

Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления

ВАСИЛЬЕВ Б.Ю.

Рассмотрены режимы работы силовых полупроводниковых преобразовательных устройств на примере автономного инвертора (АИ) асинхронного электропривода, а также обеспечивающие эти режимы алгоритмы управления: релейной модуляции («токовый коридор»); широтно-импульсной модуляции; пространственно-векторной модуляции (ПВМ). Дана краткая характеристика этих алгоритмов. Представлена структура алгоритма ПВМ и рассмотрены методы повышения эффективности работы автономного инвертора с таким алгоритмом управления. Эффективность повышается за счет угловой дифференциации (разбиения) координатной плоскости на подсекторы различного размера и за счет изменения алгоритма активации основных векторов на модуляционном периоде, т.е. путем перехода от симметричной ПВМ к разрывной с различной последовательностью коммутаций инвертора. Проанализированы результаты исследования приведенных в статье методов повышения эффективности работы автономного инвертора; дана классификация алгоритмов ПВМ.

Ключевые слова: автономный инвертор, пространственно-векторная модуляция, электромагнитная совместимость, алгоритм управления, эффективность управления

Структура, режимы работы силовых полупроводниковых преобразовательных устройств и алгоритмы управления ими. Силовые полупроводниковые преобразователи применяются в различных электротехнических комплексах и в каждом конкретном случае могут иметь различную топологическую архитектуру и алгоритмическое обеспечение, учитывающие заданные режимы работы, энергетические характеристики и уровень электромагнитной совместимости. Одной из наиболее широких областей применения силовых полупроводниковых преобразователей является современный автоматизированный электропривод на основе электродвигателей переменного тока с использованием полупроводниковых коммутаторов типа активный выпрямитель и автономный инвертор (АИ) [1–5]. Структурная схема электропривода с АИ приведена на рис. 1. Активный выпрямитель в такой схеме имеет структуру, обратную АИ.

Для управления транзисторами АИ в современных электротехнических комплексах могут использоваться следующие алгоритмы модуляции: релейная (РМ); широтно-импульсная (ШИМ); пространственно-векторная (ПВМ). Такое разделение можно считать условным, так как выходное напряжение во всех этих случаях регулируется изменением скважности импульсов управления. Тем не менее разные режимы работы АИ с этими алгоритмами, разный вычислительный алгоритм управляющих функций и разные методы модернизации ал-

горитмов с целью повышения эффективности работы АИ допускают такую классификацию.

На рис. 2 приведены структурные схемы алгоритмов и формы управляющих сигналов. При использовании релейного алгоритма модуляции АИ работает в режиме источника тока. Управляющие сигналы здесь формируются элементами типа двухпозиционного реле с гистерезисом, на вход которых подаются сигналы ошибки формирования фазного тока. Изменение состояния реле происходит в том случае, если ошибка станет равной или большей заданного значения гистерезиса D . Таким образом обеспечивается поддержание фазного тока с точностью $\pm D$, поэтому режим работы АИ с таким алгоритмом называют «токовый коридор». Релейная модуляция характеризуется переменной частотой коммутации [6].

Принцип алгоритма ШИМ основан на сравнении управляющих сигналов U_{Aa} , U_{Bb} , U_{Cc} и сигнала развертки U_s . В моменты времени, когда сигналы равны, формируются управляющие импульсы, которые подаются на соответствующие транзисторы АИ. При синусоидальной форме управляющих сигналов на выходе автономного инвертора формируются напряжения, эквивалентные (усредненные на периоде модуляции) значения которых изменяются по синусоидальному закону. Такой алгоритм называется синусоидальной ШИМ [7, 8].

Для повышения амплитуды выходного напряжения АИ с ШИМ можно использовать предварительное преобразование (предварительную модуля-

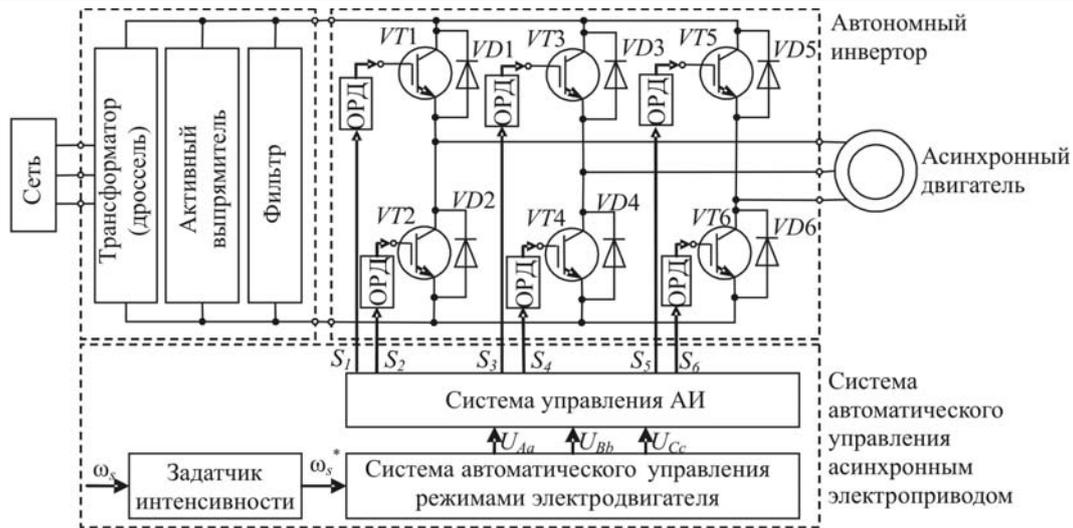


Рис. 1. Структурная схема электропривода с полупроводниковым преобразователем и асинхронным двигателем

