
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.341.572
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1052-1059

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ В СИСТЕМАХ ПРЕЦИЗИОННОГО СЕРВОПРИВОДА

В. С. ТОМАСОВ, А. А. УСОЛЬЦЕВ, Д. А. ВЕРТЕГЕЛ

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

Проанализирована целесообразность применения многоуровневых инверторов в системах прецизионного сервопривода, обусловленная повышенными требованиями к надежности, точности, диапазону регулирования скорости и момента, а также энергоэффективности подобных систем. Исследованы достоинства и недостатки основных топологий многоуровневых инверторов, а также результаты математического моделирования, полученные в среде MatLab/Simulink. Для сравнения гармонического состава тока, формируемого различными топологиями преобразователей, предлагается использовать коэффициент вариации обобщенного вектора тока статора. Применение многоуровневых топологий инверторов напряжения позволяет расширить диапазон регулирования выходного напряжения, уменьшить влияние мертвого времени, использовать ключи, рассчитанные на меньшее рабочее напряжение, а также улучшить гармонический состав формируемого тока, что непосредственно влияет на снижение пульсаций электромагнитного момента. Результаты исследований позволяют сделать вывод, что применение многоуровневых инверторов в системах прецизионного электропривода имеет преимущества по сравнению с использованием традиционных двухуровневых топологий.

Ключевые слова: *многоуровневые инверторы напряжения, пульсации тока, алгоритмы модуляции, коммутационные потери, приборный электропривод*

Введение. Многоуровневые инверторы напряжения сочетают в себе свойства широтной и амплитудной модуляции и, как правило, применяются в высоковольтных источниках питания, так как позволяют снизить рабочие напряжения ключей и конденсаторов и существенным образом улучшить гармонический состав напряжения и тока нагрузки.

К основным достоинствам многоуровневых инверторов, по сравнению с классическими двухуровневыми топологиями, следует отнести:

- 1) исключение необходимости использовать дорогостоящие высоковольтные ключи, которые характеризуются малой надежностью и большими коммутационными потерями;
- 2) обеспечение высоких энергетических показателей качества за счет формирования многоступенчатой кривой выходного напряжения [1—3].

На сегодняшний день многоуровневые топологии находят все более широкое применение в преобразователях различных высоковольтных систем, например, ветроэнергетических установок. Подобная тенденция обусловлена ростом мощности ветрогенераторов, что неизбежно приводит к увеличению рабочих напряжений с целью снижения токовых нагрузок на линии электропередач. Многоуровневые инверторы позволяют использовать полупроводни-

ковые ключи, рассчитанные на меньшие рабочие напряжения, тем самым повышая надежность, КПД и энергоэффективность всей системы [4].

При работе широтно-импульсных преобразователей частоты генерируются нежелательные высокочастотные гармоники напряжения и тока. Это обусловлено тем, что принцип функционирования силовых преобразователей частоты основан на импульсном режиме работы полупроводниковых ключей, в связи с чем помимо гладкой составляющей основной гармоники напряжения и тока формируются высокочастотные пульсации. Это приводит к пульсациям момента частотно-регулируемых электроприводов (что является крайне нежелательным для приборного электропривода) ложным срабатываниям аппаратуры релейной защиты и автоматики, перегрузке нулевого провода, выходу из строя блоков питания, силовых конденсаторов и компенсационных установок, а также к повышенному нагреву изоляции электрических машин и помехам в работе систем управления и контрольно-измерительных приборов [1—5].

Применение многоуровневых преобразователей частоты позволяет формировать многоступенчатый выходной сигнал, который с увеличением числа уровней приближается к синусоидальному. Благодаря этому меньше искажается форма генерируемых преобразователем напряжения и тока, что, в свою очередь, позволяет обеспечить наилучшие энергетические показатели как на стороне нагрузки, так и на стороне сети. Основными показателями качества электроэнергии при этом, как правило, являются спектральные критерии — коэффициенты искажения тока и напряжения, именуемые в англоязычной литературе THD (*total harmonic distortion*):

$$\text{THD}_U = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2} / U_1; \quad \text{THD}_I = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2} / I_1. \quad (1)$$

Эти критерии оперируют только действующими значениями тока I_k и напряжения U_k , фазовый спектр высших гармоник не учитывается. Такую оценку допустимо использовать только для источников питания общего применения. В том случае, если в качестве нагрузки выступает частотно-регулируемый электропривод, который в сущности является активно-индуктивной нагрузкой, параметры которой зависят от режима работы и изменяются в широких пределах, эти критерии не могут обеспечить корректной оценки [6].

