

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ СКВОЗНЫХ ТОКОВ В ТРЕХФАЗНОМ МОСТОВОМ ИНВЕРТОРЕ

Ле Д.Т.*, Аверин С.В.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

* e-mail: letiep1@mail.ru

** e-mail: acb@mai.ru

Предложен алгоритм управления формирования напряжения на обмотках асинхронного двигателя с помощью векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Приведено сравнение предложенного способа с традиционным; показано, что разработанный алгоритм с использованием дополнительных векторов позволил исключить сквозные токи первого рода, уменьшить амплитуды высших гармоник, получить параметры фазных и линейных напряжений и токов, аналогичные известному способу. Проведено моделирование предложенного способа векторной ШИМ, которое показало, что синусоидальную форму тока фазы можно обеспечить не только увеличением числа формируемых векторов в секторе, но и введением дополнительных векторов.

Ключевые слова: трехфазный инвертор, ШИМ, векторная ШИМ, электропривод, асинхронный двигатель, сквозные токи.

Широтно-импульсная модуляция применяется в преобразовательной технике как способ формирования импульсного напряжения и регулирования его параметров. Известно большое число различных методов ШИМ, к достоинствам которых следует отнести: обеспечение широкого линейного диапазона модуляции; снижение потерь на переключение силовых ключей транзисторов; улучшение спектрального состава и простоту реализации. Один из способов реализации ШИМ при управлении асинхронного двигателя — формирование изображающего вектора напряжения статора. Этот метод применяется в подавляющем большинстве систем с пространственно-векторным формированием ШИМ.

Методология построения векторных модуляторов широко освещена в литературе [1, 2]. Она заключается в формировании изображающего вектора с помощью напряжений трех двухпозиционных ключей (стоек трехфазного мостового коммутатора), каждый из которых подключает соответствующую фазу нагрузки либо к положительному, либо к отрицательному полюсу источника постоянного напряжения U_{dc} [1] в зависимости от формируемого вектора (рис. 1).

Традиционно в режиме векторной ШИМ используются восемь известных базовых векторов V_0 ,

..., V_7 . Ранее в [9] с использованием карты Карно было показано, что такой способ формирования векторов во всех секторах приводит к возникновению сквозных токов в стойках инвертора, что недопустимо. Для устранения сквозных токов применяют задержку на включение очередного транзистора. При этом в обмотках статора формируется изображающий вектор, задаваемый включением только двух транзисторов. Рассмотрим такое состояние как способ формирования напряжения с новыми дополнительными векторами.

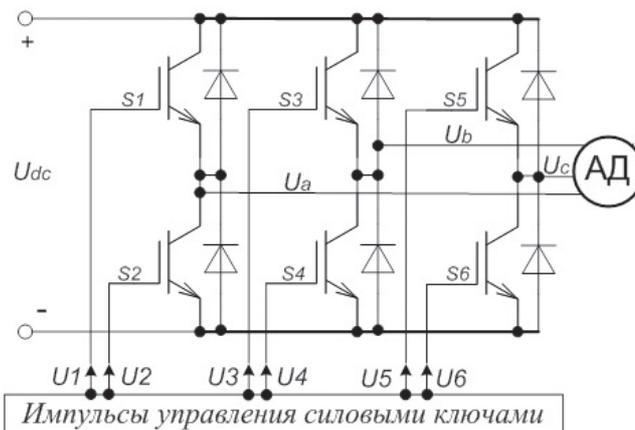


Рис. 1. Структура трехфазного инвертора

При формировании векторов пространственной ШИМ, кроме известных базовых векторов, будут использоваться следующие дополнительные векторы: V_1^* , V_1^{**} , V_2^* , V_2^{**} , V_4^* , V_4^{**} . Каждый дополнительный вектор однозначно характеризуется дополнительным трехразрядным двоичным кодом состояния, соответствующим определенным состояниям ключей инвертора, изображенным в табл. 1.

На рис. 2 показаны результирующие векторы в неподвижной системе координат.

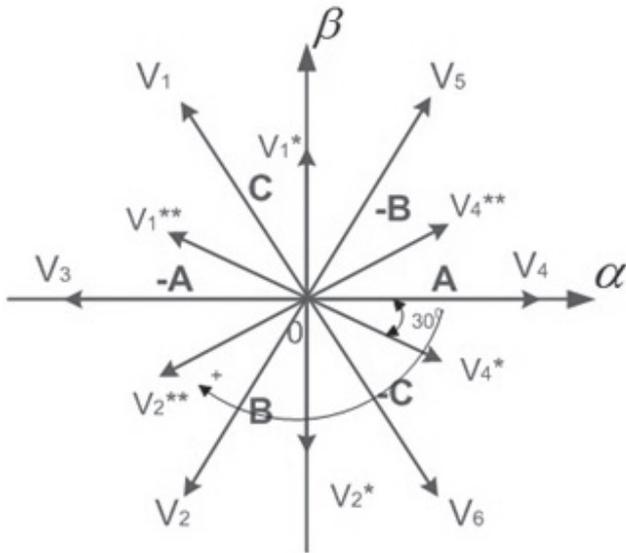


Рис. 2. Результирующие векторы в неподвижной системе координат

При формировании более одного вектора в секторе (рассмотрим для примера сектор, ограниченный векторами V_4 , V_6) порядок следования базовых векторов такой:

$$(V_0 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_7 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_0) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (V_0 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_7 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_0) \dots$$

В скобках сгруппированы базовые векторы, формирующие одно положение текущего вектора. Формирование векторов в остальных секторах аналогично.