цию – предмодуляцию) управляющего сигнала. Для этого к управляющим сигналам U_{Aa} , U_{Bb} , U_{Cc} добавляют сигнал нулевой последовательности U_{N0} специальной формы (сигнал предмодуляции). Такой алгоритм управления принято называть «ШИМ с предмодуляцией». Блок U_{N0} обеспечивает формирование сигнала предмодуляции необходимой формы, амплитуды и частоты в зависимости от частоты и амплитуды управляющих сигналов [8].

В современных АИ для управления ключами может использоваться алгоритм пространственно-векторной модуляции. Принцип этого алгоритма основан на том, что вектор выходного напряжения АИ формируется на одном модуляционном периоде за счет последовательного переключения основных векторов. Алгоритм позволяет обеспечить плавное перемещение результирующего вектора напряжения на выходе АИ, что делает его наиболее перспективным. Несмотря на преимущества алгоритм «классической» ПВМ может быть модернизирован с целью повышения эффективности управления ключами АИ и обеспечения более высоких энергетических характеристик, электромагнитной совместимости АИ с приводным электродвигателем.

Алгоритм пространственно-векторной модуляции. Алгоритм вычисления управляющих функций АИ, а затем и формирования коммутационных функций включает следующие этапы расчета: вычисление модуля и фазы эталонного вектора напряжения на выходе системы автоматического управления режимами электродвигателя; определение сектора, в котором находится эталонный вектор напряжения; вычисление временных интервалов включения основных векторов напряжения T_1 , T_2 , T_0 ; формирование коммутационных функций управления ключами АИ.

Компоненты вектора эталонного напряжения U_{Aa} , U_{Bb} и U_{Cc} на первом этапе алгоритма ПВМ преобразуются из трехфазной системы координат ABC в двухфазную ab , а затем вычисляются модуль и фаза эталонного вектора: $|\bar{U}| = \sqrt{U_a^2 + U_b^2}$; $j_U = \arctan(U_a / U_b)$, где U_a , U_b – компоненты вектора эталонного напряжения в двухфазной системе координат ab , и определяется сектор, в котором находится вектор эталонного напряжения [9–11]. Границы секторов образуют активные векторы выходного напряжения АИ; секторы показаны на рис. 3,а.

Далее вычисляются временные интервалы T_1 , T_2 , T_0 действия основных векторов на периоде ПВМ T_f . Если эталонный вектор представить как $\bar{U} = \bar{U}_i \frac{T_1}{T_f} + \bar{U}_{i+1} \frac{T_2}{T_f} + \bar{U}_{0,7} \frac{T_0}{T_f} = \bar{U}_i g_1 + \bar{U}_{i+1} g_1 + \bar{U}_{0,7} g_0$,

где $i = 1, 6$ – номер активного вектора; g – относительная длительность коммутации, то временные интервалы включения основных векторов для каждого из шести секторов можно определить по выражениям [12–16]:

$$T_1 = k T_f \frac{\sin(p/2 - j_U)}{\sin(p/2)}; \tag{1}$$

$$T_2 = k T_f \frac{\sin(j_U)}{\sin(p/3)}; \tag{2}$$

$$T_0 = T_f - (T_1 + T_2); \tag{3}$$

$$T_f = 1 / f_f k = 3|\bar{U}| / 2U_{dc}, \tag{4}$$

где U_{dc} – значение постоянного напряжения на входе АИ. Формы управляющих сигналов ПВМ представлены на рис. 2,в, а процесс формирования коммутационных функций – на рис. 3,б.

