

УПРОЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

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*

Предложены алгоритмы формирования напряжения на обмотках асинхронного двигателя (АД) в режиме векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при регулировании частоты вращения АД, обеспечивающие меньшие объемы вычислений микроконтроллера и позволяющие исключить сквозные токи в инверторе. Для исключения сквозных токов используются промежуточные состояния инвертора, которые рассматриваются как переменные векторы в переходах переключения силовых ключей транзисторов инвертора. Приведены результаты имитационного моделирования предложенного алгоритма векторной ШИМ, которые показали её работоспособность. Показано, что полученные алгоритмы формирования с использованием предложенных состояний позволили исключить сквозные токи в цепи, уменьшить колебание скорости и момента двигателя, улучшить время быстрого действия электропривода. При одинаковых параметрах АД, для получения тех же характеристик электропривода по быстродействию и также синусоидальности тока статора, число формируемых векторов в каждом секторе незначительно больше, чем в традиционном.

Ключевые слова: векторная широтно-импульсная модуляция, электропривод асинхронного двигателя, трехфазный инвертор, силовой транзисторный ключ трехфазного инвертора.

Введение

Для управления АД при векторной ШИМ используются восемь состояний ключей инвертора [1–3], которые описываются восемью векторами: $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$, где индекс векторов является десятичным значением двоичных кодов состояния верхних ключей S1, S3, S5 инвертора (двоичные коды ключей S2, S4, S6 инверсны верхним ключам). В [4, 9–12] было показано, что такой способ формирования векторов без специальных мер приводит к возникновению сквозных токов в плечах инвертора, что недопустимо. Рассмотрим возможность использования дополнительных промежуточных состояний ключей, которые не приводят к возникновению сквозных токов в инверторе и позволяют включить их в алгоритм регулирования скорости АД в режиме векторной ШИМ.

Анализ переходов состояний инвертора

Для управления шестью ключами существуют $2^6 = 64$ состояния, из которых рабочими является

ограниченное число [5–8]. Обозначим на карте Карно все рабочие состояния символами V_{xy} и V_x , где V_x ($x = 0, 1, \dots, 7$) — базовые векторы; V_{xy} — остальные рабочие состояния ключей инвертора; x — десятичное значение двоичных кодов ключей S1, S3, S5; y — десятичное значение двоичных кодов ключей S2, S4, S6.

Отобразим все эти состояния ключей на карте Карно (рис. 1).

В традиционной векторной ШИМ [1–3] при формировании более одного вектора в секторе (рассмотрим для примера сектор, ограниченный векторами V_4, V_6), будет такой порядок следования базовых векторов:

$$(V_0 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_7 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_0) \Rightarrow \\ \Rightarrow (V_0 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_7 \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_0) \text{ и т.д.}$$

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

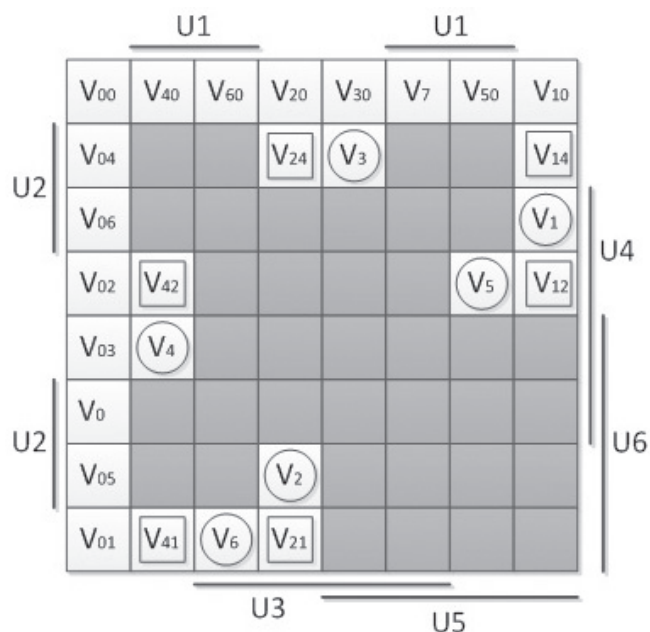


Рис. 1. Расположение всех рабочих состояний ключей инвертора на карте Карно

логично. При этом напряжение фазы А в секторе (V_4, V_6) при формировании одного вектора имеет форму, приведённую на рис. 2.