На рис. 3 приведена временная диаграмма коммутации ключей S1...S6 при формировании традиционным способом двух векторов в секторе (V_4 , V_6) (в остальных секторах аналогично).

Предлагаемый способ заключается в использовании векторов V_4 , V_6 , V_2 , V_3 , V_1 , V_5 в качестве главных векторов для формирования любого текущего вектора в каждом из шести соответствующих секторов, а векторы V_4^{**} , V_4^* , V_2^* , V_2^{**} , V_1^{**} , V_1^* используются как промежуточные состояния при переходе главных векторов (V_4 , V_6 , V_2 , V_3 , V_1 , V_5) от одного к другому. В этом случае порядок перехода базовых векторов в секторе (V_4 , V_6) будет выглядеть так:

$$(V_4^* \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_4^* \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_4^* \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_4^*) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (V_4^* \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_4^* \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_4^* \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_4^*) \dots$$

Здесь длительность включения вектора V_4^* относительно мала по сравнению с временем существования главных векторов V_4 , V_6 .

Векторы в остальных секторах формируются аналогичным образом.

Временная диаграмма переключения ключей S1...S6 для базовых векторов в секторе (V_4 , V_6) представлена на рис. 4.

Анализ предложенного алгоритма проведен с помощью MATLAB. На рис. 5 представлена компьютерная модель реализации предложенного способа векторного управления. Здесь:

— блоки *VectorPWM OldMetod1*, *VectorPWM OldMetod3*, *VectorPWM OldMetod5* — блок программирования векторного ШИМ по известному способу при формировании соответствующих 1, 3, 5 векторов в секторе;

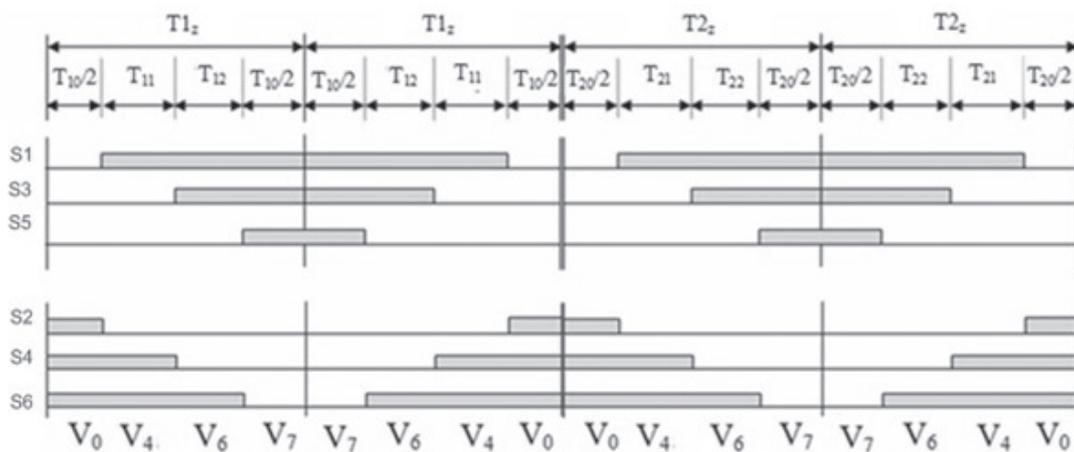


Рис. 3. Временные диаграммы составляющих базовых векторов в секторе (V_4 , V_6)

Таблица 1

Состояние ключей для формирования дополнительных векторов

Состояние ключей $S_1 S_3 S_5$ $S_2 S_4 S_6$	Схема нагрузки	Направление тока	Магнитные векторы	Фазные напряжения		
				U_a	U_b	U_c
0 0 1 0 1 0				0	$-\frac{1}{2}U_{dc}$	$\frac{1}{2}U_{dc}$
0 0 1 1 0 0				$-\frac{1}{2}U_{dc}$	0	$\frac{1}{2}U_{dc}$
0 1 0 0 0 1				0	$\frac{1}{2}U_{dc}$	$-\frac{1}{2}U_{dc}$
0 1 0 1 0 0				$-\frac{1}{2}U_{dc}$	$\frac{1}{2}U_{dc}$	0
1 0 0 0 0 1				$\frac{1}{2}U_{dc}$	0	$-\frac{1}{2}U_{dc}$
1 0 0 0 1 0				$\frac{1}{2}U_{dc}$	$-\frac{1}{2}U_{dc}$	0