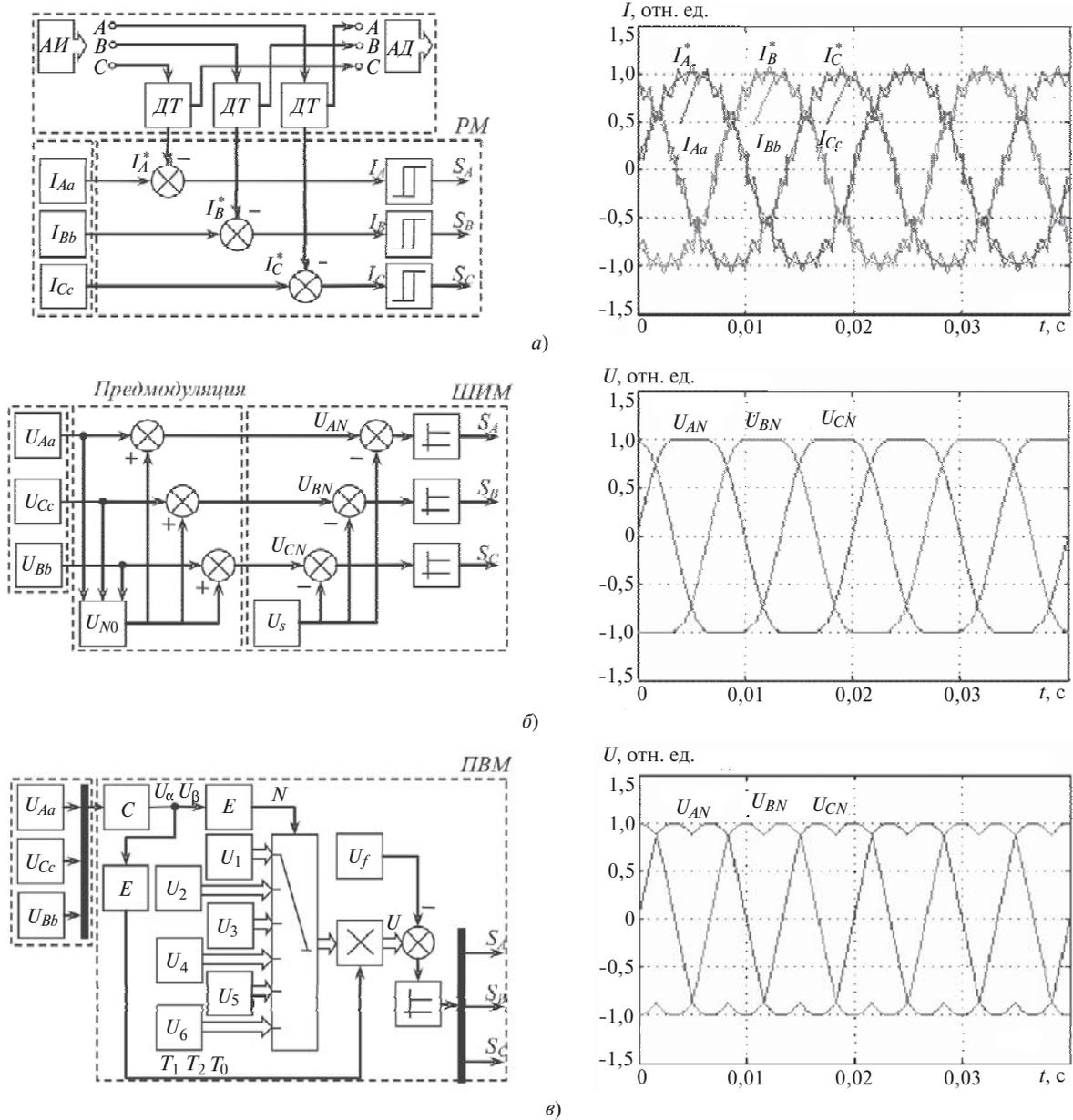


Рис. 2. Схемы формирования управляющих сигналов и формы этих сигналов: а – РМ; б – ШИМ; в – ПВМ (C (converter) – преобразователь, E (estimator) – вычислитель)

Таким образом, если эталонный вектор находится в первом секторе, как показано на рис. 3,а, то для формирования такого же результирующего вектора напряжения на выходе АИ на одном модуляционном периоде должны последовательно включаться транзисторы, обеспечивающие работу векторов $U_0 - U_1 - U_2 - U_7 - U_7 - U_2 - U_1 - U_0$ в течение времени T_1, T_2, T_0 (рис. 3,б).

Повышение эффективности алгоритма пространственно-векторной модуляции. Для сравнения эффективности методов повышения алгоритма пространственно-векторной модуляции целесообразно использовать следующие критерии: амплитуду основной гармоники выходного напряжения; частоту коммутации; коэффициент несинусоидальных искажений

(далее коэффициент искажения или THD – total harmonic distortion) выходного тока и напряжения.

Повышение эффективности алгоритма за счет угловой дифференциации координатной плоскости. Повысить эффективность работы алгоритма ПВМ можно путем угловой дифференциации (разбиения) координатной плоскости на подсекторы. На рис. 4,а, б и в показано разбиение координатной плоскости на 36, 72 и 120 подсекторов.

Угловая дифференциация координатной плоскости обеспечивает улучшение формы кривой тока, а именно, снижает коэффициент искажения выходного тока и увеличивает амплитуду основной гармоники выходного напряжения; в структурном изменении схемы АИ нет необходимости.