В секторе (V_4, V_6) шесть переключений: $(V_0 \Rightarrow V_4)$, $(V_4 \Rightarrow V_6)$, $(V_6 \Rightarrow V_7)$, $(V_7 \Rightarrow V_6)$, $(V_6 \Rightarrow V_4)$, $(V_4 \Rightarrow V_0)$. В [9, 12] было показано, что все эти переключения приводят к возникновению сквозного тока и для его исключения предложено использо-

вать дополнительные векторы V_{41} в переходах $(V_4 \Rightarrow V_6)$, $(V_6 \Rightarrow V_4)$. Для исключения сквозного тока в переходах $(V_0 \Rightarrow V_4)$, $(V_6 \Rightarrow V_7)$, $(V_7 \Rightarrow V_6)$, $(V_4 \Rightarrow V_0)$, как и в других секторах в переходах между нулевыми векторами (V_0, V_7) и ненулевыми базовыми векторами, предлагается использовать промежуточные состояния ключей, с которыми будем оперировать, как с векторами. Поскольку время существования промежуточных состояний зависит от параметров нагрузки, будем считать их переменными векторами: $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}, V_{10}, V_{20}, V_{30}, V_{40}, V_{50}, V_{60}$.

Реализация алгоритма векторной ШИМ с дополнительными векторами

Рассматривая состояния ключей на карте Карно (рис. 1), отметим следующее:

1) переходы между состояниями ключей векторов $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$ с нулевым вектором V_0 являются безопасными, доступными и не приводят к возникновению сквозного тока;

2) переходы между состояниями ключей векторов $V_{10}, V_{20}, V_{30}, V_{40}, V_{50}, V_{60}$ с нулевым вектором V_7 являются безопасными, доступными и не приводят к возникновению сквозного тока.

В этих двух вариантах можно использовать либо группу векторов $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$, либо $V_{10}, V_{20}, V_{30}, V_{40}, V_{50}, V_{60}$.

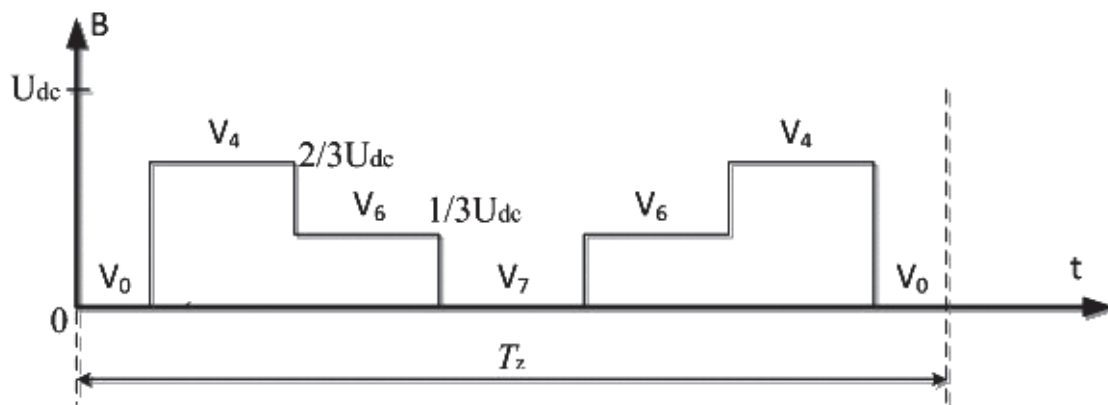


Рис. 2. Форма напряжения фаза в секторе (V_4, V_6) при формировании одного вектора

Дополнительные промежуточные состояния ключей

Векторы	V_{01}	V_{02}	V_{03}	V_{04}	V_{05}	V_{06}
S_1, S_3, S_5	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
S_2, S_4, S_6	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0
Векторы	V_{10}	V_{20}	V_{30}	V_{40}	V_{50}	V_{60}
S_1, S_3, S_5	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0
S_2, S_4, S_6	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0

При использовании этих двух групп наиболее перспективными являются следующие алгоритмы. Для группы векторов $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$ порядок базовых векторов при формировании любого вектора напряжения в секторах $(V_4, V_6), (V_6, V_2), (V_2, V_3), (V_3, V_1), (V_1, V_5), (V_5, V_4)$ следующий:

- + $V_0 \Rightarrow V_{03} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{41} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{41} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{03} \Rightarrow V_0$;
- + $V_0 \Rightarrow V_{01} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{21} \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_{21} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{01} \Rightarrow V_0$;
- + $V_0 \Rightarrow V_{05} \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_{24} \Rightarrow V_3 \Rightarrow V_{24} \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_{05} \Rightarrow V_0$;
- + $V_0 \Rightarrow V_{04} \Rightarrow V_3 \Rightarrow V_{14} \Rightarrow V_1 \Rightarrow V_{14} \Rightarrow V_3 \Rightarrow V_{04} \Rightarrow V_0$;
- + $V_0 \Rightarrow V_{06} \Rightarrow V_1 \Rightarrow V_{12} \Rightarrow V_5 \Rightarrow V_{12} \Rightarrow V_1 \Rightarrow V_{06} \Rightarrow V_0$;
- + $V_0 \Rightarrow V_{02} \Rightarrow V_5 \Rightarrow V_{42} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{42} \Rightarrow V_5 \Rightarrow V_{02} \Rightarrow V_0$.

