

Обеспечение режима перемодуляции и повышение эффективности преобразования энергии в силовых автономных инверторах электроприводов

ВАСИЛЬЕВ Б.Ю.

Алгоритмы широтно-импульсного и пространственно-векторного модуляционного управления транзисторами автономного инвертора рассмотрены с точки зрения обеспечиваемой ими эффективности преобразования электрической энергии. Показано, что для повышения эффективности функционирования инвертора возможно использование различных алгоритмов перемодуляции, а именно: переменного-активной, адаптивной и синхронной. Проанализированы уровень электромагнитной совместимости, обеспечиваемый автономным инвертором с указанными алгоритмами перемодуляции, и изменение его энергетических характеристик. Проведенные исследования показывают, что применение алгоритмов перемодуляции является оправданным и обеспечивает более высокое значение таких показателей эффективности преобразования электрической энергии, как коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения и тока, коэффициент использования инвертора по напряжению, амплитуде основной гармоники при равном значении периода пространственно-векторной модуляции, а значит и частоты коммутации.

Ключевые слова: автономный инвертор, энергетическая эффективность, алгоритм управления, пространственно-векторная модуляция, перемодуляция

Современные электроприводы на основе бесконтактных электродвигателей переменного тока имеют хорошие динамические характеристики и отвечают самым высоким требованиям в части эффективности управления электромеханическими координатами. В таких электроприводах важнейшим вопросом является получение высоких энергетических характеристик, что в значительной степени определяется эффективностью управления силовыми полупроводниковыми преобразователями частоты. Стандартным решением является использование алгоритмов широтно-импульсной модуляции. Однако это приводит к появлению хорошо известных негативных явлений, а именно, значительному искажению напряжения и тока электродвигателя, появлению пульсаций момента на валу и частоты вращения и, как следствие, повышению вибрации и шума приводного электродвигателя. Кроме того, полупроводниковые преобразователи с широтно-импульсной модуляцией характеризуются недоиспользованием по напряжению.

Решение проблем возможно путем использования пространственно-векторных алгоритмов, улучшающих форму напряжения и тока за счет плавного перемещения напряжения на выходе автономного инвертора. Однако эффективность использования напряжения остается недостаточной. Для получения синусоидального напряжения и тока на выходе полупроводниковых образований, эффективного использования напряжения и повышения амплитуды выходного напряжения целесообразно

использовать модифицированные алгоритмы пространственно-векторной модуляции, обеспечивающие функционирование полупроводниковых преобразователей в режиме перемодуляции.

Структура силовых полупроводниковых преобразователей (характеристики, режимы работы, алгоритмы управления). Силовые полупроводниковые преобразователи используются в различных электротехнических комплексах и в каждом конкретном случае могут отличаться по топологической архитектуре и алгоритмическому обеспечению в зависимости от заданного режима работы, энергетических характеристик и уровня электромагнитной совместимости. Одной из наиболее широких областей применения силовых полупроводниковых преобразователей является автоматизированный электропривод на основе электродвигателей переменного тока, использующий полупроводниковые коммутаторы типа активный выпрямитель (АВ) и автономный инвертор (АИ) [1–6]. Структурная схема электропривода с АВ и АИ приведена на рис. 1 (ОГР – оптогальваническая развязка).

В процессе преобразования постоянного напряжения в переменное в АИ коммутируются различные комбинации транзисторов. При одновременном включении трех полупроводниковых ключей образуются основные векторы, двух полупроводниковых ключей – промежуточные векторы. При включении двух транзисторов возникает короткое замыкание в АИ; такие комбинации включения транзисторов из анализа исключены. На рис. 2,а

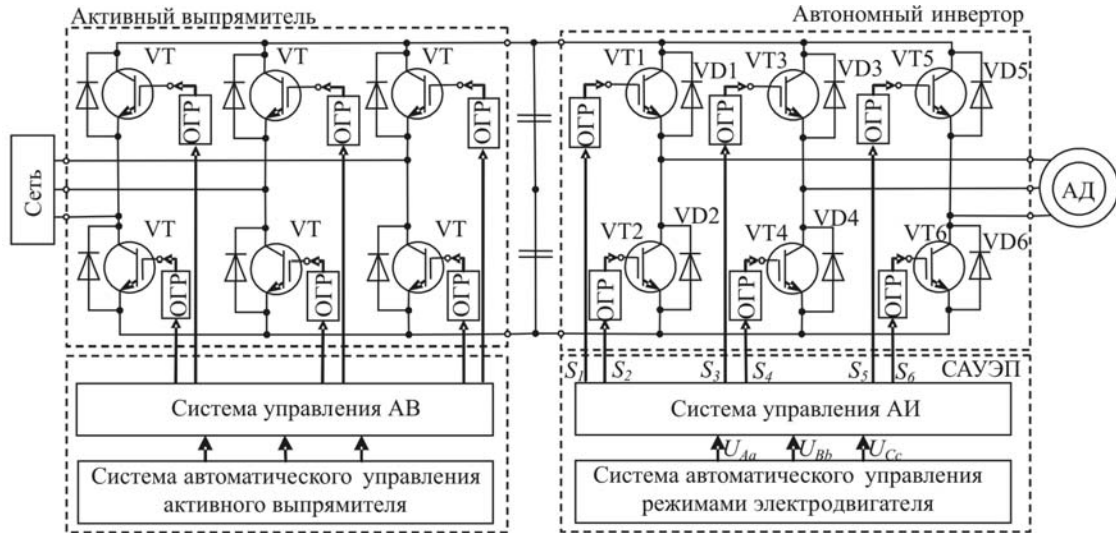


Рис. 1. Структурная схема электропривода с полупроводниковым преобразователем и асинхронным двигателем

показано расположение основных и промежуточных векторов на плоскости *ab*.

