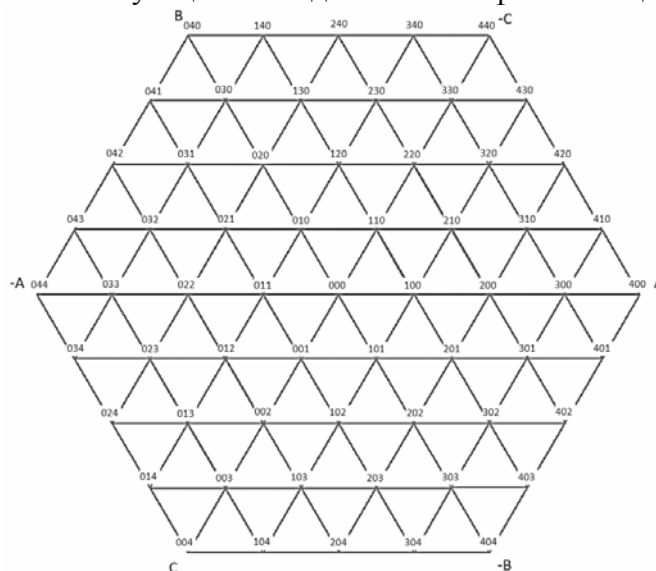


Рис. 3

Для формирования требуемого среднего напряжения в фазах инвертора необходимо последовательно формировать БВ вершин сегмента, в котором находится конец вектора модуляции. Длительность формирования БВ пропорциональна косоугольным проекциям вектора модуляции на соответствующие стороны сегмента. При реализации алгоритма ПВМ число последовательностей формирования базовых векторов избыточно, т. к. направление и точка начала обхода сегмента могут быть любыми. В результате для любого сегмента можно реализовать шесть возможных алгоритмов ПВМ [7, 8].

В свою очередь, изменение траектории обхода БВ внутри сегмента будет приводить к изменению формы годографа вектора тока статора, что непременно повлечет за собой изменение амплитуды его пульсаций [7, 8, 13].

Для сохранения формы годографа вектора тока выбор последовательности переключения БВ следует выполнять в соответствии с направлением вращения вектора модуляции U^* [7, 8].

Пульсации вектора тока при различных видах модуляции. Результаты моделирования для всех возможных комбинаций траекторий обхода БВ внутри сегментов при ПВМ представлены на рис. 4. Точки, находящиеся в выделенной области, соответствуют коэффициентам вариации обобщенного вектора тока статора при изменении индекса модуляции амплитуды Ma . Математическое моделирование производилось в пакете программ *Mat-Lab/Simulink*, частота ШИМ 2 кГц, коэффициент мощности нагрузки 0,7, частота основной гармоники 50 Гц. В качестве нагрузки инвертора использовалась симметричная RL -цепь, так как ЭДС вращения следящего электропривода практически равна нулю [7, 8, 14].

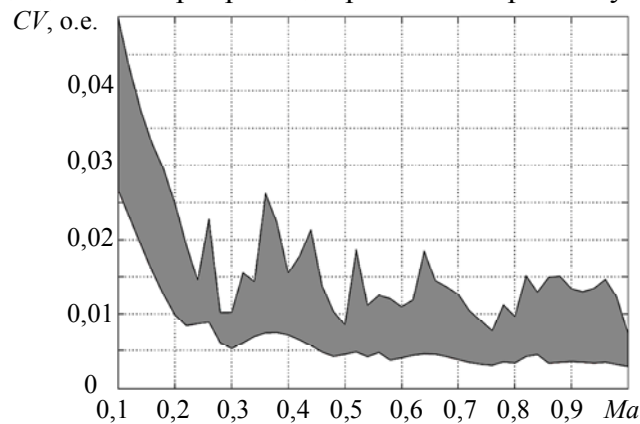


Рис. 4

Из рис. 4 видно, что при значениях индекса модуляции, соответствующих переходу вектора U^* из одной зоны модуляции в другую ($Ma = 0,25; 0,5; 0,75$), пульсации вектора тока статора изменяются скачкообразно, что, в свою очередь, обусловлено изменением алгоритма коммутации силовых ключей в пределах сегмента. Очевидно, что управление инвертором можно организовать так, чтобы при изменении зоны модуляции изменялся алгоритм коммутации в соответствии с минимальными значениями CV . Поэтому в дальнейшем при сравнении алгоритмов управления будет рассматриваться только кривая, соответствующая нижней границе области на рис. 4.