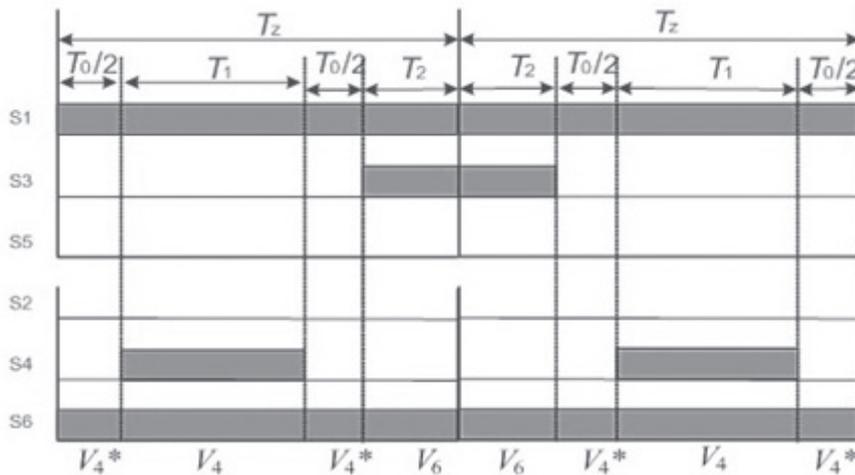


Рис. 4. Временная диаграмма составляющих базовых векторов при формировании вектора в секторе (V_4, V_6) по предлагаемому способу

— блоки *PWMvector NewMetodTG1, VectorPWM OldMetodTG3, VectorPWM OldMetodTG5* — блок программирования векторного ШИМ по новому способу при формировании соответствующих 1, 3, 5 векторов в секторе;

— блок *InvectorIGBT* — это блок трехфазного инвертора;

— резистор $R = 1 \Omega$, индуктивность $L = 0.001 \text{ H}$;

— блоки *TimePeriod* и *Timer* задают частоту формирования векторов.

Для формирования векторов напряжении используем следующие коэффициенты:

$$m = \frac{T_1}{T_2}, n = \frac{T_2}{T_z}, p_{0x} = \frac{T_{0x}}{T_z},$$

где T_{0x} — длительность включения векторов V_0, V_7 или V^* при формировании любого вектора напряжения. Обозначим $p = \sum p_{0x}$. Тогда $m + n + p = 1$.

а) Поясним работу модели на примере формирования одного вектора (рис. б).

Допустим, $V_p = V_i$ и T — время формирования векторов в одном секторе. Тогда $T_z = T$, где T_z —

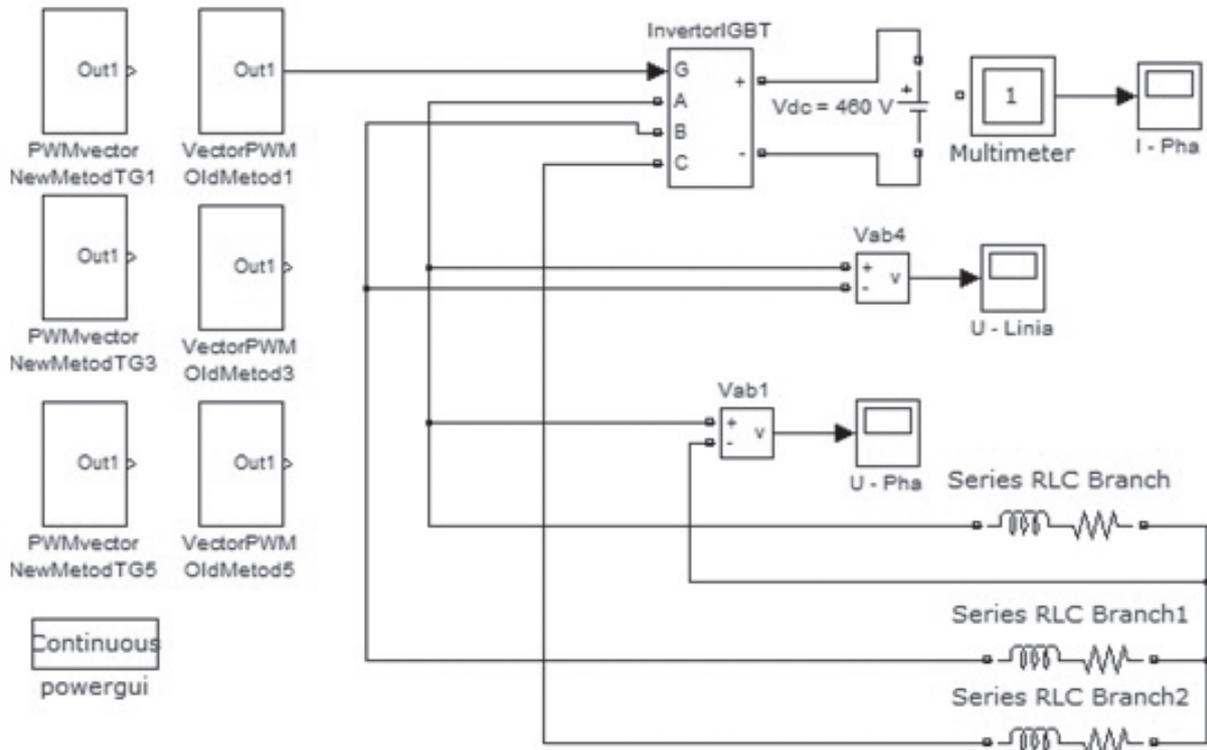


Рис. 5. Схема модели системы векторной ШИМ в Matlab Simulink

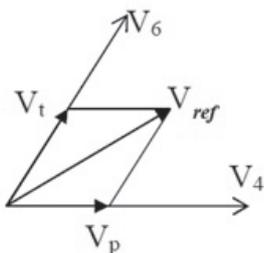


Рис. 6. Формирование одного вектора

время формирования одного вектора в одном секторе.