Одним из основных параметров, определяющих режим и эффективность работы АИ, является коэффициент модуляции:

$$m = \frac{U_f}{U_s}, \tag{1}$$

где U_f – амплитуда управляющего сигнала; U_s – амплитуда несущего сигнала.

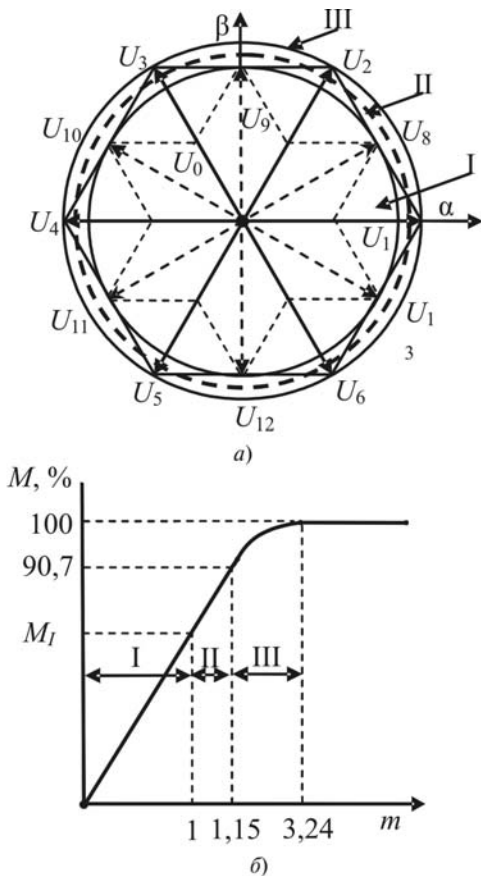


Рис. 2. Годограф выходного вектора напряжения АИ

Эффективность преобразования напряжения АИ можно определить с помощью коэффициента использования АИ по напряжению:

$$M = \frac{U_F}{U_{F \max}} \cdot 100\%, \tag{2}$$

где U_F – амплитуда основной гармоники фазного напряжения на выходе АИ; $U_{F \max}$ – максимально возможное значение амплитуды основной гармоники фазного напряжения на выходе АИ. Как известно, напряжение на выходе АИ можно разложить в ряд Фурье:

$$U = \frac{2}{p} U_{dc} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega t) = U_{m(n)} \sin(n\omega t), \tag{3}$$

где n – номер гармоники; U_{dc} – напряжение звена постоянного тока; $U_{m(n)}$ – мгновенное напряжение n -й гармоники.

Из (3) понятно, что максимально возможное значение амплитуды основной гармоники напряжения

$$U_{F \max} = U_{m(1)} = \frac{2}{p} U_{dc}, \tag{4}$$

тогда коэффициент использования АИ (2) по напряжению

$$M = \frac{2}{p} \frac{U_F}{U_{dc}} \cdot 100\%. \tag{5}$$

На рис. 2,б показана зависимость коэффициента использования АИ по напряжению от коэффициента модуляции.

На рис. 2,а и б выделены три области работы АИ, в каждой из которых коэффициент использования АИ по напряжению, следовательно и напряжение на выходе АИ, различается по амплитуде. Как известно, при использовании алгоритма сину-

соидальной широтно-импульсной модуляции с коэффициентом модуляции $m = 1$ амплитуда основной гармоники фазного напряжения на выходе АИ равна $U_{m(1)} = 0,5U_{dc}$, тогда значение коэффициента использования АИ по напряжению

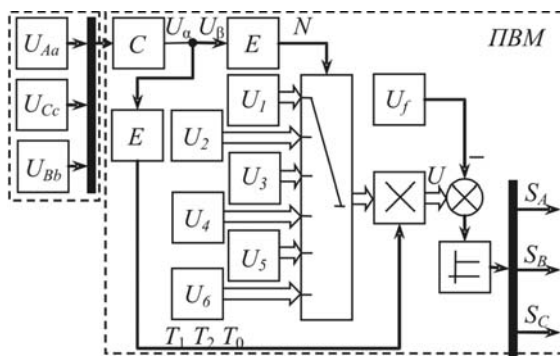
$$M_{I(\text{шим})} = \frac{\rho}{2} \frac{1}{2} \frac{U_{dc}}{U_{dc}} 100\% = 78,5\%. \quad (6)$$

Годограф выходного напряжения АИ с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией представляет собой круг, вписанный в шестиугольник, образованный основными векторами выходного напряжения АИ, как показано на рис. 2,а. Внутреннее пространство вписанного круга представляет собой область возможного изменения вектора выходного напряжения АИ с таким алгоритмом и на рис. 2,а и б обозначено как область I.