Эти переходы изображены на карте Карно (рис. 3,а).

При использовании векторов $V_{10}, V_{20}, V_{30}, V_{40}, V_{50}, V_{60}$ порядок следования базовых векторов при формировании любого вектора напряжения в секторах $(V_4, V_6), (V_6, V_2), (V_2, V_3), (V_3, V_1), (V_1, V_5), (V_5, V_4)$ будет таким:

- + $V_7 \Rightarrow V_{40} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{41} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{41} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{40} \Rightarrow V_7$;
- + $V_7 \Rightarrow V_{60} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{21} \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_{21} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{60} \Rightarrow V_7$;
- + $V_7 \Rightarrow V_{20} \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_{24} \Rightarrow V_3 \Rightarrow V_{24} \Rightarrow V_2 \Rightarrow V_{20} \Rightarrow V_7$;
- + $V_7 \Rightarrow V_{30} \Rightarrow V_3 \Rightarrow V_{14} \Rightarrow V_1 \Rightarrow V_{14} \Rightarrow V_3 \Rightarrow V_{30} \Rightarrow V_7$;
- + $V_7 \Rightarrow V_{10} \Rightarrow V_1 \Rightarrow V_{12} \Rightarrow V_5 \Rightarrow V_{12} \Rightarrow V_1 \Rightarrow V_{10} \Rightarrow V_7$;
- + $V_7 \Rightarrow V_{50} \Rightarrow V_5 \Rightarrow V_{42} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{42} \Rightarrow V_5 \Rightarrow V_{50} \Rightarrow V_7$.

Так как длительность существования промежуточных состояний крайне мала по сравнению с базовыми векторами, их влиянием на направление и модуль формируемых векторов можно пренебречь.

Эти переходы изображены на рис. 3,б.

Подмножеством допустимых опасных двухсторонних переходов назовем совокупность таких переходов между допустимыми, при которых инвертируется хотя бы один слог управляющего слова [4]. Опасному переходу соответствует одновременное переключение двух ключей элементов одного плеча. Рис. 3 показывает, что все переходы между векторами при векторной ШИМ по двум предлагаемым алгоритмам параллельны сторонам карты Карно; это значит [4], что они не приводят к возникновению сквозных токов. Для регулирования параметров выходного напряжения и частоты двигателя в режиме векторной ШИМ рассмотрим алгоритм векторной ШИМ при использовании векторов: $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$. Тогда порядок следования базовых векторов при формировании любого вектора напряжения в секторах (V_4, V_6) будет таким:

$$V_0 \Rightarrow V_{03} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{41} \Rightarrow V_6 \Rightarrow V_{41} \Rightarrow V_4 \Rightarrow V_{03} \Rightarrow V_0.$$

Соответствующая временная диаграмма переключения силовых ключей при формировании вектора в секторе (V_4, V_6) приведена на рис. 4.

Параметры выходного напряжения и частоты в векторной ШИМ при формировании вектора в секторе, равном $2T_z$, будут рассмотрены только на ин-