Коэффициенты, определяющие длительности включения векторов, приведены в табл. 2.

Результаты моделирования представлены на рис. 7–9.

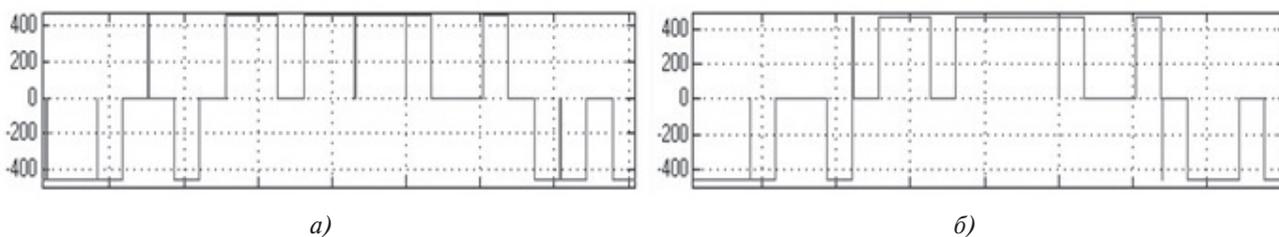


Рис. 7. Форма линейного напряжения: а — по традиционному способу; б — по предлагаемому способу

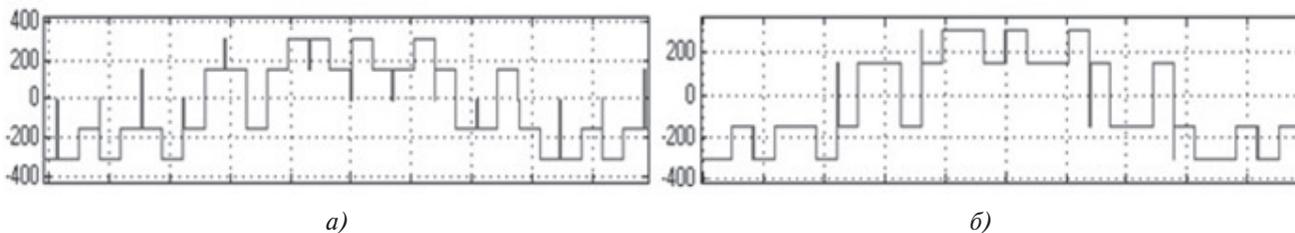


Рис. 8. Фазные напряжения: а — по традиционному способу; б — по предлагаемому способу

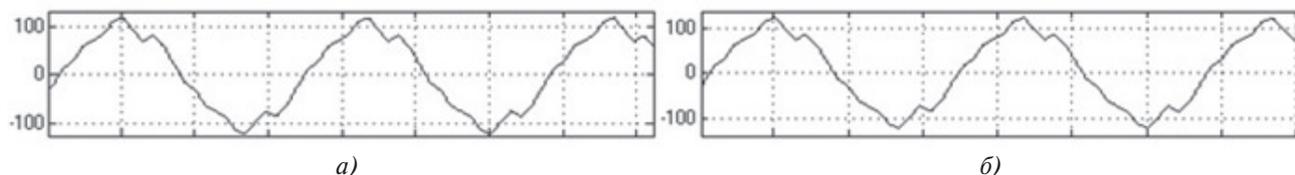


Рис. 9. Формы тока фазы: а — по традиционному способу; б — по предлагаемому способу

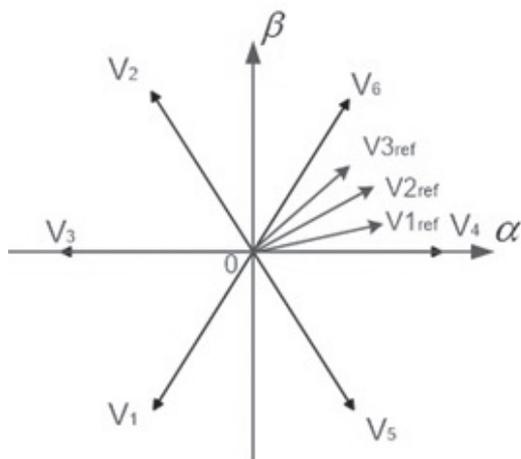


Рис. 10. Формирование трех векторов

б) Пример формирования трех векторов приведен на рис. 10.

Примем $T_z = T_{z1} = T_{z2} = T_{z3} = T/3$.

Коэффициенты, определяющие длительность включения векторов, приведены в табл. 3.

Результаты моделирования представлены на рис. 11–13.

в) На рис. 14 приведено формирование пяти векторов.

Примем $T_z = T_{z1} = T_{z2} = T_{z3} = T_{z4} = T_{z5}$.

Таблица 2

Коэффициенты времени существования векторов

Вектор	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>
V_{1ref}	0.49	0.49	0.02

Таблица 3

Коэффициенты времени существования векторов

Вектор	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>
V_{1ref}	0.69	0.29	0.02
V_{2ref}	0.49	0.49	0.02
V_{3ref}	0.29	0.69	0.02

Коэффициенты, определяющие длительность включения векторов, приведены в табл. 4.