При использовании алгоритма широтно-импульсной модуляции с синусоидальной предмодуляцией коэффициент модуляции можно увеличить до $m = 1,155$. Тогда амплитуда основной гармоники фазного напряжения на выходе АИ увеличится на 15,5 % и станет равной $U_{m(1)} = 0,577U_{dc}$, а значение коэффициента использования АИ:

$$M_{II(\text{шим.сп})} = \frac{\rho}{2} \frac{0,577U_{dc}}{U_{dc}} 100\% = 90,7\%. \quad (7)$$

Для управления транзисторами в современных АИ может использоваться алгоритм пространственно-векторной модуляции. Принцип его 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 эффективным с точки зрения обеспечения наиболее высокого уровня электромагнитной совместимости и энергетики. Структурная схема алгоритма пространственно-векторной модуляции и форма управляющего сигнала показаны на рис. 3.



Коэффициент использования АИ по напряжению при использовании алгоритма пространственно-векторной модуляции

$$M_{II(\text{ПВМ})} = \frac{\rho}{2} \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_{dc}}{U_{dc}} 100\% = 90,7\%. \quad (8)$$

Годограф выходного напряжения АИ с двумя последними описанными алгоритмами также представлен на рис. 2,а (штриховой линией). Обозначенное как область II внутреннее пространство этого годографа на рис. 2,а и б представляет собой область возможного изменения вектора выходного напряжения АИ с этими алгоритмами. Подробное описание алгоритма пространственно-векторной модуляции приведено в [7–17].

Дальнейшего увеличения амплитуды выходного напряжения можно достичь при работе АИ в режиме перемодуляции. Годограф выходного напряжения АИ при работе в этом режиме представляет собой окружность, описанную вокруг шестиугольника, как показано на рис. 2,а. Внутреннее пространство окружности представляет собой область возможного изменения вектора выходного напряжения и на рис. 2,а и б обозначено как область III.

Обеспечение режима перемодуляции автономного инвертора. При использовании алгоритма широтно-импульсной модуляции. Режим перемодуляции АИ при использовании алгоритма широтно-импульсной модуляции реализуется, когда значение управляющего сигнала превышает значения несущего сигнала, т.е. когда управляющий сигнал выходит за пределы рабочей (активной) зоны несущего сигнала. Коэффициент модуляции в таком режиме становится больше единицы. При значительном увеличении коэффициента модуляции АИ переходит в режим фазной коммутации.

При использовании алгоритма пространственно-векторной модуляции. С таким управлением АИ режим перемодуляции можно организовать несколькими способами. Рассмотрим три способа пе-

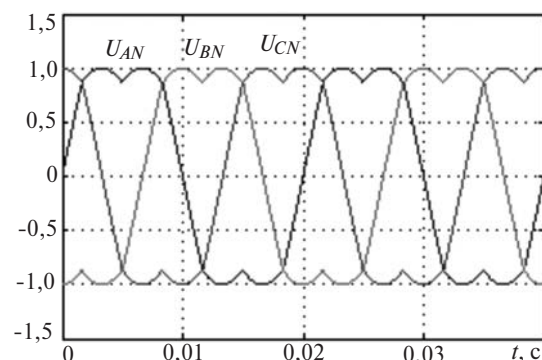


Рис. 3. Алгоритм пространственно-векторной модуляции: C (converter) – преобразователь; E (estimator) – вычислитель

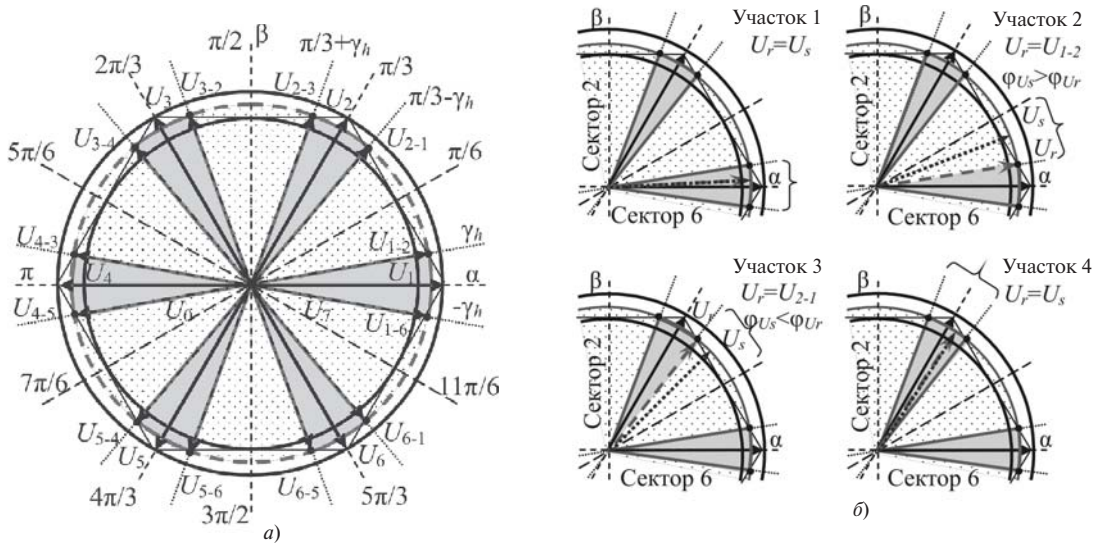


Рис. 4. Работа АИ в режиме переменнo-активной перемодуляции: а – фазовая плоскость ab; б – формирование выходного напряжения; пассивная зона помечена точками, активная затемнена

ремодуляции и их влияние на эффективность работы АИ.