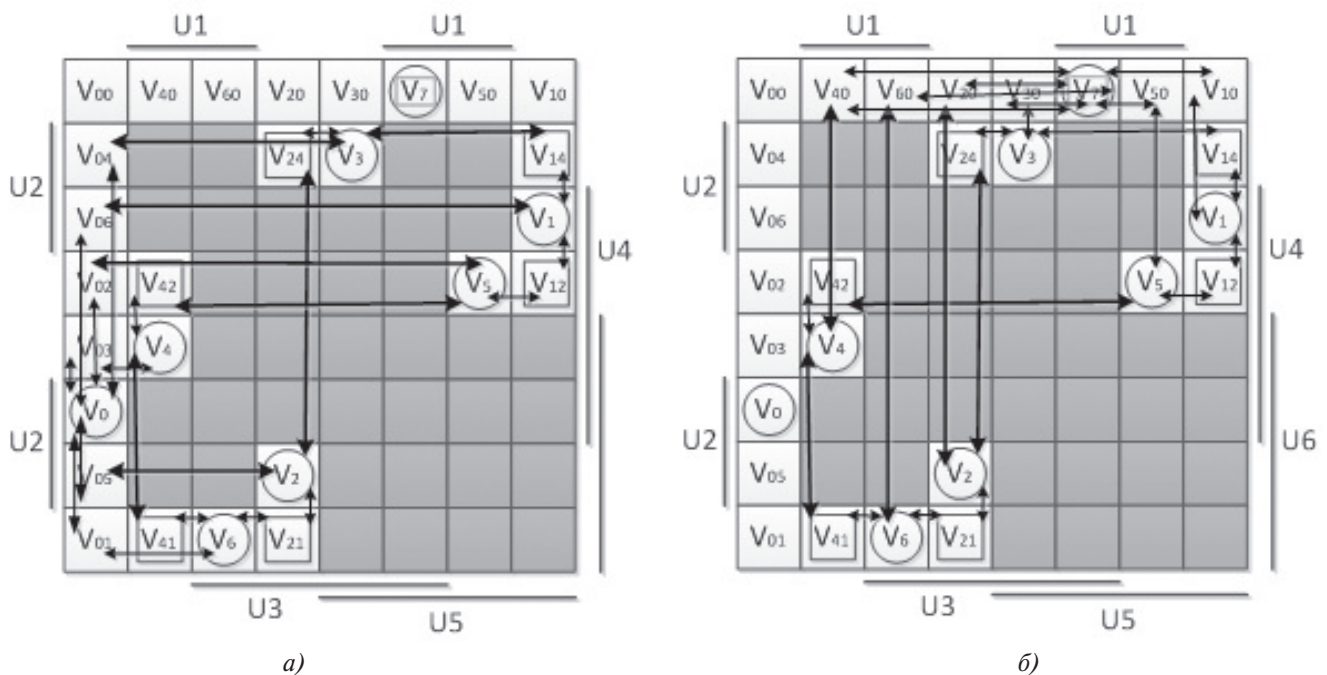


Рис. 3. Изображение переходов векторной ШИМ при использовании состояний: а — векторов $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$; б — векторов $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$

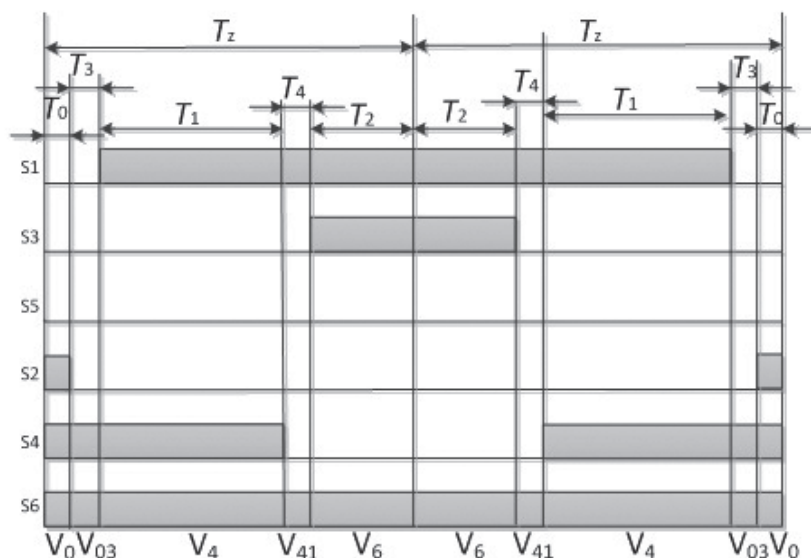


Рис. 4. Временная диаграмма переключения силовых ключей при формировании вектора в секторе (V_4, V_6)

тервале T_z . В остальных секторах формирование будет аналогичным.

При векторной ШИМ с таким алгоритмом и нулевой длительностью базового нулевого вектора V_0 , соответствующей номинальной частоте f_H , напряжение фазы А в секторе (V_4, V_6) имеет форму, приведенную на рис. 5. При этом скорость регулируемого АД максимальна.

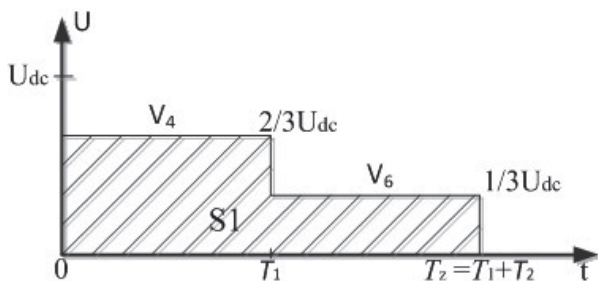


Рис. 5. Форма импульса напряжения фазы А в секторе (V_4, V_6) без использования V_0

Изменение длительности существования нулевого вектора V_0 регулирует амплитуду формируемого напряжения. При неизменном отношении T_{V4}/T_{V6} изменяется только модуль формируемого вектора без изменения направления. При этом напряжение фазы А в секторе (V_4, V_6) имеет форму, приведенную на рис. 6.