Результаты моделирования представлены на рис. 15–17.

Результаты моделирования показывают, что при увеличении числа формируемых векторов в каждом секторе форма тока фазы все более приближается

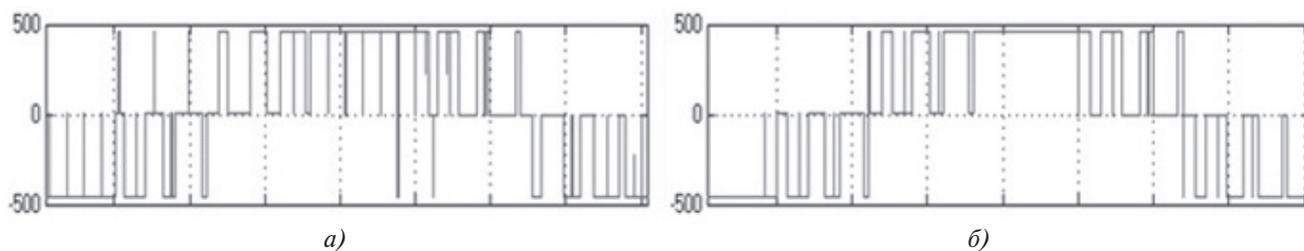


Рис. 11. Форма линейного напряжения: *a* — по традиционному способу; *б* — по предлагаемому способу

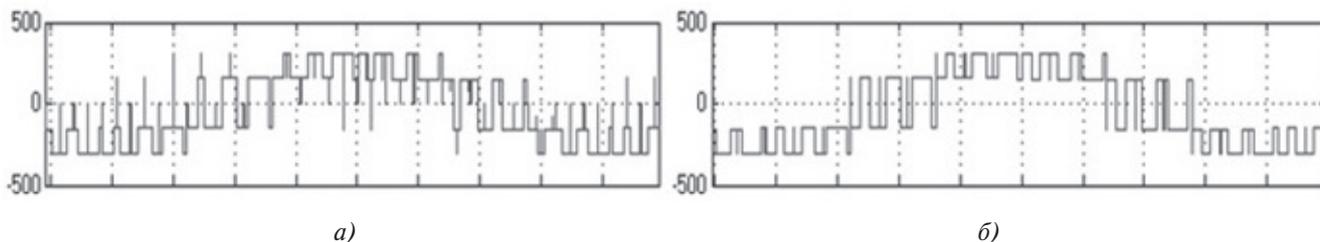


Рис. 12. Форма напряжения фазы: *a* — по традиционному способу; *б* — по предлагаемому способу

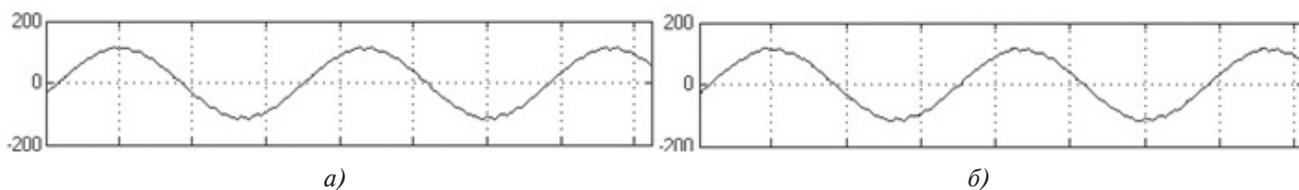


Рис. 13. Форма тока фазы: *a* — по традиционному способу; *б* — по предлагаемому способу

Таблица 4

Коэффициенты времени существования векторов

Вектор	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>
V_{1ref}	0.89	0.09	0.02
V_{2ref}	0.74	0.24	0.02
V_{3ref}	0.49	0.49	0.02
V_{4ref}	0.24	0.74	0.02
V_{5ref}	0.09	0.89	0.02

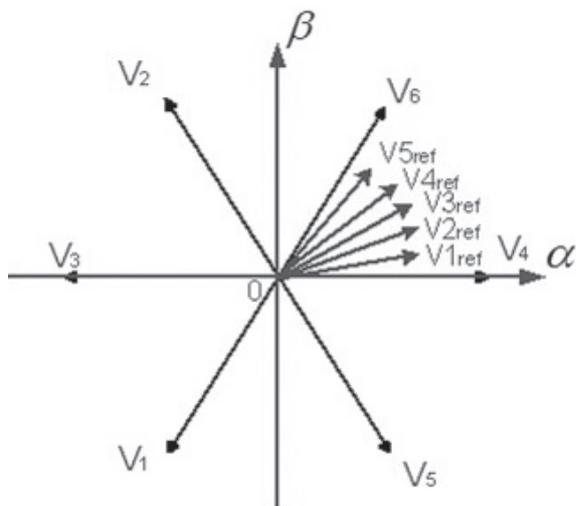


Рис. 14. Формирование пяти векторов в первом секторе

к синусоидальной. Сравнение традиционного и предлагаемого способов показывает, что можно получить все характеристики выходных фазного и

линейного напряжений и тока фаз, аналогичные традиционному способу, но при предлагаемом способе было устранено большее число высших гармоник по сравнению с традиционным. При проведении проверки на физическом макете [9] было показано, что этот алгоритм не приведет к «биению» вала двигателя. При этом ток потребления в инверторе меньше относительно традиционного способа векторной ШИМ.