При СШИМ в многоуровневом инверторе напряжения сигналы управления для силовых ключей можно формировать путем сравнения синусоидального сигнала задания с расположенными друг над другом сигналами развертки, пределы изменения которых разграничивают нормированный диапазон изменения сигнала модуляции на равные области (см. рис. 2). Число сигналов развертки зависит от числа уровней преобразователя и для пятиуровневого инвертора соответственно равно четырем [5, 8].

Аналогичным образом, за счет добавления к синусоидальному сигналу задания соответствующих предмодулирующих сигналов с частотой третьей гармоники реализуются ПШИМ и ПФШИМ (см. рис. 2), что позволяет обеспечить увеличение основной гармоники выходного напряжения инвертора примерно на 15,5 % [13].

На рис. 5, а представлены результаты моделирования при фиксированной частоте модуляции 2 кГц. Из полученных данных следует, что ПШИМ обеспечивает наименьший коэффициент вариации практически во всем рассматриваемом диапазоне, особенно при $Ma < 0,5$. При этом наибольшее значение CV соответствует ПФШИМ.

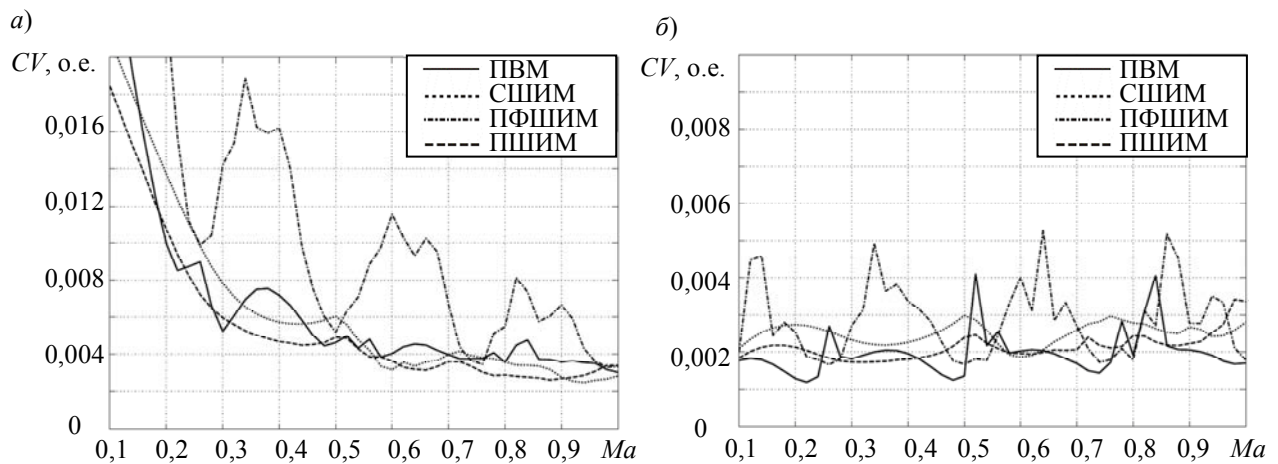


Рис. 5

Важно отметить, что с уменьшением индекса модуляции амплитуды преобразуемая инвертором мощность уменьшается, что ведет к соответствующему уменьшению потерь в самом преобразователе. Следовательно, если обеспечить изменение частоты коммутации обратно пропорционально напряжению задания, то можно уменьшить пульсации вектора тока во всем диапазоне регулирования, не превышая при этом допустимый уровень рассеиваемой мощности в силовых ключах преобразователя частоты.

Полученные результаты моделирования при изменении частоты ШИМ от 2 до 20 кГц представлены на рис 5, б. Видно, что при всех видах ШИМ увеличение частоты коммутации приводит к уменьшению коэффициента вариации тока статора во всем диапазоне изменения индекса модуляции относительно результатов, полученных при фиксированной частоте ШИМ. Сопоставив коэффициент вариации для ПШИМ с результатами, полученными для ПВМ, можно сделать вывод, что ПВМ является менее предпочтительным решением, так как в точках перехода вектора задания U^* из одной зоны модуляции в другую возникает скачкообразное изменение уровня пульсаций тока нагрузки, однако при глубоком регулировании, когда инвертор переходит в двухуровневый режим работы ($Ma < 0,25$), ПВМ обеспечивает наименьший уровень пульсаций тока. Как и в случае с постоянной частотой развертки, алгоритм ПФШИМ формирует годограф тока с наибольшими пульсациями во всем рассматриваемом диапазоне.