Алгоритм переменнo-активной перемодуляции. Этот режим является наиболее простым с точки зрения сложности вычислительного алгоритма. На рис. 4 показаны годограф выходного напряжения АИ с переменнo-активной перемодуляцией, активные и пассивные фазовые плоскости, положение заданного и формируемого векторов напряжения АИ на каждом участке сектора.

Алгоритм переменнo-активной перемодуляции формируется следующим образом. Фазовая плоскость ab, помимо разбиения на секторы основными векторами выходного напряжения АИ, разбита еще и на подсекторы размером $\rho/6$. Круговая траектория движения заданного вектора выходного напряжения АИ на рис. 4,а показана штриховой линией.

В активной зоне (затемнена на рис. 4) выходной вектор напряжения АИ U_r перемещается синхронно с заданным вектором U_s . При выбранной траектории движения заданного вектора U_s , обозначенной на рис. 4,б штриховой линией, углы поворота и амплитуды обоих векторов при движении на первом участке имеют одинаковые значения.

Когда траектория заданного вектора U_s пересекает шестигранный годограф и продолжает круговое движение в пределах второго участка, вектор выходного напряжения U_r удерживается в постоянном положении с углом поворота g_h и постоянной амплитудой. Такое положение вектора выходного напряжения U_r сохраняется до того момента времени, пока угол поворота заданного вектора напряжения U_s не превысит $\rho/6$, т.е. до перехода вектора U_s во второй подсектор на третий участок. В этот момент вектор U_r мгновенно меняет угло-

вое положение с g_h на $\rho/3 - g_h$, сохраняя при этом амплитуду, и удерживается в этом положении в течение всего времени, пока вектор U_s перемещается на третьем участке. Таким образом, при движении заданного вектора U_s на втором и третьем участках вектор U_r находится в соответствующих фиксированных положениях, т.е. второй и третий участки являются пассивными (помечены точками на рис. 4).

Когда вектор напряжения U_s движется на четвертом активном участке, т.е. его угол поворота изменяется в пределах от $\rho/3 - g_h$ до $\rho/3 + g_h$, вектор выходного напряжения U_r формируется синхронно с ним.

Интервалы включения основных векторов при работе АИ в режиме переменнo-активной перемодуляции в активных зонах фазовой плоскости рассчитываются так же, как и в обычном алгоритме пространственно-векторной модуляции:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_c |U_c|}{U_{dc} e} \sin \frac{\rho}{3} N \cos j U_s - \cos \frac{\rho}{3} N \sin j U_s \frac{\dot{\theta}}{\omega} \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_c |U_c|}{U_{dc} e} \cos j U_s \sin \frac{\rho}{3} (N-1) - \sin j U_s \cos \frac{\rho}{3} (N-1) \frac{\dot{\theta}}{\omega} \quad (10)$$

$$T_0 = 0,5T_f - T_2 - T_1, \quad (11)$$

где N – номер сектора, в котором находится заданный вектор напряжения АИ.

Таким образом, при использовании данного алгоритма переменнo-активной перемодуляции закон формирования выходного напряжения АИ можно формализовать следующим образом:

$$U_r = U_s \begin{cases} \text{при } \frac{\rho(N-1)}{3} \leq j U_s < \frac{\rho(N-1)}{3} + g_h, \\ \text{при } \frac{\rho N}{3} - g_h \leq j U_s < \frac{\rho N}{3}; \end{cases} \quad (12)$$

$$U_r = \begin{cases} U_{(N)-(N+1)} \text{ при } \frac{\rho(N-1)}{3} + g_h \leq j U_s < \frac{\rho(2N-1)}{6}, \\ U_{(N+1)-(N)} \text{ при } \frac{\rho(2N-1)}{6} \leq j U_s < \frac{\rho N}{3} - g_h. \end{cases} \quad (13)$$

Алгоритм адаптивной перемодуляции. На рис. 5 показано разбиение фазовой плоскости на активные и пассивные участки при использовании алгоритма адаптивной перемодуляции АИ, положение векторов напряжения АИ на каждом участке первого сектора.

Вектор выходного напряжения с использованием алгоритма адаптивной перемодуляции формируется следующим образом. В течение всего времени движения заданного вектора напряжения U_s на первом участке, т.е. при изменении его углового положения в диапазоне от 0 до g_h (рис. 5,б), на выходе АИ формируется и удерживается напряжение, соответствующее вектору U_1 .

Если вектор U_s на втором и третьем участках перемещается внутри сектора, ограниченного шестиугольным годографом, то вектор U_r формируется по классическому алгоритму ПВМ, а интервалы включения базовых векторов рассчитываются по (9)–(11).