Важно отметить, что за счет коммутации более низких напряжений многоуровневые преобразователи обеспечивают лучшую электромагнитную совместимость, что позволяет исключить дорогостоящие и габаритные сетевые фильтры [2, 5].

Применение многоуровневых инверторов напряжения в прецизионном сервоприводе целесообразно:

1) с целью расширения диапазона регулирования скорости за счет получения более низкого значения минимальной скорости, пропорционального произведению минимально возможной длительности импульсов ШИМ γ_{\min} и величины коммутируемого напряжения источника питания U_d (U_d — величина коммутируемого напряжения питания только одного уровня). Разделение напряжения источника питания на n уровней позволяет в n раз снизить минимальное возможное напряжение на нагрузке, а следовательно и минимально реализуемую скорость электропривода, и расширить диапазон регулирования напряжения на нагрузке:

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

где w_{\max} и w_{\min} — максимальная и минимальная скорость вращения при постоянной нагрузке на валу двигателя [3, 7].

2) с целью минимизации мертвого времени и зоны нечувствительности регулировочной характеристики инвертора. Наличие мертвого времени в системе обусловлено задержками переключения силовых ключей преобразователя. Как уже было отмечено выше, многоуровневые инверторы позволяют использовать полупроводниковые ключи, рассчитанные на меньшие рабочие напряжения и обладающие меньшим временем переключения. В свою очередь, зона нечувствительности регулировочной характеристики ограничивает диапазон линейного регулирования выходного напряжения и тока инвертора. Таким образом, использование низковольтных ключей позволяет расширить диапазон регулирования напряжения и тока за счет снижения зоны нечувствительности регулировочной характеристики преобразователя [8].

В таблице сравниваются параметры МОП-транзисторов линейки N-Channel Power MOSFET (Infineon Technologies).

Параметр	Рабочее напряжение ключа, В			
	150		300	
	BSB165N15NZ3G	BSZ900N15NS3G	IPP410N30N	BSC13DN30NSFD
Ток стока, А	45	14	44	16
Сопротивление канала ключа в открытом состоянии, мОм	13,1	74	36	114
Время включения, нс	20	8	25	12
Время выключения, нс	24	11	51	23

На рис. 1 представлены результаты моделирования для двухуровневого и пятиуровневого инверторов напряжения при ШИМ с предмодуляцией третьей гармоники [12], частота модуляции 20 кГц, мертвое время 2 мкс, частота основной гармоники 50 Гц (I_s — ток статора, M_a — индекс модуляции амплитуды). Моделирование производилось в пакете программ *MatLab/Simulink*. Из полученных результатов видно, что зона нечувствительности для многоуровневого инвертора уменьшилась в четыре раза. Нелинейность в виде мертвого времени приводит также к снижению основной гармоники выходного напряжения и тока инвертора для пятиуровневой топологии на 2 %, для двухуровневой — ≈ 8 %;