Таким образом, регулирование частоты развертки позволяет существенно уменьшить пульсации вектора тока нагрузки. Так, для алгоритмов СШИМ и ПШИМ значения коэффициента вариации при $Ma = 0,1$ уменьшаются в десять раз, т. е. обратно пропорционально увеличению частоты. Из результатов моделирования также следует, что при регулировании частоты модуляции значения коэффициента вариации для всех рассмотренных алгоритмов имеют практически постоянное среднее значение во всем диапазоне изменения индекса модуляции (см. рис. 5, б), в то время как при алгоритмах с постоянной частотой модуляции для $Ma < 0,25$ резко увеличиваются пульсации модуля вектора тока, что соответствует переходу инвертора в двухуровневый режим работы.

Влияние мертвого времени на характеристики инвертора. Как отмечалось выше, многоуровневый инвертор позволяет расширить диапазон регулирования напряжения на нагрузке, что, в свою очередь, приводит к расширению диапазона регулирования скорости:

$$D = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}}; \Omega_{\min} \sim \gamma_{\min} U_d, \quad (2)$$

где Ω_{\max} и Ω_{\min} — максимальная и минимальная скорости вращения при постоянной нагрузке на валу двигателя; γ_{\min} — минимальная относительная длительность формируемых импульсов ШИМ, U_d — величина напряжения в звене постоянного тока [7—9].

Ограничение диапазона линейного регулирования связано с наличием в системе мертвого времени, зависящего от конечного времени переключения силовых ключей. Такая задержка существенно влияет на линейность регулировочной характеристики инвертора напряжения при малых значениях индекса модуляции, когда длительность управляющих импульсов становится соизмеримой с величиной мертвого времени. При этом важно отметить, что величина мертвого времени не только определяет зону нечувствительности, но и приводит к снижению амплитуды основной гармоники выходного напряжения и тока во всем диапазоне регулирования [10, 12].

Уменьшение величины коммутируемого напряжения U_d (за счет увеличения числа уровней) при фиксированном значении мертвого времени позволяет пропорционально снизить минимальную величину основной гармоники формируемого тока и напряжения инвертора, увеличивая тем самым диапазон регулирования скорости и момента электропривода. Более того, применение ключей, рассчитанных на меньшее рабочее напряжение, обеспечивает уменьшение мертвого времени, что дополнительно позволяет сократить область нечувствительности регулировочной характеристики [10, 12].

На рис. 6 представлены результаты моделирования для двухуровневого (1) и пятиуровневого (2) инверторов напряжения при частоте модуляции 20 кГц и величине мертвого времени 2 мкс (I_c — ток статора, 3 — идеальная регулировочная характеристика инвертора). Из полученных результатов видно, что величина зоны нечувствительности для пятиуровневого инвертора уменьшилась в четыре раза, т.е. примерно во столько раз, во сколько уменьшилась величина коммутируемого напряжения.

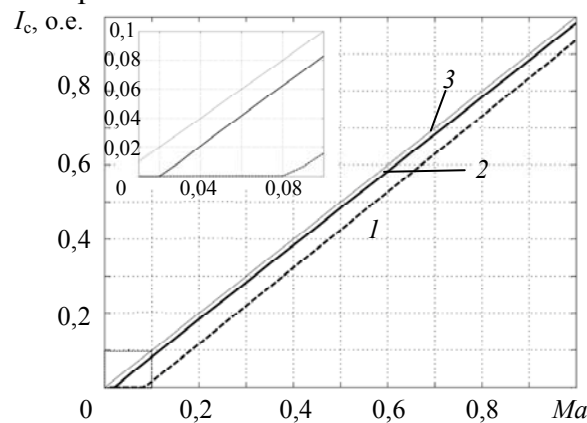


Рис. 6

Следует, однако, заметить, что величина нелинейности регулировочной характеристики определяется соотношением величин мертвого времени и периода ШИМ, поэтому максимальную частоту модуляции при глубоком регулировании скорости следует ограничивать, что, в свою очередь, ограничивает эффективность алгоритмов ШИМ с переменной частотой модуляции.