Если заданный вектор выходит за границы вписанной в шестиугольник окружности, т.е. увеличивается его амплитуда, алгоритм формирования изменяется, а именно, на периоде модуляции работают только активные векторы (нулевые векторы исключаются из процесса формирования выходного

вектора напряжения). Интервалы включения активных векторов можно рассчитать следующим образом:

$$T_1 = \frac{T_f}{3} \frac{2}{\rho} j U_s; \quad (14)$$

$$T_2 = T_f - T_1; \quad (15)$$

$$T_0 = 0. \quad (16)$$

В этом случае изменяется скорость поворота выходного вектора напряжения U_r . Расположение заданного и действующего векторов напряжения на втором участке фазовой плоскости показано на рис. 5,б. На втором участке этот вектор отстает от заданного, а на третьем – опережает (см. рис. 5,б). Для реализации такого движения можно рассчитать угол поворота вектора выходного напряжения:

$$j U_r = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 \leq j U_s \leq g_h; \\ \frac{j U_s - g_h \rho}{\rho/6 - g_h/6} \text{ при } g_h \leq j U_s \leq \rho/3 - g_h; \\ \frac{\rho}{3} \text{ при } \rho/3 - g_h \leq j U_s \leq \rho/3. \end{cases} \quad (17)$$

Когда заданный вектор напряжения переходит на четвертый участок первого сектора и движется в его пределах, т.е. при изменении угла поворота вектора напряжения от $\rho/3$ до $\rho/3 - g_h$, на выходе АИ формируется и удерживается в течение всего этого времени напряжение, соответствующее вектору U_2 .

В данном алгоритме активные и пассивные зоны на фазовой плоскости обратны аналогичным областям, которые образуются при использовании алгоритма переменного-активной перемодуляции.

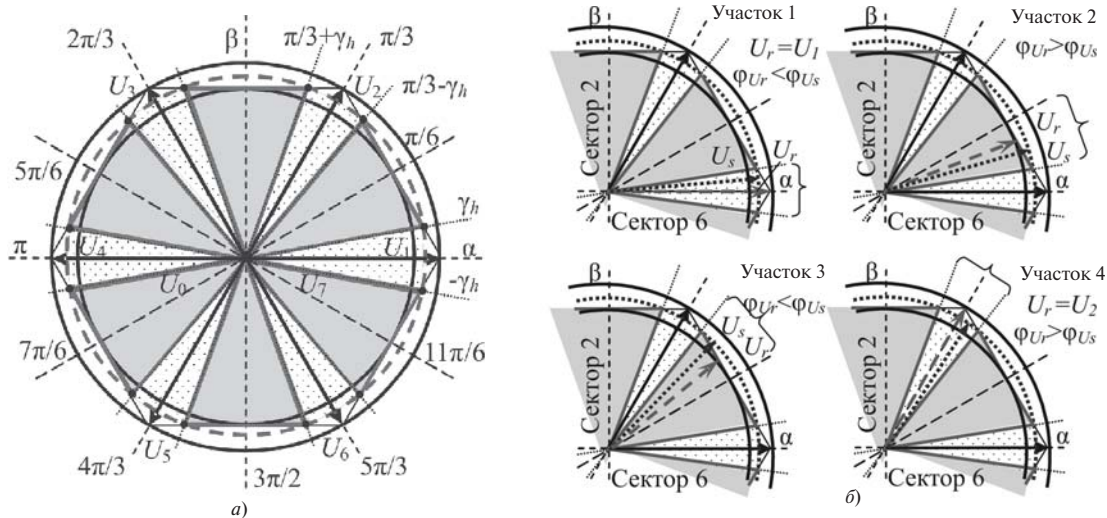


Рис. 5. Работа АИ в режиме адаптивной перемодуляции: а – фазовая плоскость аb; б – формирование выходного напряжения; пассивная зона помечена точками, активная затемнена

Алгоритм синхронной перемодуляции. На рис. 6 показаны разбиение фазовой плоскости при использовании алгоритма синхронной перемодуляции АИ, положение заданного и формируемого векторов напряжения АИ.

При движении заданного вектора напряжения U_s на первом участке фазовой плоскости, т.е. в пределах сегмента, ограниченного углом от 0 до ϑ_h , формируемый на выходе АИ вектор напряжения U_r движется синхронно с первым. При этом амплитуда вектора выходного напряжения ограничена внутренней окружностью, вписанной в шестиугольный годограф. Траектория движения формируемого вектора напряжения U_r ограничена внутренним радиусом.

На втором участке первого сектора, где годограф вектора U_s ограничен сегментом фазной плоскости от ϑ_h до $\pi/3 - \vartheta_h$, выходной вектор также совпадает по направлению с заданным и движется синхронно с ним, но по амплитуде ограничен шестиугольным годографом, образуемым активными векторами АИ. Выходной вектор напряжения на третьем участке первого сектора в сегменте фазовой плоскости, ограниченном сектором от $\pi/3 - \vartheta_h$ до $\pi/3$, формируется аналогично первому участку. При движении на первом и третьем участках, а также на аналогичных им в других секторах интервалы включения базовых векторов рассчитываются по (9)–(11).