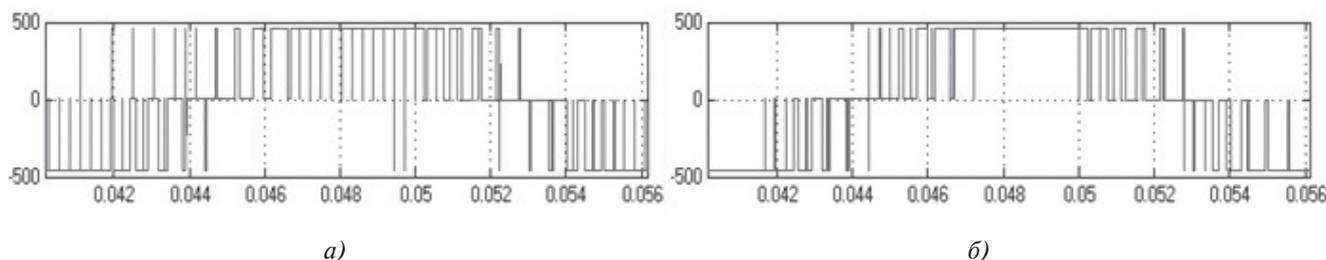


Рис. 15. Форма линейного напряжения: *a* — по традиционному способу; *б* — по предлагаемому способу

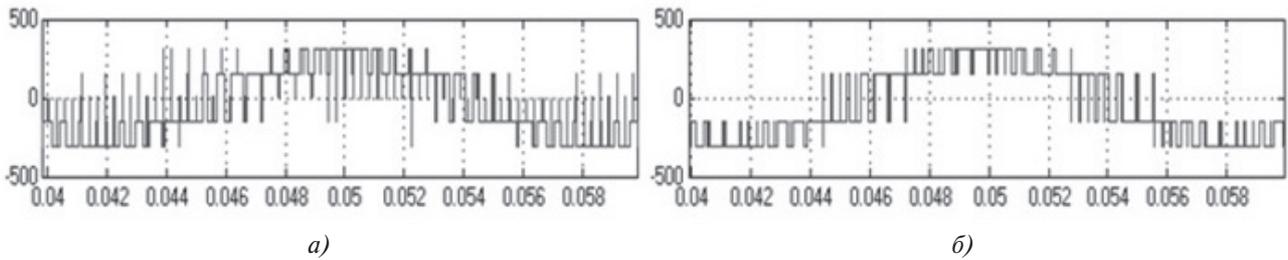


Рис. 16. Форма напряжения фазы: *a* — по традиционному способу; *б* — по предлагаемому способу

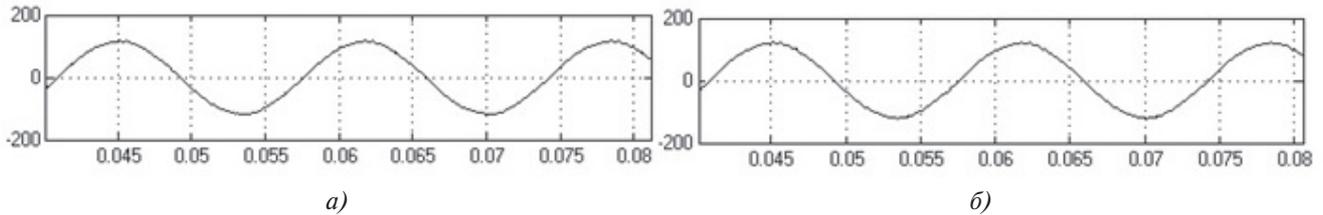


Рис. 17. Форма тока фазы: *a* — по традиционному способу; *б* — по предлагаемому способу

Чтобы оценить влияние дополнительных векторов V_i^* , V_i^{**} совместно с V_0 , V_7 на ток фазы, проведено моделирование постепенным увеличением времени существования этих векторов (параметр p), при этом отношение m/n поддерживается неизменным, как и в предыдущем случае. Результат моделирования представлен на рис. 18, 19.

форма тока более симметрична и стремится к синусоидальной.

Выводы

Использование векторной ШИМ по предлагаемому способу при времени существования промежуточных векторов, которые намного меньше от-