Заключение. По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1) при ПВМ изменение последовательности формирования базовых векторов существенно влияет на величину пульсаций вектора тока нагрузки, что необходимо учитывать при создании алгоритмов;

2) пульсации вектора тока при ПВМ скачкообразно изменяются при переходе вектора модуляции из одного сегмента в другой и из одной зоны модуляции в другую, что может вызывать нежелательные резонансные явления в приборном приводе;

3) регулирование частоты модуляции ШИМ позволяет существенно снизить размах вариации пульсаций вектора тока и обеспечить практически одинаковое среднее значение пульсаций во всем диапазоне регулирования выходного напряжения при всех алгоритмах мо-

дуляции. При этом ПВМ в двухуровневом режиме работы инвертора обеспечивает существенно меньшие пульсации;

4) из результатов моделирования следует, что синусоидальная ШИМ и ШИМ с модуляцией третьей гармоникой обеспечивают меньший размах вариации пульсаций, связанных с изменением уровня модуляции, т.е. возмущающее воздействие этих алгоритмов на систему управления приводом при глубоком регулировании существенно меньше, чем в случае ПВМ и ШИМ с пассивной фазой;

5) применение многоуровневых инверторов напряжения позволяет уменьшить зону нечувствительности регулировочной характеристики и, как следствие, расширить диапазон регулирования скорости электропривода практически пропорционально увеличению числа уровней преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А. Проблемы и особенности использования многоуровневых инверторов в системах прецизионного сервопривода // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1052—1059.
2. Мильский К., Остриров В. Рациональные схемы преобразователей частоты для мощных синхронных индукторных электроприводов // Электронные компоненты. 2008. № 11. С. 26—31.
3. Лазарев Г. Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных схем // Новости электротехники. 2005. № 2(32). С. 30—36.
4. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 43—46.
5. Карташев Е., Колтаков А. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 57—65.
6. Кумаков Ю. А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. 2005. № 6(36). С. 27—38.
7. Tomasov V. S., Usoltsev A. A., Vertegel D. A., Strzelecki R. Space vector modulation in multilevel inverters of the servo drives of the trajectory measurements telescopes // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 624—634. DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-7-624-634.
8. Zolov P., Poliakov N., Tomasov V., Usoltsev A. Perspectives and Peculiarities of Space Vector Modulation Implementation in Precision Electric Drives with Induction and Synchronous Machines // 10th Intern. Conf. on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018. P. 90—98.
9. Михеев К. Е., Томасов В. С. Анализ энергетически показателей многоуровневых полупроводниковых преобразователей систем электропривода // Науч.-техн. вестн. ИТМО. 2012. № 1(77). С. 46—53.
10. Томасов В. С., Ловлин С. Ю., Тушев С. А., Смирнов Н. А. Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода // Вестн. ИГЭУ. 2013. № 1. С. 84—87.
11. Семенов В. В., Стрункин Г. Н., Попов С. А. Потери мощности в инверторах с однополярной и двуполярной широтно-импульсной модуляцией // Электротехника и электроэнергетика. 2007. № 1. С. 25—28.
12. Seyed Saeed Fazel. Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications. Technische Universität Berlin, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010.
13. Чаплыгин Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. М.: МЭИ, 2009. 56 с.
14. Усольцев А. А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 164 с.

Сведения об авторах

Валентин Сергеевич Томасов

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; научно-производственный центр „Прецизионная электромеханика“, директор;
E-mail: tomasov@ets.ifmo.ru

- Александр Анатольевич Усольцев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: uaa@ets.ifmo.ru
- Константин Михайлович Денисов** — Университет ИТМО, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: denisov@ets.ifmo.ru
- Денис Александрович Вертегел** — Университет ИТМО, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: vertegeldenis@gmail.com

Поступила в редакцию
25.12.18 г.

Ссылка для цитирования: Томасов В. С., Усольцев А. А., Денисов К. М., Вертегел Д. А. Использование пространственно-векторной ШИМ с переменной частотой в многоуровневых инверторах систем прецизионного электропривода // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 355—363.