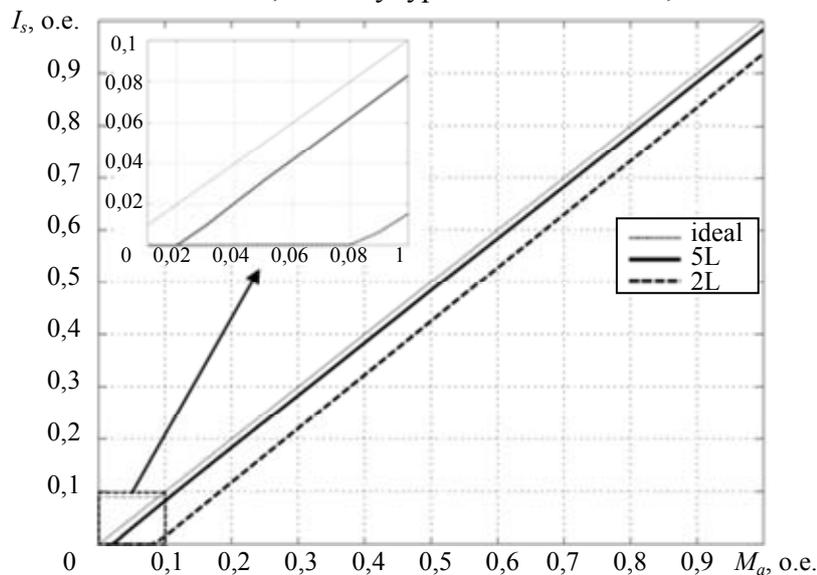


Рис. 1

3) с целью уменьшения коммутационных потерь, которые при идентичной нагрузке и одинаковых параметрах звена постоянного тока, прежде всего, зависят от частоты коммутации и времени переключения силовых ключей [9].

Многоуровневые инверторы формируют многоступенчатое выходное напряжение, форма кривой которого с увеличением числа уровней приближается к синусоидальной, следовательно, для получения идентичного качества формируемого тока требуется меньшая частота коммутации, чем в двухуровневом инверторе, что также ведет к снижению коммутационных потерь в преобразователе.

Важно отметить, что помимо коммутационных в преобразователе также присутствуют статические потери, обусловленные сопротивлением открытого канала ключей. Увеличение числа последовательно соединенных ключей в многоуровневых инверторах должно приводить к росту статических потерь, однако ключи, рассчитанные на меньшие напряжения, в свою очередь, имеют меньшие значения сопротивления открытого канала (см. таблицу), что во многих случаях оказывает обратный эффект [10].

Однако рост внутреннего сопротивления преобразователя за счет увеличения числа последовательно включенных полупроводниковых ключей может приводить не только к увеличению статических потерь многоуровневых инверторов напряжения, но и к искажению регулировочной характеристики преобразователя и формы генерируемых токов, вследствие падения напряжения на силовых ключах. На рис. 2 представлены зависимости относительного тока фазы без учета искажения напряжения инвертора 1 и с учетом 2 [8].

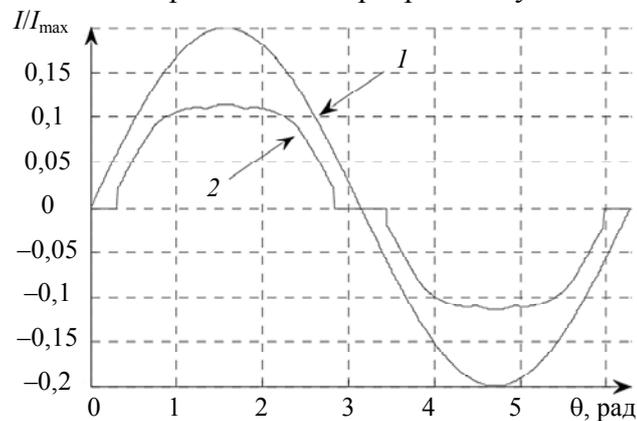


Рис. 2

К качеству выходного тока (момента) прецизионных сервоприводов для высокоточных комплексов различного назначения предъявляются высокие требования с целью обеспечения минимальной погрешности воспроизведения энергетическим каналом преобразователя управляющего сигнала, как правило, синусоидальной формы [6, 7].

В зависимости от числа уровней базовых векторов напряжения на выходе преобразователя, а также способа формирования выходного напряжения можно выделить две основные схемы многоуровневых преобразователей:

- с блокирующими диодами;
- каскадная на H-мостах [3].

Топология многоуровневого инвертора с блокирующими диодами реализуется путем последовательного соединения в каждой фазной стойке преобразователя полностью управляемых ключей, шунтированных обратными диодами, при этом источник звена постоянного тока разделяется на уровни с помощью последовательно включенных конденсаторов одинаковой емкости. Блокирующие диоды необходимы для соединения средних точек полумостов инвертора с промежуточными уровнями напряжения, формируемыми на конденсаторах звена постоянного тока. На рис. 3 представлена схема трехуровневого инвертора с блокирующими диодами [7, 11].