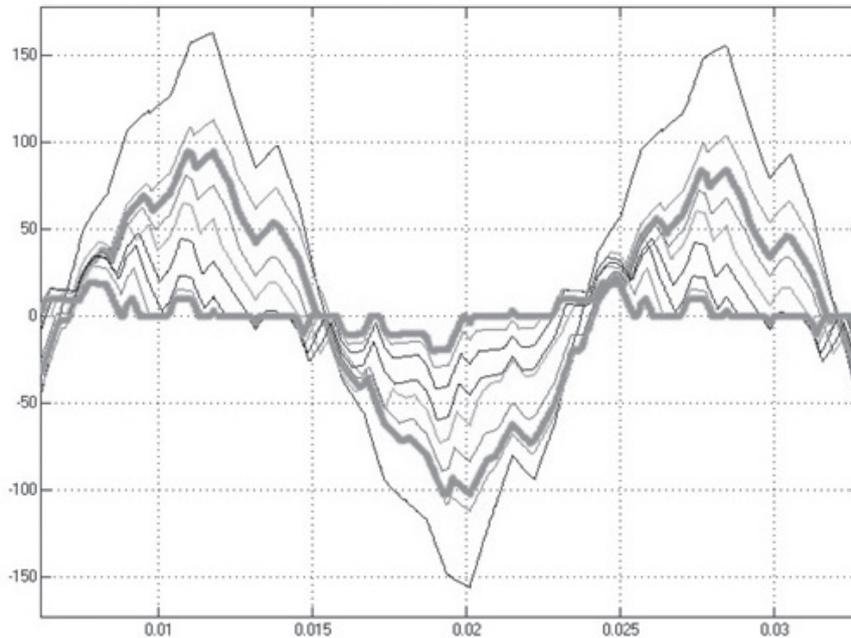


Рис. 18. Графики тока фазы при увеличении времени существования V_0 , V_7 при изменении параметра p в диапазоне 0.02, 0.1, 0.2, ..., 0.8

Анализ графиков рис. 12 и 13 показывает, что при увеличении времени существования V_0 , V_7 со значением p в диапазоне 0.02, 0.1, 0.2, ..., 0.8 амплитуда тока фазы уменьшается и становится менее плавной, но и при увеличении времени существования V_4^{**} , V_4^* , V_2^* , V_2^{**} , V_1^{**} , V_1^* вид графика и амплитуда тока фазы изменяются не существенно, но

носительно времени существования базовых векторов, позволяет не только обеспечить все хорошие характеристики традиционного способа векторной ШИМ, но и устранить многие его недостатки. Предложенный способ позволяет исключить сквозные токи, дает возможность использовать больше вариантов алгоритмов векторной ШИМ. Исполь-

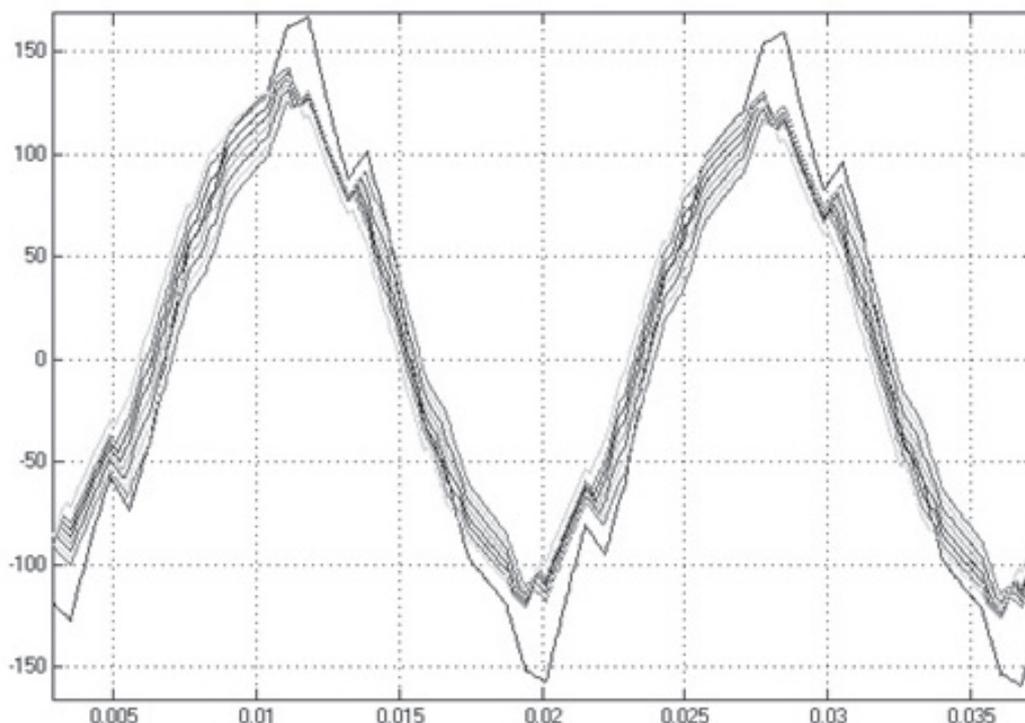


Рис. 19. Графики тока фазы при увеличении времени существования $V_4^{**}, V_4^*, V_2^*, V_2^{**}, V_1^{**}, V_1^*$ при изменении параметра p в диапазоне 0.02,0.1,0.2,...,0.8

зование промежуточных векторов позволяет получить ток фазы, близкой по форме к синусоидальной, не только увеличением числа формируемых векторов напряжения, но и регулированием времени существования дополнительных векторов $V_4^{**}, V_4^*, V_2^*, V_2^{**}, V_1^{**}, V_1^*$.