Тогда среднее значение напряжения в секторе (V_4, V_6) до и после использования нулевого вектора V_0 имеет следующее выражение:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{T_z - T_0}{T_z} = 1 - \gamma,$$

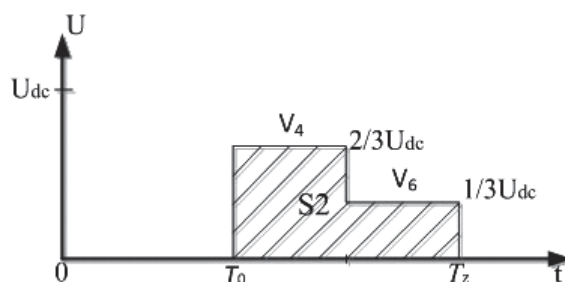


Рис. 6. Форма импульса напряжения фазы А в секторе (V_4, V_6) при использовании нулевых базовых векторов

где $0 \leq \gamma = \frac{T_0}{T_z} \leq 1$; S_1, S_2 — площади импульса на-

пряжения до и после (соответственно) реализации нулевого вектора V_0 при максимальном и текущем значении напряжения.

Изменением частоты достигается изменение значения T_z . Для закона, например $\frac{U}{f} = \text{const}$, регулирующийся параметр определяется следующим образом:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} = 1 - \gamma \Rightarrow \gamma = 1 - \frac{f_2}{f_1},$$

где f_1 — номинальная частота АД; f_2 — частота работы при заданной скорости вала АД; $\gamma = T_0/T_z$ — отношение длительности существования нулевого вектора к интервалу формирования вектора в каждом секторе при частоте f_2 .

Результаты моделирования

При регулировании тока, скорости вала и момента АД количество формируемых векторов в каждом секторе, как правило, велико. Число формируемых векторов в секторе будем обозначать n . Для исследования влияния параметра n на качество электропривода АД в режиме векторной ШИМ использовалась имитационная модель [12] пакета Matlab. Результаты моделирования представлены на рис. 7–9.

В качестве примера приведены графики при $f = 60$, $n = 20$ (рис. 10 и 11) и $f = 15$, $n = 20$ (рис. 12 и 13).

Выводы

Результаты моделирования регулирования частоты вращения вала АД показывают, что предложенные алгоритмы исключают сквозные токи. Колебания скорости, тока статора, электромагнитного момента двигателя уменьшаются при большем количестве формируемых векторов в каждом секторе по сравнению с традиционным алгоритмом. Предложенный алгоритм из-за меньшего объема вычислений при формировании векторной ШИМ целесообразно использовать для двигателей с высокой частотой первой гармоники или двигателей с мягкими характеристиками.