К достоинствам такой топологии следует отнести использование меньшего числа конденсаторов и только одного источника питания в звене постоянного тока, что существенно сказывается на стоимости и габаритах инвертора. К недостаткам относятся сложность

поддержания заданного уровня напряжения на конденсаторах звена постоянного тока, а также большее в сравнении с другими топологиями суммарное число полупроводниковых компонентов [7, 11].

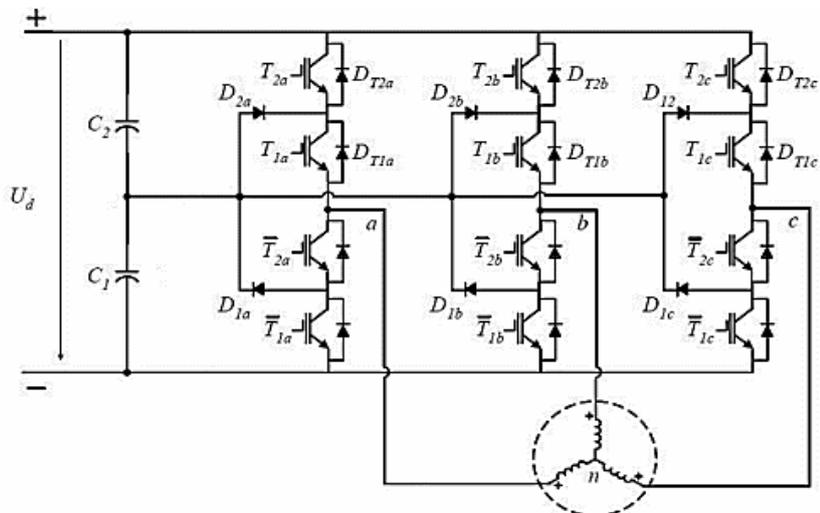


Рис. 3

Построение каскадного преобразователя основывается на последовательном соединении H-мостовых ячеек в его фазах (рис. 4). В отличие от рассмотренной выше топологии, в данной каждая ячейка запитывается от индивидуального изолированного источника постоянного напряжения, поэтому на входе каждой ячейки, как правило, устанавливается выпрямитель, который работает от отдельной вторичной обмотки многообмоточного трансформатора. Каждая H-мостовая ячейка представляет собой трехуровневый преобразователь, так как относительно общей точки и вывода позволяет формировать три уровня напряжения: U_d , $-U_d$ и 0 [4, 7, 11].

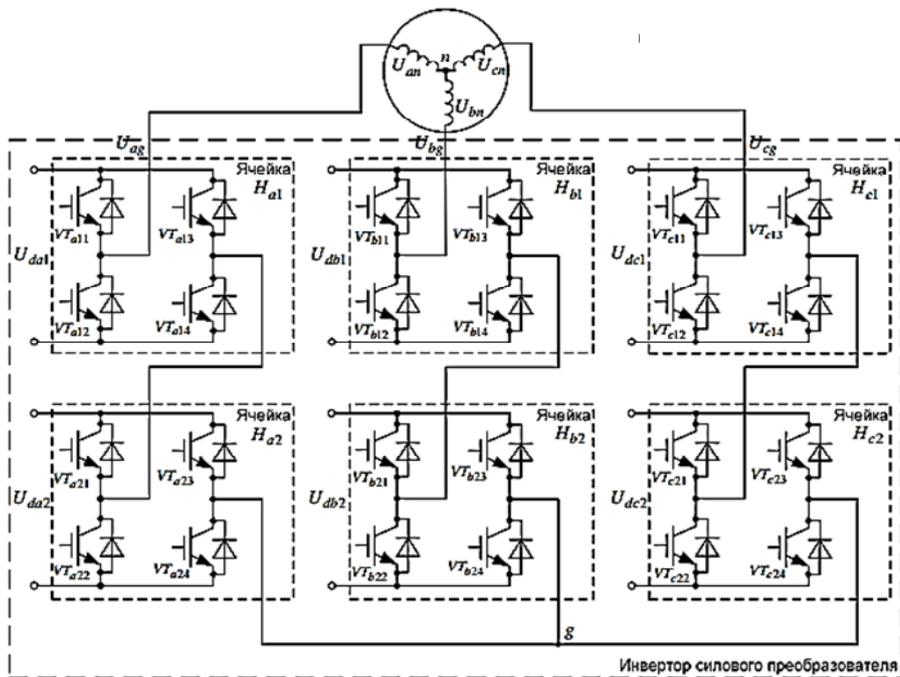


Рис. 4

Существенными достоинствами такой схемы являются отсутствие необходимости в поддержании определенного уровня напряжения на конденсаторе звена постоянного тока, а также возможность продолжить работу преобразователя на сниженной мощности в случае выхода из строя любой H-мостовой ячейки. Основным недостатком является необходимость использования сложного многообмоточного трансформатора [7, 11].