Библиографический список

1. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Способ управления автономным инвертором напряжения с векторной ШИМ // Практическая силовая электроника. 2010. № 39. С. 40-43.
2. Ogasawa S., Akagi H. and Nabae A. A Novel PWM Scheme of Voltage Source Inverter Based on Space Vector Theory. European Power Electronics Conference, Aachen, Germany. Oct. 1989, pp. 1197-1202.
3. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. Централизованные транзисторные преобразователи электроэнергии для систем электроснабжения летательных аппаратов / Под ред. Е.В. Машукова. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 183 с.
4. Попов Б.Н. Методы проектирования микропроцессорных устройств управления мехатронными модулями систем приводов: Дис. ... докт. техн. наук. — М., 2001. — 481 с.
5. Фам Туан Тхань. Разработка и исследование алгоритмов управления системой «Импульсный усилитель мощности — асинхронный двухфазный двигатель»: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 2005. — 188 с.

6. Попов Б.Н., Фам Туан Тхань. Устройства управления электродвигателями на платформе программируемой логики // Электронные компоненты. 2005. № 2. С. 69-76.
7. Попов Б.Н., Фам Т.Т. Логические автоматы управления электродвигателями на платформе программируемой логики // Труды МАИ. 2005. № 18. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34193>
8. Попов Б.Н. Анализ и синтез законов управления системой «Импульсный усилитель мощности электродвигатель» // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 1996. № 3. С. 163-170.
9. Ле Д.Т., Аверин С.В. Оптимизация алгоритмов коммутации в инверторах с векторной ШИМ // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 155-164.
10. Ле Д.Т. Использование карты Карно для оптимизации импульсного усилителя мощности асинхронного двигателя в режиме векторной широтно-импульсной модуляции // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2015»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2015. С. 182-183.
11. Ле Д.Т. Способ формирования напряжения векторной ШИМ для управления асинхронным двигателем // XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2016. Т. 1. С. 670-671.

GENERATION OF VECTOR PWM ENSURING THROUGH CURRENTS ELIMINATION IN THREE-PHASE BRIDGE INVERTER

Le D.T. *, Averin S.V. **

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

* e-mail: letiep1@mail.ru

** e-mail: acb@mai.ru

Abstract

The paper suggests a control algorithm for voltage generation at induction motor windings by vector PWM. It reveals specifics of conventional vector PWM algorithm. It is noted, that while through currents elimination with delay circuits a certain state occurs which allows identifying it as additional vector generation. The authors suggest a control algorithm with extra vectors generation as a through currents elimination technique. The paper compares the suggested technique with conventional, and demonstrates that the developed algorithm using extra vectors allowed eliminate through currents of a first genus, decrease amplitudes of high-order harmonics, and ensure phase and phase-to-phase voltages parameters similar to the conventional technique. Simulation of the suggested technique was carried out, and its results revealed that phase current sine waveform could be ensured not only by increasing the number of generated vectors in one sector, but also by introducing extra vectors.

Conventional and suggested techniques reveal that phase and phase-to-phase voltages characteristics as well as phase current are similar, but the number of high-order harmonics is less than with conventional one. The breadboard tests revealed that the developed algorithm did not lead to shaft whipping. Inverter input current herewith is less relative to the conventional vector PWM technique.

With on state of intermediate vectors significantly less than on state of base vectors the possibility to attain positive features peculiar to the conventional technique, but eliminate a number of its drawbacks. The suggested technique, in particular, allows eliminate through currents, and gives more possibilities of vector PWM implementation. Extra vectors on state duration control, rather than increasing the number of generated voltage vectors, allows ensure phase current shape more close to sinusoidal.

Keywords: three-phase inverter, pulse-width modulation, vector PWM, electric motor drive, induction motor, through currents.

References

1. Chaplygin E.E., Khukhtikov C.B. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2010, no. 39, pp. 40-43.
2. Ogasawa S., Akagi H. and Nabae A.A. Novel PWM Scheme of Voltage Source Inverter Based on Space Vector Theory. *European Power Electronics Conference, Aachen, Germany, October 1989*, pp. 1197-1202.
3. Mashukov E.V., Shevtsov D.A., Ul'yashchenko G.M. *Tsentralizovannyye tranzistornyye preobrazovateli elektroenergii dlya sistem elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* (Centralized power transistor converters for aircraft power supply systems), Moscow, MAI, 2013, 183 p.
4. Popov B.N. *Metody proektirovaniya mikroprotsessornykh ustroystv upravleniya mekhatronnymi modulyami sistem privodov* (Microprocessor based control units for drive systems mechatronic modules design methods), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2001, 481 p.
5. Fam Tuan Tkhan'. *Razrabotka i issledovanie algoritmov upravleniya sistemoi "Impul'snyi usilitel' moshchnosti - asinkhronnyi dvukhfaznyi dvigatel'"* (Design and study of "switched mode power amplifier —two-phase induction motor" system control algorithms), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2005, 188 p.
6. Popov B.N, Fam Tuan Tkhan'. *Elektronnye komponenty*, 2005, no. 2, pp. 69-76.
7. Popov B.N., Fam T.T. *Trudy MAI*, 2005, no. 18, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=34193>
8. Popov B.N. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1996, no. 3, pp. 169-170.
9. Le D.T., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 155-164.
10. Le D.T. *Materialy 14 Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika – 2015"*. Moscow, 2015, pp. 182-183.
11. Le D.T. *Materialy XLII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Gagarinskie chteniya"*. Moscow, 2016, vol. 1, pp. 670-671.