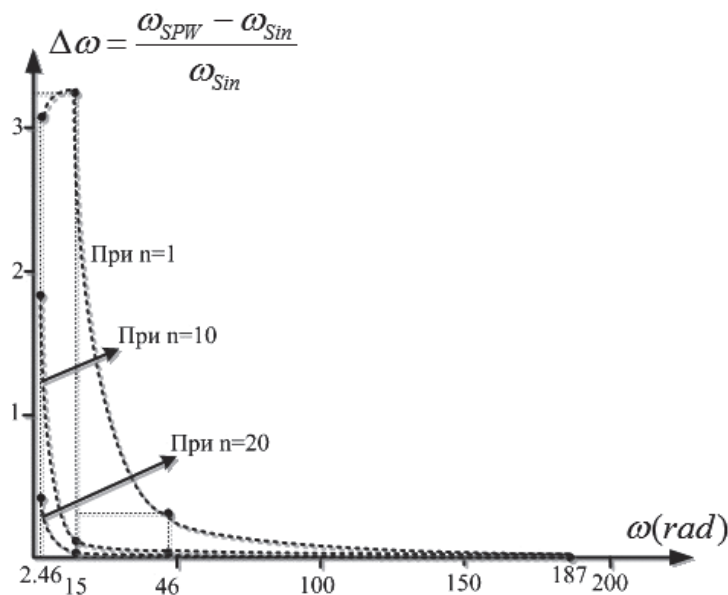


Рис. 7. График колебания угловой скорости вала АД при разных значениях n

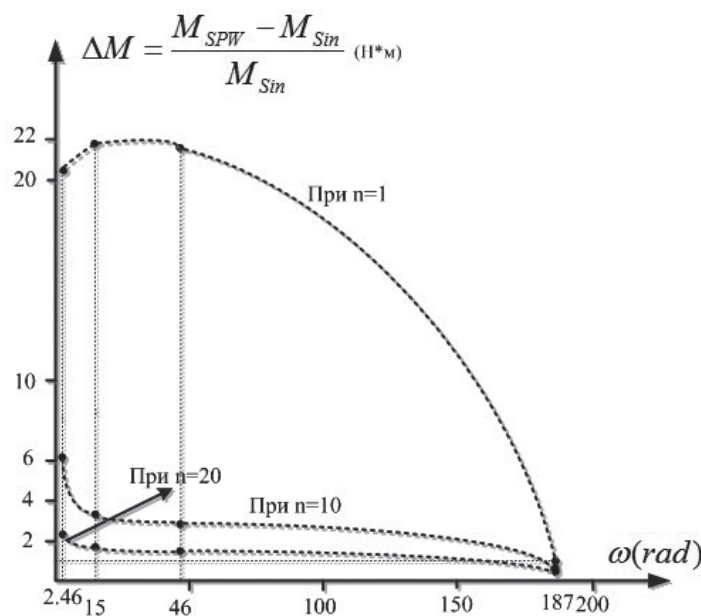


Рис. 8. График колебания электромагнитного момента при разных значениях n

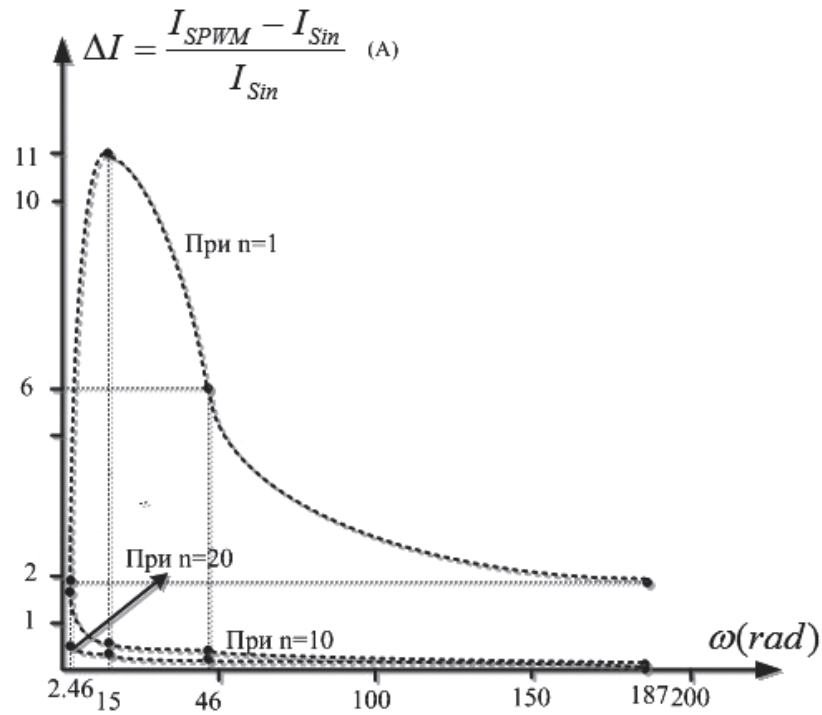


Рис. 9. График колебания тока статора при разных значениях n

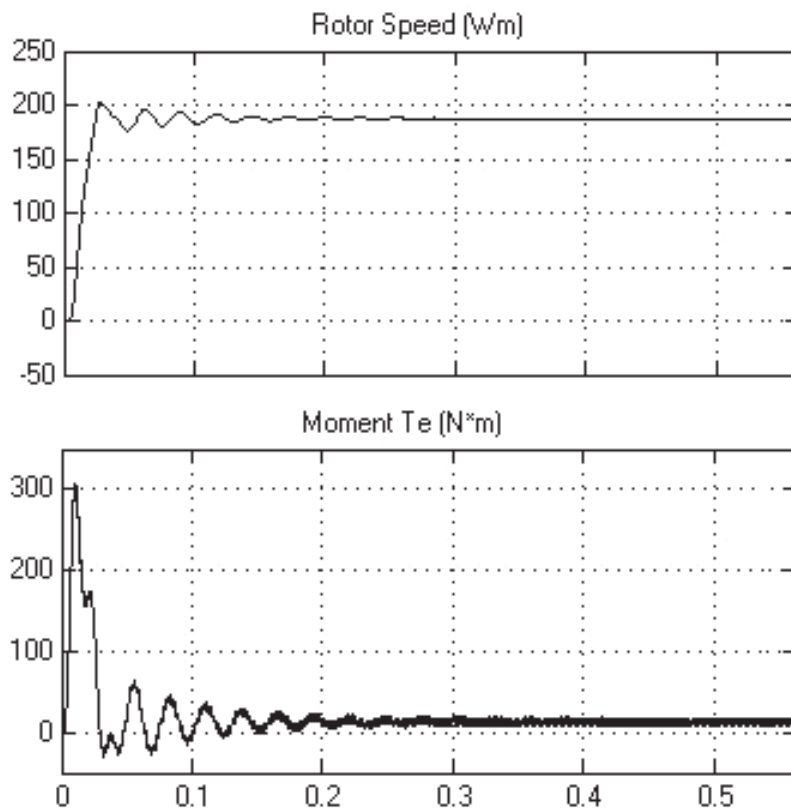


Рис. 10. Скорость ротора и электромагнитный момент при $f = 60$, $n = 20$

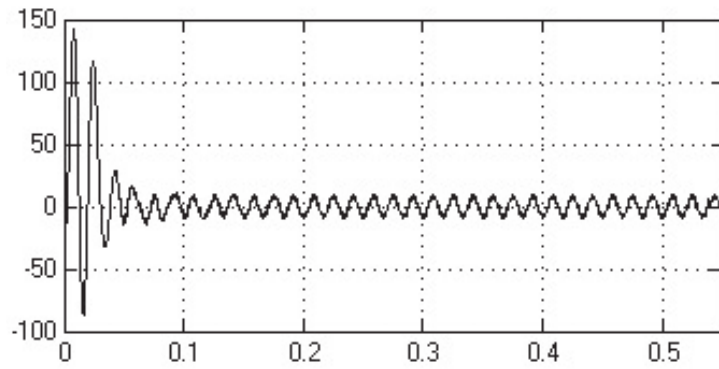


Рис. 11. Ток статора двигателя при $f=60$, $n=20$

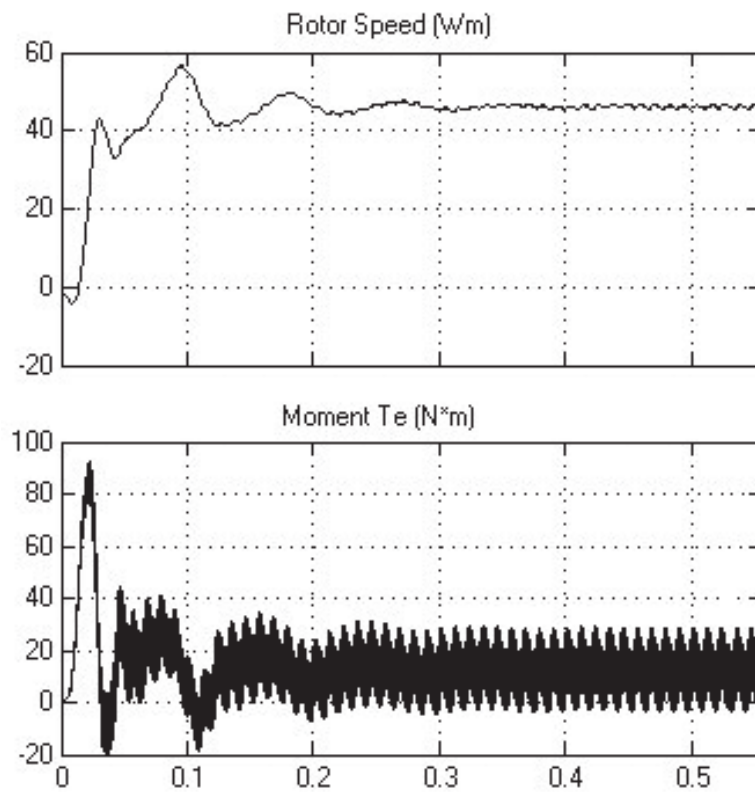


Рис. 12. Скорость ротора и электромагнитный момент при $f=15$, $n=20$

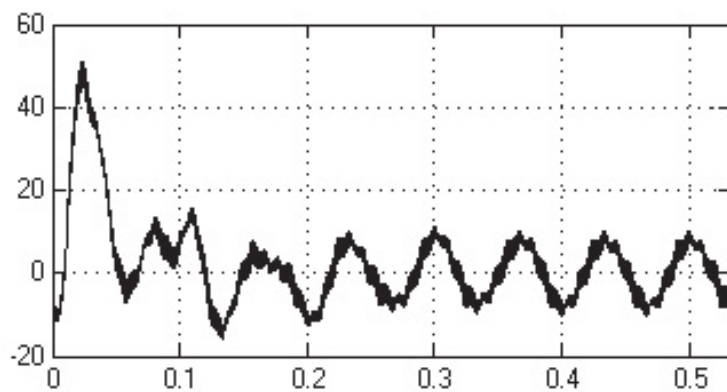


Рис. 13. Ток статора двигателя при $f=15$, $n=20$

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., 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: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МАИ, 2001. — 481 с.
5. Фам Туан Тхань. Разработка и исследование алгоритмов управления системой «Импульсный усилитель мощности — асинхронный двухфазный двигатель»: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАИ, 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 Туан Тхань. 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 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»: Тезисы. — М.: Люксор, 2015. С. 182-183.
11. Ле Д.Т. Способ формирования напряжения векторной ШИМ для управления асинхронным двигателем // XLII Международная молодёжная конференция «Гагаринские чтения»: Сборник тезисов докладов. — М., 2016. Т. 1. С. 670-671.
12. Ле Д.Т., Аверин С.В. Формирование векторной широтно-импульсной модуляции с исключением сквозных токов в трехфазном мостовом инверторе // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 155-163.

SIMPLIFIED SPICE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION ALGORITHM FOR ASYNCHRONOUS MOTOR SPEED CONTROL