На втором участке первого сектора и аналогичных ему участках в других секторах на модуляционном интервале отсутствует время действия нулевых векторов, а интервалы включения базовых векторов рассчитываются по выражениям:

$$T_1 = \frac{K_M \sin(60^\circ - j U_s)}{K_M \sin j U_s + K_M \sin(60^\circ - j U_s)} T_f; \quad (18)$$

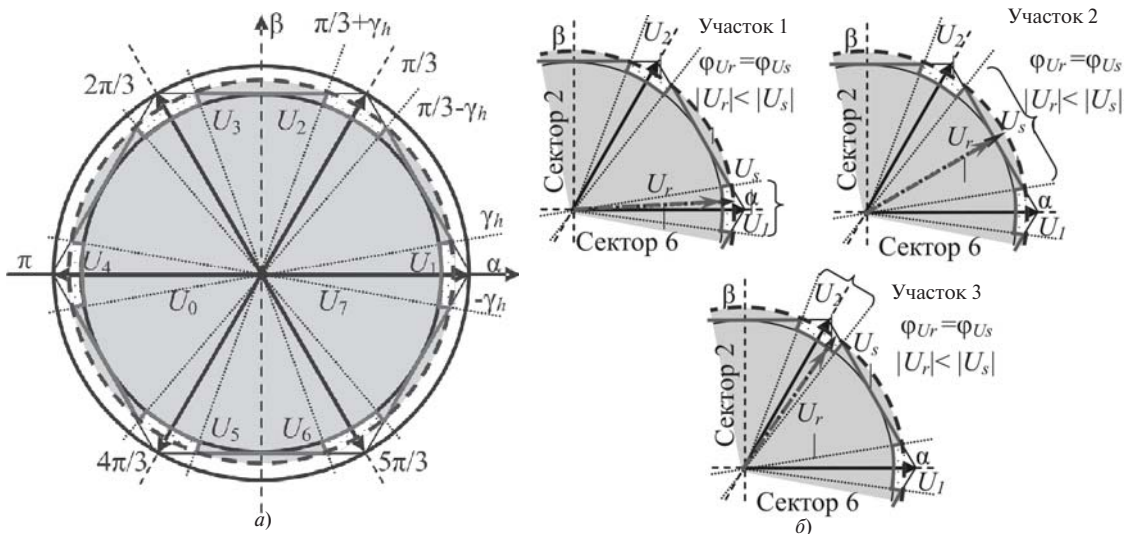


Рис. 6. Работа АИ в режиме синхронной перемодуляции: а – фазовая плоскость $\alpha\beta$; б – формирование выходного напряжения; пассивная зона помечена точками, активная затемнена

$$T_2 = T_f - T_1; \quad (19)$$

$$T_0 = 0. \quad (20)$$

В остальных случаях интервалы включения активных векторов рассчитываются по (9)–(11).

Анализ эффективности функционирования и преобразования электрической энергии в автономном инверторе при работе в режиме перемодуляции. На рис. 7 представлены формы фазных напряжений и токов на выходе АИ, а также показаны первые гармоники фазных напряжений при разных способах перемодуляции алгоритма пространственно-векторной модуляции и спектральные составы выходного напряжения и тока АИ.

На рис. 8 показано изменение характеристик эффективности функционирования АИ при разных алгоритмах управления и перемодуляции.

Анализ рис. 7 и 8 позволяет сделать следующие выводы об эффективности работы АИ с разными алгоритмами перемодуляции:

алгоритм пространственно-векторной модуляции без передмодуляции обеспечивает практически синусоидальную форму кривой тока, но при этом АИ недоиспользован по напряжению, а коэффициент искажения напряжения очень значителен;

все три рассмотренных алгоритма перемодуляции обеспечивают работу АИ с коэффициентом использования инвертора по напряжению, равным единице;

синхронный алгоритм обеспечивает максимально возможное использование АИ по напряжению и минимальное искажение напряжения и тока при одинаковой длительности периода пространственно-векторной модуляции, а следовательно, и частоте коммутации.