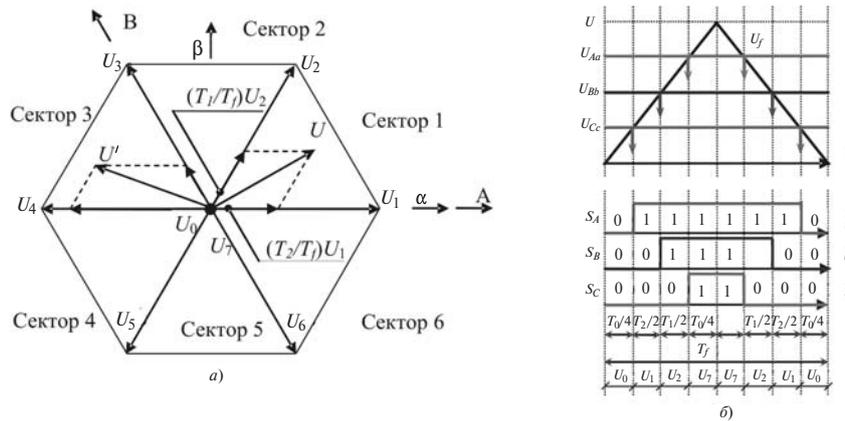


Рис. 3. Разбиение координатной плоскости ab на секторы

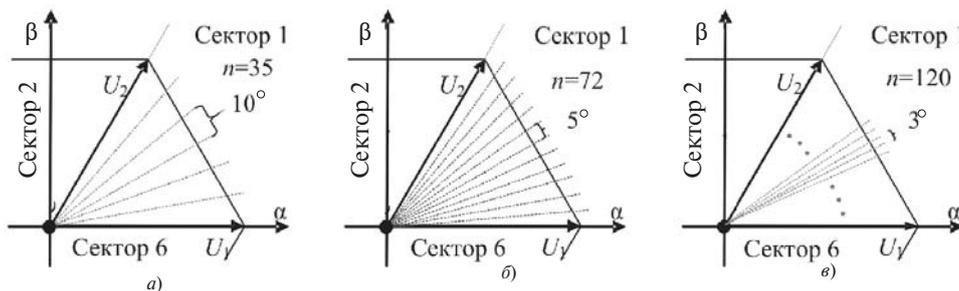


Рис. 4. Угловая дифференциация координатной плоскости ab

При этом изменится алгоритм вычисления интервалов включения основных векторов. Временные интервалы T_1 и T_2 с учетом подсектора n , в котором находится эталонный вектор, рассчитываются по выражениям:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_f|U_{ref}|}{U_{dc}} \left[\sin \frac{\rho}{3} n \cos j U - \cos \frac{\rho}{3} n \sin j U \right] \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_f|U_{ref}|}{U_{dc}} \left[\cos j U \sin \frac{\rho}{3} (n-1) - \sin j U \cos \frac{\rho}{3} (n-1) \right] \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \quad (6)$$

На рис. 5,а и б представлены кривые выходного тока АИ, фазного напряжения и первой гармоники фазного напряжения при значении подсекторов: а – 60°, б – 3°. Видно, что при значении сектора 60° характер ПВМ соответствует синусоидальной ШИМ.

При уменьшении значения подсекторов и увеличении их числа возрастает частота коммутации АИ, что улучшает форму кривой выходного тока АИ. Максимальное значение выходного фазного напряжения АИ составляет 66,7% значения постоянного напряжения на входе АИ, а максимальное значение основной гармоники выходного фазного напряжения – 61% этого напряжения.

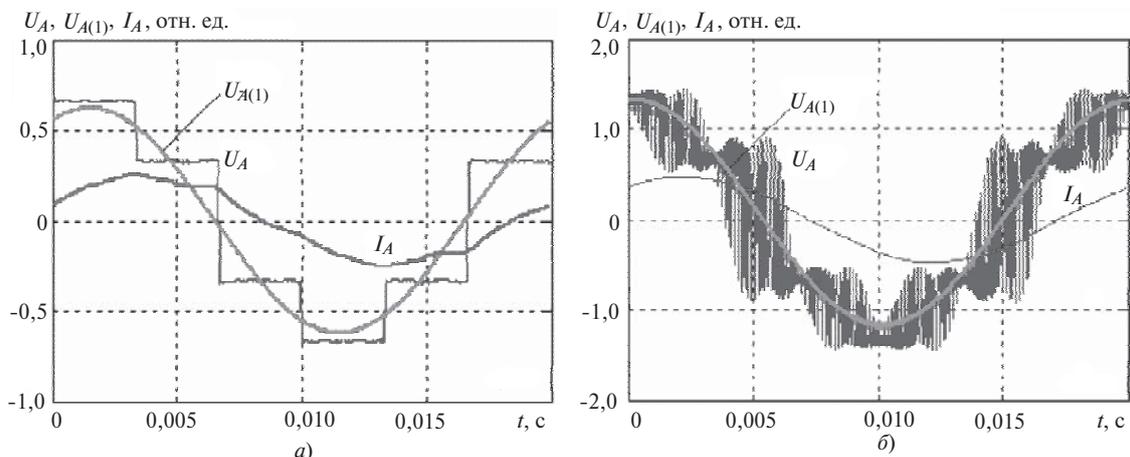


Рис. 5. Выходные параметры АИ с алгоритмом ПВМ

Автором были получены кривые, характеризующие изменение коэффициента искажений выходного фазного напряжения и тока в зависимости от относительной длительности коммутации АИ и значения подсектора. Они показали, что значение коэффициента искажений выходного тока минимально при значении подсектора, равного 3°, и работе АИ в режиме перемодуляции, т.е. при относительной длительности коммутации выше 0,866; коэффициент искажения фазного напряжения имеет минимальное значение при относительной длительности коммутации АИ, равной 0,866, и составляет меньше 3%.