Le Duc Tiep*, Averin S.V.**

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

* e-mail: litiep@mail.ru

** e-mail: acb@mai.ru

Abstract

The paper presents algorithms for voltage generation at induction motor (IM) windings in vector pulse width modulation (PWM) mode while IM rotation frequency regulating. These algorithms ensure smaller amount of computation, allowing eliminate through currents in the inverter power stage. Vector PWM (VPWM) employs 8 states of inverter switches for IM control. The paper considers the possibility of extra intermediate vector states of the switches, which would not cause through currents occurrence in the inverter and allow include them into IM speed control algorithm. For through current elimination in transition periods between zero vectors and basic and non-zero basic vectors the authors suggest implementation of intermediate switches conditions of the switches, which will be operated on

as vectors. Let us consider treat these vector as variables. The authors analyzed the usage of a group of vectors $V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04}, V_{05}, V_{06}$ or $V_{10}, V_{20}, V_{30}, V_{40}, V_{50}, V_{60}$. It allows obtain two most promising algorithm. To control IM output voltage and frequency parameters employing PWM mode, the assemblage of the transitions between acceptable ones, when at least one syllable of a control word would be inverted, will be referred to as vector subset of permitted dangerous bilateral transitions. The simultaneous switching of both switches of a totem pole corresponds to the dangerous transition. In the suggested algorithms, the transitions are in parallel with Karnaugh map sides, which means that they do not cause through currents. Vector PWM voltage and frequency parameters will be considered only in the time interval corresponding to the half of the sector.