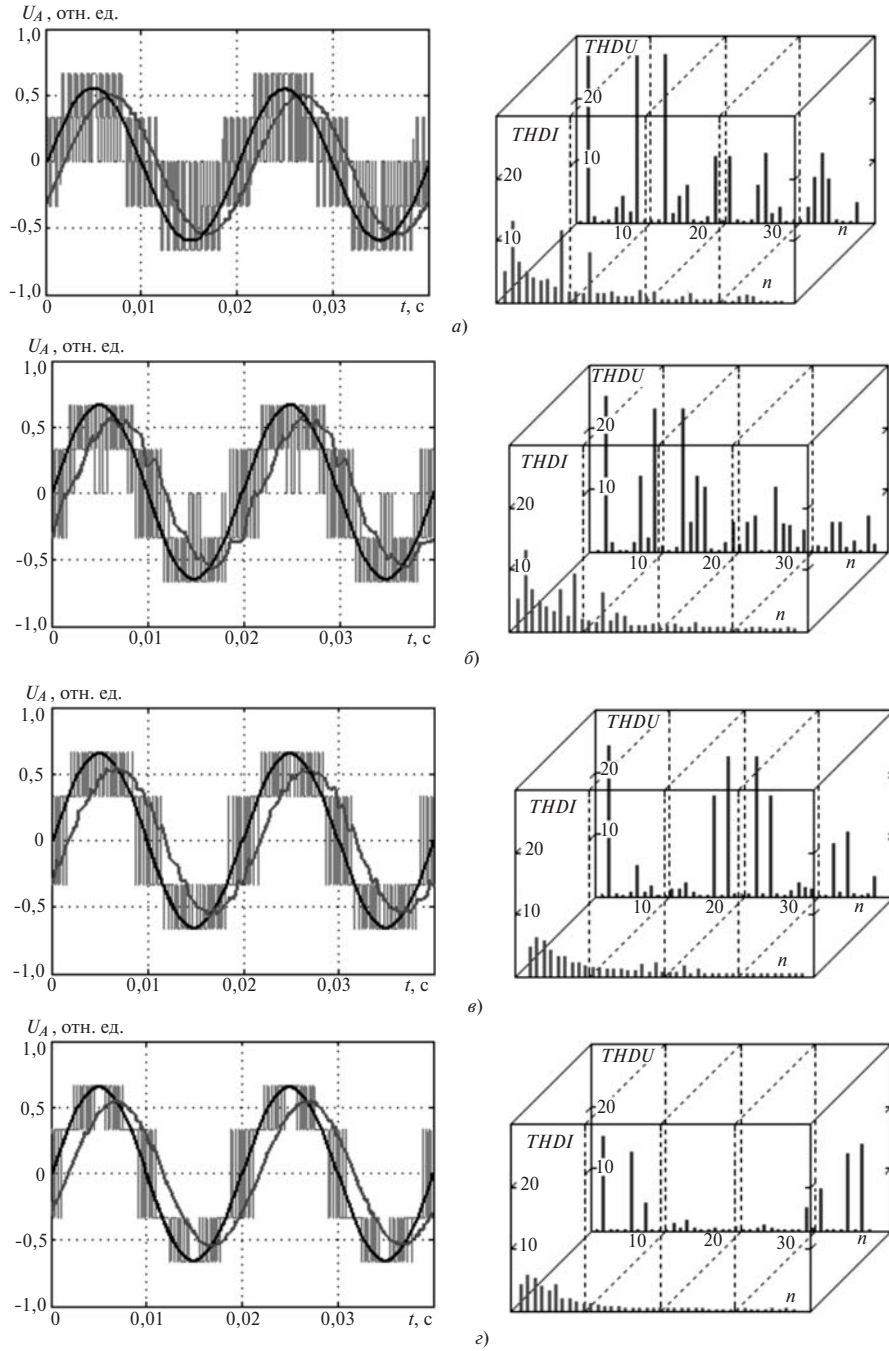


Рис. 7. Форма напряжений и токов на выходе АИ с разными алгоритмами перемодуляции: а – пространственно-векторной; б – переменного-активной; в – адаптивной; г – синхронной

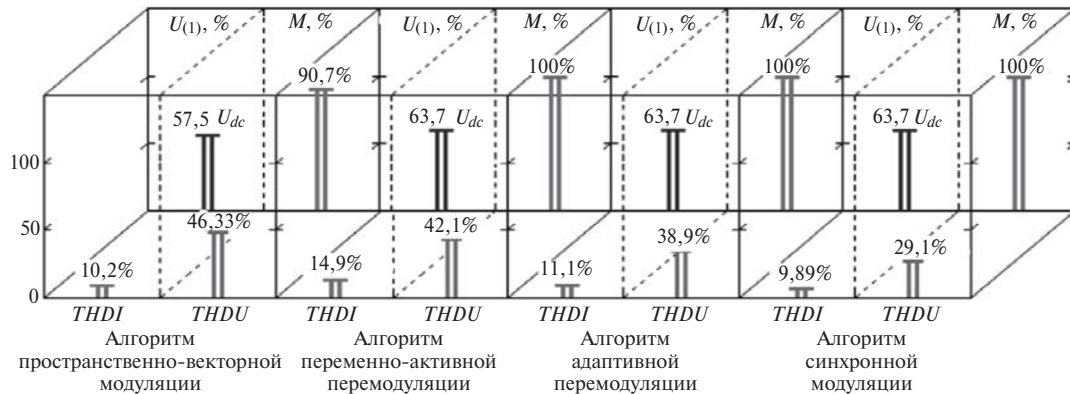


Рис. 8. Изменение коэффициентов искажения напряжений и тока, амплитуды первой гармоники напряжения и коэффициента использования АИ по напряжению при разных алгоритмах управления

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. **Васильев Б.Ю.** Повышение энергетических и динамических характеристик электроприводов систем динамического позиционирования плавучих платформ. – Газовая промышленность, 2014, № 8, с. 29–33.
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. **Козярук А.Е., Васильев Б.Ю.** Структура, состав и алгоритмы управления высокоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов. – Электротехника, 2013, № 2, с. 43–51.
5. **Емельянов А.П., Васильев Б.Ю.** Алгоритмы и технические средства управления автоматизированным электроприводом турбомеханизмов. – Вестник Ивановского энергетического университета, 2013, № 1, с. 92–96.
6. **Козярук А.Е., Васильев Б.Ю.** Алгоритмы управления энергоэффективным высокооборотным электроприводом газоперекачивающего агрегата. – Изв. вузов. Электромеханика, 2012, № 3, с. 40–44.
7. **Усолицев А.А.** Частотное управление асинхронными двигателями. – Санкт-Петербург: СПбГУ. Институт точной механики и оптики, 2006, 94 с.
8. **Шрейнер Р.Т., Калыгин А.И., Кривовяз В.К.** Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «РГППУ», 2012, 223 с.
9. **Васильев Б.Ю., Добуш В.С.** Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах. – Электричество, 2014, № 4, с. 54–61.