Повышение эффективности за счет изменения алгоритма активации основных векторов. Алгоритм ПВМ, изложенный выше, можно назвать «симметричной» ПВМ, когда нулевые векторы симметрично размещены в начале, середине и конце модуляционного периода, а при формировании коммутационных функций используется треугольная развертка (рис. 3,б). Для реализации алгоритма ПВМ можно использовать сигналы разверток других форм, например пилообразные сигналы с передним или задним фронтом. Процесс формирования коммутационных функций с такой разверткой ПВМ показан на рис. 6,а.

Модифицировать алгоритм ПВМ с целью минимизации переключений транзисторов АИ и снижения частоты коммутации можно изменением последовательности активации основных векторов. Например, можно использовать следующие последовательности переключений, состоящие из пяти векторов: $U_0 - U_1 - U_2 - U_1 - U_0$ или $U_2 - U_1 - U_7 - U_1 - U_2$, как показано на рис. 6,б и в соответственно.

Формы управляющих сигналов ПВМ при ее модернизации не изменяются и аналогичны сигналам

на рис. 2,в. Процесс формирования выходного напряжения с использованием треугольной и пилообразной разверток показан на рис. 7,а и б соответственно. Сигнал треугольной развертки можно рассчитать по формуле $U_f = \arcsin[\sin(f_f)]$ и назвать такую ПВМ «синусоидальной» ПВМ, а при использовании пилообразной развертки – «пилообразной» ПВМ.

На рис. 7,в показаны формы фазного напряжения и тока на выходе АИ и коммутационные функции анодной группы транзисторов.

Если сигнал нулевой последовательности «симметричной» ПВМ имеет гладкую форму (рис. 7,а и б), то при ПВМ с измененным алгоритмом активации основных векторов сигнал нулевой последовательности имеет точки разрыва, поэтому такой алгоритм можно назвать «разрывной» ПВМ. При такой модернизации алгоритма ПВМ формы управляющих сигналов изменяются и могут иметь различный вид. На рис. 8 показаны управляющие сигналы и сигналы нулевых последовательностей при «пятивекторной» ПВМ.

Как видно из приведенных графиков на рис. 3, 6–8, число переключений транзисторов АИ при использовании «разрывной» ПВМ и, как следствие, частота коммутации снижаются за счет более длительного действия нулевых векторов на модуляционном периоде. Так, при симметричной ПВМ с треугольным несущим сигналом (рис. 3,б) на одном модуляционном интервале происходит шесть коммутаций АИ, а при использовании «разрывной» ПВМ – только три (рис. 6 и 8), т.е. частота коммутаций АИ снижается на 33%. На практике это означает, что при использовании такого алгоритма управления транзисторами АИ будут снижаться коммутационные потери, а это позволяет снизить