Как результат, каждая топология имеет свои достоинства и недостатки, однако на сегодняшний день наиболее широко применяется схема с блокирующими диодами. Основной задачей любого преобразователя частоты прецизионного сервопривода является формирование кругового годографа вектора тока. В свою очередь, из выражения для электромагнитного момента синхронного двигателя

$$M = C|\mathbf{I}|\sin\varphi, \quad (3)$$

(C — постоянный коэффициент, учитывающий потокосцепление ротора, \mathbf{I} — обобщенный вектор тока статора, φ — угол между векторами тока статора и потокосцепления ротора) следует, что пульсации момента пропорциональны пульсациям модуля вектора тока статора, в связи с чем и оценку качества предлагается производить по величине этих пульсаций.

Подобную оценку возможно выполнить, используя коэффициент вариации (CV — *Coefficient of Variation*) вектора тока статора, который в отличие от THD вычисляется именно по мгновенным значениям гармоник тока, что обеспечивает учет не только амплитудного, но и фазового спектра пульсаций:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (|\mathbf{I}(t)| - |\bar{\mathbf{I}}|)^2 dt}}{|\bar{\mathbf{I}}|}, \quad (4)$$

где $|\bar{\mathbf{I}}| = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} |\mathbf{I}(t)| dt$ — среднее значение модуля за период основной гармоники тока T_1 в установленном режиме работы [6, 13].

На рис. 5 представлены результаты моделирования для двух- и пятиуровневого инверторов напряжения при ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, работающих на симметричную пассивную RL -нагрузку с $\cos\varphi=0,7$. Частота модуляции ШИМ 2 кГц, частота основной гармоники 50 Гц. Использование в качестве нагрузки пассивной RL -цепи объясняется тем, что ЭДС вращения моментного электропривода практически равна нулю [6, 13].

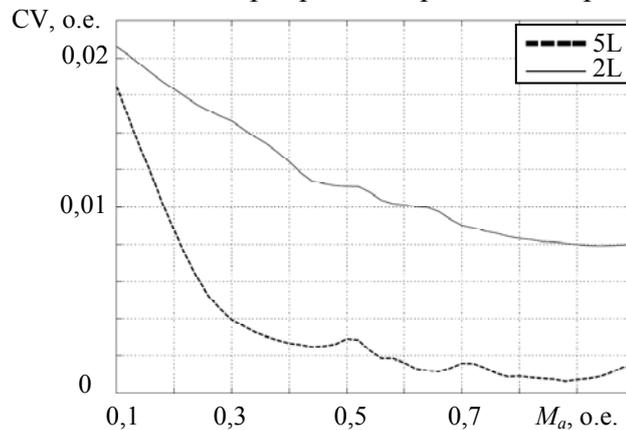


Рис. 5

Из графика видно, что при идентичных параметрах нагрузки многоуровневый инвертор обеспечивает существенно меньшие пульсации модуля вектора тока во всем рассматриваемом диапазоне изменения индекса модуляции амплитуды M_a . Как следствие, обеспечиваются меньшие пульсации электромагнитного момента сервопривода и повышается точность его работы, что является одной из основных задач при проектировании приборных приводов.