10. **Васильев Б.Ю., Козярук А.Е.** Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом. – Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2013, т. 13, № 2, с. 75–84.

11. **Васильев Б.Ю., Добуш В.С.** Применение алгоритмов управления с целью повышения эффективности и электромагнитной совместимости автономных инверторов. – Промышленная энергетика, 2014, № 9, с. 40–45.

12. **Васильев Б.Ю.** Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления. – Электричество, 2014, № 9, с. 44–51.

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

14. **Kozyaruk A.E., Vasilev V.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.

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

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

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

[08.09.14]

Автор: Васильев Богдан Юрьевич окончил в 2010 г. Ухтинский государственный технический университет. Диссертацию на соискание степени кандидата технических наук защитил в 2013 г. в Национальном минерально-сырьевом университете (Горный) (Санкт-Петербург). Преподаватель кафедры «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика» Национального минерально-сырьевого университета (Горный).

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 6, pp. 47–55.

Organizing a Re-modulation Mode and Achieving More Efficient Energy Conversion in Self-excited Power Inverters for Electric Drives

B.Yu. VASIL'YEV

The algorithms for pulse-width and spatial-vector modulation control of transistors in a self-excited inverter are considered from the viewpoint of efficiency of electric energy conversion in them. It is shown that for achieving more efficient operation of the inverter, different re-modulation algorithms can be used, namely, variable-active, adaptive and synchronous modulation. The level of electromagnetic compatibility provided by the self-excited inverter fitted with the above-mentioned re-modulation algorithms and the change of its power-performance characteristics are analyzed. The results from the performed investigations show that application of re-modulation algorithms is quite justified and ensures higher levels of such energy conversion efficiency indicators as voltage and current waveform distortion factors and the self-excited inverter utilization factor by voltage, by the fundamental harmonic component at the equal period of spatial-vector modulation and, hence, the switching frequency.

Key words: *self-excited inverter, power performance efficiency, control algorithm, spatial-vector modulation, re-modulation*

REFERENCES

1. **Vasil'yev B.Yu.** *Avtomatizirovannyyi elektropriwod ob'yektov mineral'no-syr'yevogo kompleksa (primeneniye, modelirovaniye, issledovaniye)* (Automated Electric Drives for Facilities of the Mineral and Raw Material Complex (Application, Simulation, and Investigation)). – St. Petersburg, Publ. Univers. Gornyyi, 2014, 139.

2. **Vasil'yev B.Yu.** *Gazovaya promyshlennost' – in Russ. (Gas industry)*, 2014, No. 8, pp. 29–33.

3. **Vasil'yev B.Yu.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye – in Russ. (Mechatronics, automation, control)*, 2013, No. 3, pp. 55–60.

4. **Kozyaruk A.E., Vasil'yev B.Yu.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2013, No. 2, pp. 43–51.

5. **Emel'yanov A.P., Vasil'yev B.Yu.** *Vestnik Ivanovskogo energeticheskogo universiteta – in Russ. (News of Ivanovo Power Engineering Univer.)*, 2013, No. 1, pp. 92–96.
6. **Kozyaruk A.E., Vasil'yev B.Yu.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electrical Mechanics)*, 2012, No. 3, pp. 40–44.
7. **Usol'tsev A.A.** *Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* (Adjustable-frequency control of asynchronous motors). St. Petersburg, Publ. St. Petersburg Gos. Univer., 2006, 94 p.
8. **Shreiner R.I., Kalygin A.I., Krivoyaz V.K.** *Elektroprivody peremennogo toka na baze neposredstvennykh preobrazovatelei chastoty ShIM* (AC Electric Drives on the Basis of Direct Frequency Converters with PWM.). Ekaterinburg, Publ. Russ. Gos. Prof.-ped. Univer., 2012, 223 p.
9. **Vasil'yev B.Yu., Dobush V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 4, pp. 54–61.
10. **Vasil'yev B.Yu., Kozyaruk A.E.** *Vestnik Yuzhno Ural'skogo Gos. Univer. Energetika – in Russ. (Bulletin of the Yuzhno-Ural'sk State Univer. Power Engineering)*, 2013, vol. 13, No. 2, pp. 75–84.
11. **Vasil'yev B.Yu., Dobush V.S.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2014, No. 9, pp. 40–45.
12. **Vasil'yev B.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 9, pp. 44–51.
13. **Vasil'yev B.Yu.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electrical Mechanics)*, 2014, No. 1, pp. 71–75.
14. **Kozyaruk A.E., Vasilev 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.
15. **Prinin M.V., Vorontsov A.G.** *Silovye polnost'yu upravlyayemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovaniye i raschet)/Pod red. E.A. Krutyakova (Power semiconductor converters with gate turn-off switches (modeling and calculation))/Edit. By E.A. Krutyakov. St. Petersburg. Elektrosila*, 2003, 172 p.
16. **Lattarulo F.** *Electromagnetic Compatibility in Power Systems*. – Elsevier Ltd. 2007, 324 p.
17. **Warne D.F.** *Newnes Electrical Power Engineer's Handbook*. – Newnes, 2005, 480 p.

Author: Vasil'yev Bogdan Yur'yevich (St. Petersburg, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Lecturer in the National Mineral Resource University «Gornyi».