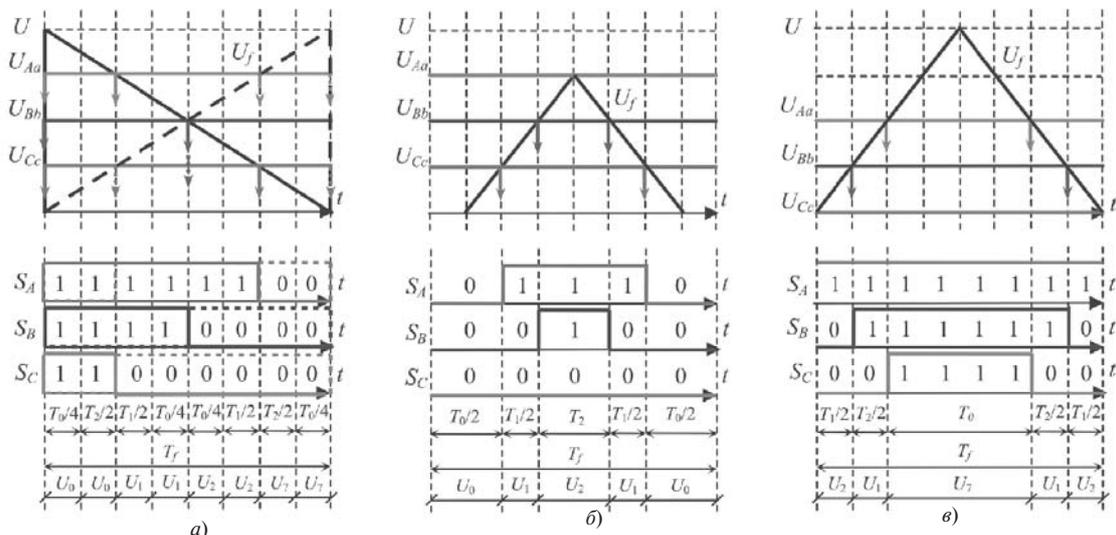


Рис. 6. Формирование управляющих импульсов в алгоритме ПВМ

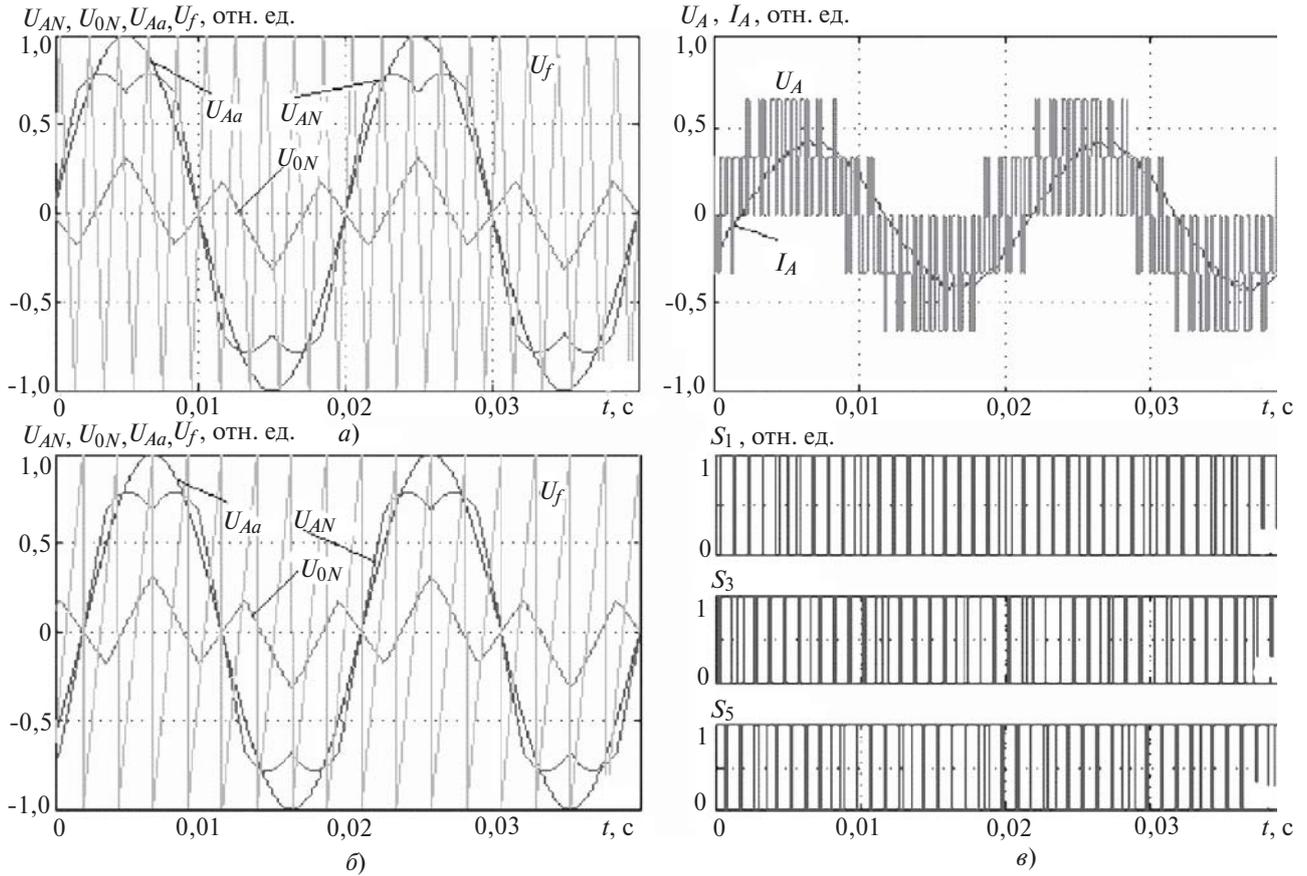


Рис. 7. Работа автономного инвертора с «симметричной» ПВМ

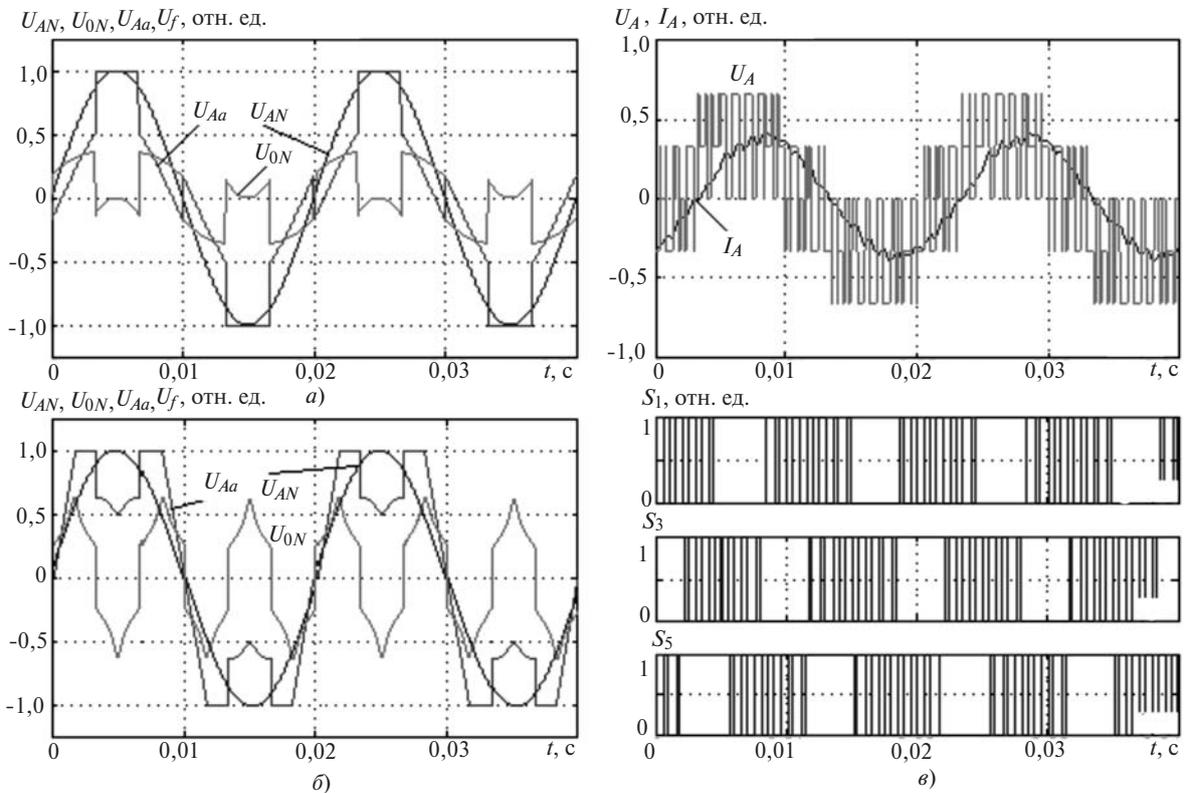


Рис. 8. Работа автономного инвертора с «разрывной» ПВМ: а – при $U_0 - U_1 - U_2 - U_1 - U_0$, которую по форме нулевой последовательности можно назвать «зубчатой» ПВМ; б – при $U_2 - U_1 - U_7 - U_1 - U_2$, которую можно назвать «пиковой»; в – формы фазного напряжения и тока на выходе АИ и коммутационные функции анодной группы транзисторов

габариты технических средств, обеспечивающих отвод тепла от транзисторов. С другой стороны, появляется возможность увеличить частоту коммутации на 33% для достижения более высокой электромагнитной совместимости АИ, например с приводным электродвигателем, если первый используется в электроприводе переменного тока.

Полученные зависимости коэффициентов искажения тока и напряжения на выходе АИ с «разрывной» ПВМ показали, что при увеличении относительной длительности коммутации коэффициенты искажений снижаются, что свидетельствует о том, что форма кривой тока становится близкой к синусоидальной. При этом алгоритм «зубчатой» ПВМ обеспечивает меньшие искажения синусоидальности тока и напряжения, чем «пиковая» ПВМ. Так, в первом случае THD = 3,12%, а во втором случае THD = 7,45% при значении модуляционного периода, равном 0,001 с.

Таким образом, анализ эффективности алгоритма ПВМ с различными модификациями показал, что при использовании алгоритма классической ПВМ (при секторе 60°) эффективность работы АИ не выше той, которую обеспечивает алгоритм синусоидальной ШИМ с предмодуляцией (анализ этого алгоритма подробно рассмотрен в [8]). Значительное повышение эффективности достигается за счет использования алгоритма ПВМ с угловой дифференциацией координатной плоскости или изменения алгоритма активации основных векторов.