Заключение. Таким образом, по сравнению с классическими двухуровневыми топологиями многоуровневые инверторы напряжения имеют ряд существенных преимуществ, к которым относятся расширение диапазона регулирования выходного напряжения, снижение уровня пульсаций формируемого тока и достижение высокой энергоэффективности. В связи с

этим многоуровневые преобразователи являются перспективным решением для реализации систем прецизионного электропривода, несмотря на большое количество полупроводниковых элементов и относительную сложность схем и алгоритмов управления, и в настоящее время они становятся все более востребованными в различных источниках питания малой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильский К., Остриров В. Рациональные схемы преобразователей частоты для мощных синхронных индукторных электроприводов // Электронные компоненты. 2008. № 11. С. 26—31.
2. Лазарев Г. Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных схем // Новости электротехники. 2005. № 2(32). С. 30—36.
3. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 43—46.
4. Карташев Е., Колпаков А. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 57—65.
5. Кумаков Ю. А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. 2005. № 6(36). С. 27—38.
6. 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.
7. Михеев К. Е., Томасов В. С. Анализ энергетически показателей многоуровневых полупроводниковых преобразователей систем электропривода // Науч.-техн. вестн. ИТМО. 2012. № 1(77). С. 46—53.
8. 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.
9. Воронин И. Интегральный силовой модуль IGBT для трехуровневых инверторов напряжения с повышенной эффективностью преобразования электроэнергии // Силовая электроника. 2013. № 6.
10. Семенов В. В., Струнkin Г. Н., Попов С. А. Потери мощности в инверторах с однополярной и двуполярной широтно-импульсной модуляцией // Электротехника и электроэнергетика. 2007. № 1. С. 25—28.
11. Чаплыгин Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. М.: МЭИ, 2009. 56 с.
12. 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 научно-производственного центра; 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
- Денис Александрович Вертегел** — Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: vertegeldenis@gmail.com

Поступила в редакцию
06.08.18 г.

Ссылка для цитирования: Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А. Особенности использования многоуровневых инверторов в системах прецизионного сервопривода // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1052—1059.

FEATURES OF USING MULTILEVEL INVERTERS IN PRECISION SERVO SYSTEMS

V. S. Tomasov , A. A. Usoltsev , D. A. Vertegel

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: vertegeldenis@gmail.com

The expediency of application of multilevel inverters in systems of the precision servo drive, caused by the increased requirements to reliability, accuracy, a range of regulation of speed and the moment, and energy efficiency of similar systems is considered. The advantages and disadvantages of the main topologies of multilevel inverters are studied, results of mathematical modeling obtained in MatLab/Simulink are analyzed. To compare the harmonic composition of the current formed by different transducer topologies, it is proposed to use the coefficient of variation of the generalized stator current vector. The use of multi-level topologies of voltage inverters allows to expand the range of output voltage regulation, to reduce the influence of dead time, to use keys designed for lower operating voltage, as well as to improve the harmonic composition of the generated current, which directly affects the reduction of electromagnetic moment pulsations. Based on the research results, it is concluded that the use of multi-level inverters in precision electric drive systems has advantages over the use of traditional two-level topologies.

Keywords: multilevel voltage inverters, current pulsations, modulation algorithms, switching losses, instrumental electric drive

REFERENCES

1. Mil'skiy K., Ostrirov V. *Electronic Components*, 2008, no. 11, pp. 26–31. (in Russ.)
2. Lazarev G.B. *Electrical Engineering News*, 2005, no. 2(32), pp. 30–36. (in Russ.)
3. Donskoy N., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. *Power electronics*, 2008, no. 1, pp. 43–46. (in Russ.)
4. Kartashev E., Kolpakov A. *Power electronics*, 2009, no. 2, pp. 57–65. (in Russ.)
5. Kumakov Yu.A. *Electrical Engineering News*, 2005, no. 6(36), pp. 27–38. (in Russ.)
6. 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.)
7. 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.)
8. Tomasov V.S., Lovlin S.Yu., Tushev S.A., Smirnov N.A. *Vestnik IGEU*, 2013, no. 1, pp. 84–87 (in Russ.)
9. Voronin I. *Power electronics*, 2013, no. 6. (in Russ.)
10. Semenov V.V., Strunkin G.N., Popov S.A. *Electrotechnics and Electroenergetics*, 2007, no. 1, pp. 25–28. (in Russ.)
11. 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.)
12. 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, Associate Professor; ITMO University, Research and Production Center "Precision Electromechanics"; Director of the Center; E-mail: info@npp-itb.spb.ru |
| Aleksander A. Usoltsev | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Electro-technics and Precision Electromechanical Systems; E-mail: info@npp-itb.spb.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., Vertegel D. A. Features of using multilevel inverters in precision servo systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 12. P. 1052—1059 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1052-1059