USING SPACE-VECTOR PWM WITH VARIABLE MODULATION FREQUENCY IN MULTILEVEL INVERTERS OF PRECISION ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

V. S. Tomasov, A. A. Usoltsev, K. M. Denisov, D. A. Vertegel

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: vertegeldenis@gmail.com

Pulsations of load current vector are investigated for various inverter control algorithms with the use of a mathematical model of five-level inverter. It is shown that space-vector modulation has a number of features that need to be taken into account when developing control algorithms aimed at minimization of current pulsations in a wide range of output voltage control. A disadvantage inherent in this modulation method is noted, which consists in an abrupt change in the magnitude of the current pulsations when switching from one modulation level to another, which can lead to resonance phenomena in the instrument drive. While the changes in the pulsations level of are inherent in all modulation algorithms, for sinusoidal PWM and PWM with third harmonic injection, the changes are shown to be significantly smaller and not so abrupt. Current pulsations as a function of the output voltage index are also investigated, and variable frequency modulation is shown to significantly reduce the range of variation of current vector pulsations and provide almost the same average value throughout the entire output voltage control range for all modulation algorithms. The result allows to consider the space-vector modulation as an alternative to sinusoidal PWM and PWM with third harmonic injection in a wide voltage control range. The effect of dead time on the dead zone of the inverter regulation characteristic and, as a result, on the control range of rotation velocity of the electric drive is investigated. An increase in the number of levels is shown to reduce almost proportionally the dead zone and thereby extend the control range.

Keywords: multilevel voltage inverters, current pulsations, modulation algorithms, instrument AC drive

REFERENCES

1. Tomasov V.S., Usoltsev A.A., Vertegel D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 12(61), pp. 1052–1059. (in Russ.)
2. Mil'skiy K., Ostrirov V. *Electronic Components*, 2008, no. 11, pp. 26–31. (in Russ.)
3. Lazarev G.B. *Electrical Engineering News*, 2005, no. 2(32), pp. 30–36. (in Russ.)
4. Donskoy N., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. *Power electronics*, 2008, no. 1, pp. 43–46. (in Russ.)
5. Kartashev E., Kolpakov A. *Power electronics*, 2009, no. 2, pp. 57–65. (in Russ.)
6. Kumakov Yu.A. *Electrical Engineering News*, 2005, no. 6(36), pp. 27–38. (in Russ.)
7. Tomasov V.S., Usoltsev A.A., Vertegel D.A., Strzelecki R. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 7(60), pp. 624–634. DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-7-624-634. (in Russ.)
8. Zolov P., Poliakov N., Tomasov V., Usoltsev A. 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, pp. 90–98.
9. Mikheyev K.E., Tomasov V.S. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 1(77), pp. 46–53. (in Russ.)
10. Tomasov V.S., Lovlin S.Yu., Tushev S.A., Smirnov N.A. *Vestnik IGEU*, 2013, no. 1, pp. 84–87 (in Russ.)
11. Semenov V.V., Strunkin G.N., Popov S.A. *Electrotechnics and Electroenergetics*, 2007, no. 1, pp. 25–28. (in Russ.)
12. Seyed Saeed Fazel. *Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications*, Technische Universität Berlin, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010.
13. Chaplygin E.E. *Spektral'noye modelirovaniye preobrazovateley s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey*

- (Spectral Modeling of Converters with Pulse-Width Modulation), Moscow, 2009, 56 p. (in Russ.)
14. Usol'tsev A.A. *Sovremennyy asinkhronnyy elektroprivod optiko-mekhanicheskikh kompleksov* (Modern Asynchronous Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes), St. Petersburg, 2011, 164 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|--|
| Valentin S. Tomasov | — | PhD; ITMO University, Research and Production Center "Precision Electromechanics"; Director of the Center;
E-mail: tomasov@ets.ifmo.ru |
| Alexander A. Usoltsev | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Electrotechnics and Precision Electromechanical Systems;
E-mail: uaa@ets.ifmo.ru |
| Konstantin M. Denisov | — | ITMO University, Department of Electrotechnics and Precision Electromechanical Systems; E-mail: denisov@ets.ifmo.ru |
| Denis A. Vertegel | — | ITMO University, Department of Electrotechnics and Precision Electromechanical Systems; E-mail: vertegeldenis@gmail.com |

For citation: Tomasov V. S., Usoltsev A. A., Denisov K. M., Vertegel D. A. Using space-vector PWM with variable modulation frequency in multilevel inverters of precision electric drive systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 355—363 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-355-363