Алгоритм «разрывной» ПВМ обеспечивает снижение частоты коммутации АИ на 33% и обеспечивает удовлетворительное качество выходных токов и напряжений АИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Б.Ю.** Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование). – Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014, 139 с.
2. **Козярук А.Е., Васильев Б.Ю.** Структура, состав и алгоритмы управления высокоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов. – Электротехника, 2013, № 2, с. 43–51.

3. **Васильев Б.Ю.** Мехатронные перекачивающие комплексы на основе регулируемых электроприводов для подводного компримирования и транспортировки природного газа. – Мехатроника, автоматизация, управление, 2013, № 3, с. 55–60.

4. **Емельянов А.П., Васильев Б.Ю.** Алгоритмы и технические средства управления автоматизированным электроприводом турбомеханизмов. – Вестник Ивановского энергетического университета, 2013, № 1, с. 92–96.

5. **Козярук А.Е., Васильев Б.Ю.** Алгоритмы управления энергоэффективным высокооборотным электроприводом газоперекачивающего агрегата. – Изв. вузов. Электромеханика, 2012, № 3, с. 40–44.

6. **Усолецев А.А.** Частотное управление асинхронными двигателями. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2006, 94 с.

7. **Шрейнер Р.Т., Калыгин А.И., Кривовяз В.К.** Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ. – Екатеринбург: РГППУ, 2012, 223 с.

8. **Васильев Б.Ю., Добуш В.С.** Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах. – Электричество, 2014, № 4, с. 54–61.

9. **Васильев Б.Ю., Козярук А.Е.** Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом. – Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика, 2013, т. 13, № 2, с. 75–84.

10. **Sozanski K.** Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits. – Springer, 2013, 288 p.

11. **Bimal K. Bose.** Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall, 2002, 711 p.

12. **Васильев Б.Ю.** Эффективность управления электроприводом переменного тока с прямым управлением моментом. – Изв. вузов. Электромеханика, 2014, № 1, с. 71–75.

13. **Kozyaruk A.E., Vasil'yev B. Yu.** Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units. – Russian Electrical Engineering, February 2013, vol. 84, iss. 2, pp. 94–102.