Simulation was carried out varying time interval of vector V_0 existence for regulating generated voltage value under invariable T_{V4}/T_{V6} ratio (for s the first sector). The effect of n parameter on the quality of IM drive in VPWM mode. The simulation was performed with MATLAB Simulink. Simulation results are presented.

Keywords: vector pulse width modulation, induction motor drive, three-phase inverter, three-phase inverter power transistor switch.

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, Oct. 1989*, pp. 1197-1202.
3. Mashukov E.V., Shevtsov D. A., Ul'yashchenko G. M. *Tsentralizovannye tranzistornye preobrazovateli elektroenergii dlya sistem elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* (Centralized transistor power 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 control units design methods for drive systems mechatronic systems). 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 exploration of "switched mode power amplifier –two-phase induction motor" system control algorithms). Doctor's thesis, Moscow, 2005, 188 p.
6. Popov B.N., Fam Tuan Tkhan'. *Elektronnye komponenty*, 2005, no. 2, pp. 69-76.
7. Popov B.N., Fam Tuan Tkhan'. *Trudy MAI*, 2005, no. 18, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=34193>
8. Popov B.N. *Izvestiya Akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1996, no. 3, pp. 163-170.
9. Le D.T., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 155-164.
10. Le D.T. *Materialy XIV Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika-2015"*, Moscow, 2015, pp. 182-183.
11. Le D.T. *Materialy XLII Mezhdunarodnoi molodezhnoi konferentsii "Gagarinskie chteniya"*, Moscow, 2016, vol. 1, pp. 670-671.
12. Le D.T., Averin S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 155-163.