14. **Пронин М.В., Воронцов А.Г.** Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет)/Под ред. Е.А. Крутякова. – С.Петербург: Электросила, 2003, 172 с.

15. **Lattarulo F.** Electromagnetic Compatibility in Power Systems. – Elsevier Ltd, 2007, 324 p.

16. **Warne D.F.** Newnes Electrical Power Engineer's Handbook. – Newnes, 2005, 480 p.

[17.04.14]

Автор: Васильев Богдан Юрьевич окончил Ухтинский государственный технический университет в 2010 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 2013 г. в Национальном минерально-сырьевом университете (Горный) – Санкт-Петербург. Преподаватель кафедры «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика» Национального минерально-сырьевого университета (Горный).

Achieving More Efficient Performance of Power Semiconductor Converters through the Use of Spatial-Vector Control Algorithms

B. Yu. VASIL'YEV

The article considers the operating modes of power semiconductor converters (taking as an example the self-excited inverter for an induction electric drive) and certain control algorithms supporting converter operation in these modes: relay modulation (so called «current corridor»), pulse-width modulation, and spatial-vector modulation (SVM). A brief characterization of these algorithms is given. The structure of an

SVM algorithm is presented, and methods for achieving more efficient performance of a self-excited inverter with such control algorithm are considered. More efficient performance is achieved owing to angular differentiation (division) of the coordinate plane into subsectors of different sizes and by changing the algorithm activating the main vectors in the modulation period, i.e., by making a shift from symmetrical SVM to discontinuous one with different inverter switching sequences. The results from a study of the considered methods for achieving more efficient operation of a self-excited inverter are analyzed, and classification of SVM algorithms is given.

Key words: *self-excited inverter, spatial-vector modulation, electromagnetic compatibility, control algorithm, control efficiency*

REFERENCES

1. **Vasil'yev B.Yu.** *Avtomatizirovannyi elektroprivod ob'ektov mineral'no-syr'yevogo kompleksa (primeneniye, modelirovaniye, issledovaniye)* (Automated Electric Drives for Facilities of the Mineral and Raw Material Complex (Application, Modeling, and Investigation). St. Petersburg. Natsional'nyi mineral'no-sir'yevoi universitet «Gornyi» (The National University of Mineral Resources "Mining"), 2014, 139 p.
2. **Kozyaruk A.E., Vasil'yev B.Yu.** *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 2013, No 2, pp. 43–51.
3. **Vasil'yev B.Yu.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* (Mechatronics, Avtomatization, Control), 2013, № 3, pp. 55–60.
4. **Emel'yanov A.P., Vasil'yev B.Yu.** *Vestnik Ivanovskogo energeticheskogo universiteta (Bulletin of the Ivanovo Power Engineering University)*, 2013, No 1, pp. 92–96.
5. **Kozyaruk A.E., Vasil'yev B.Yu.** *Izv. Vuzov. Elektromekhanika* (News of Higher Education Institutions. Electromechanics), 2012, No 3, pp. 40–44.
6. **Usol'tsev A.A.** *Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* (Frequency Control of Induction Motors). S.Petersburg. SPbSU ITMO, 2006, 94 p.
7. **Shreiner R.T., Kalygin A.I., Krivovoyaz V.K.** *Elektroprivody peremennogo toka na baze neposredstvennykh preobrazovatelei chastity s shirotoimpul'snoi modulyatsiyey* (AC Electric Drives on the Basis of Cycloconverters with PWM. AC Electric Drives on the Basis of Cycloconverters with PWM). Ekaterinburg. RGPPU, 2012, 223 p.
8. **Vasil'yev B.Yu., Dobush V.S.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2014, No 4, pp. 54–61.
9. **Vasil'yev B.Yu., Kozyaruk A.E.** *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika (Bulletin of the Yuzhno-Ural'sk State University. Power Engineering)*, 2013, t. 13, 2, pp. 75–84.
10. **Sozanski K.** *Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits.* – Springer, 2013, 288 p.
11. **Bimal K. Bose.** *Modern Power Electronics and AC Drives.* – Prentice Hall, 2002, 711 p.
12. **Vasil'yev B.Yu.** *Elektromekhanika (Electromechanics)*, 2014, No 1, pp. 71–75.
13. **Kozyaruk A. E., Vasil'yev B. Yu.** Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units. – Russian Electrical Engineering, February 2013, vol. 84, iss. 2, pp. 94–102.
14. **Pronin M.V., Vorontsov A.G.** *Silovyye polnost'yu upravlyayemye poluprovodnikovyye preobrazovateli (modelirovaniye i raschet)/Pod red. E.A. Krutyakova (Fully Controlled Power Semiconductor Converters (Modeling and Calculation)/Edit. by E.A. Krutyakov.* St. Petersburg. Elektrosila, 2003, 172 p.
15. **Lattarulo F.** *Electromagnetic Compatibility in Power Systems.* – Elsevier Ltd, 2007, 324 p.
16. **Warne D.F.** *Newnes Electrical Power Engineer's Handbook.* – Newnes, 2005, 480 p.

Author: Vasil'yev Bogdan Yur'yevich (St. Petersburg, Russia) – Cand. Techn. Sci. He is Lecturer in the National University of Mineral Resources "Mining".

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

