

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 621.313

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-85-93

### Варианты формирования симметричного семифазного выходного напряжения вентильного преобразователя

В.М. Терешкин, Д.А. Гришин, С.П. Баландин, В.В. Терешкин

Семифазный мостовой преобразователь имеет 128 логических состояний. При подключении к преобразователю семифазной симметричной обмотки каждое логическое состояние формирует пространственно-временной результирующий вектор напряжения. Всего преобразователь может сформировать 126 активных и 2 нулевых вектора. Цель работы — изучение и классификация векторного пространства при реализации алгоритмов управления преобразователем, формирующих пространственно-векторную модуляцию напряжения семифазной симметричной обмоткой.

Установлено, что существуют девять алгоритмов управления, формирующих симметричное семифазное напряжение с различными формами фазного напряжения. Каждой форме соответствует определенная величина первой гармоники фазного напряжения. Амплитуда первой гармоники соответствует модулю обобщенного пространственно-временного вектора напряжения дискретных состояний.

Исследованы векторные пространства фазных векторов напряжения, соответствующие логическим состояниям преобразователя и формирующие результирующие векторы, а также векторные пространства обобщенных векторов напряжения. Получены численные значения результирующих и обобщенных векторов напряжения.

При исследованиях использованы методы векторного анализа и методы разложения функций в ряды Фурье. Теоретические исследования прошли экспериментальную проверку. Эксперименты проводились на стенде, предназначенном для исследования пространственно-векторной модуляции многофазных двигателей с использованием макетного образца семифазного двигателя. Результаты могут быть использованы при реализации нелинейных систем векторного управления семифазного двигателя.

*Ключевые слова:* семифазные обмотка и преобразователь, логические состояния преобразователя, пространственная векторная модуляция напряжения, результирующий и обобщенный векторы дискретных состояний.

*Для цитирования:* Терешкин В.М., Гришин Д.А., Баландин С.П., Терешкин В.В. Варианты формирования симметричного семифазного выходного напряжения вентильного преобразователя // Вестник МЭИ. 2022. № 1. С. 85—93. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-85-93.

### Options of Shaping a Symmetrical Seven-Phase Output Voltage of a Valve Converter

V.M. Tereshkin, D.A. Grishin, S.P. Balandin, V.V. Tereshkin

A seven-phase bridge converter has 128 logical states. When a seven-phase symmetric winding is connected to the converter, each logical state produces a spatial-temporal resulting voltage vector. In total, the converter can produce 126 active vectors and 2 zero vectors. The aim of the work is to study and classify the vector space in implementing the converter control algorithms performing spatial-vector modulation of the voltage by a seven-phase symmetric winding.

It has been determined that there are nine control algorithms that form a symmetrical seven-phase voltage with various phase voltage waveforms. Each waveform corresponds to a certain value of the phase voltage fundamental harmonic component. The fundamental harmonic amplitude corresponds to the modulus of the generalized spatial-temporal voltage vector of discrete states.

The vector spaces of phase voltage vectors corresponding to the converter logical states and shaping the resulting vectors, and also the vector spaces of generalized voltage vectors are investigated. The numerical values of the resulting and generalized voltage vectors are obtained.

In carrying out the study, the vector analysis methods and methods of expanding functions into Fourier series were used. The theoretical studies have been tested experimentally. The experiments were carried out on a bench intended for studying the spatial-vector modulation of multiphase motors using a prototype seven-phase motor.

The results can be used to implement nonlinear vector control systems for a seven-phase motor.

**Key words:** seven-phase winding, seven-phase converter, converter logic states, spatial-vector voltage modulation; resulting and generalized discrete state vectors.

**For citation:** Tereshkin V.M., Grishin D.A., Balandin S.P., Tereshkin V.V. Options of Shaping a Symmetrical Seven-Phase Output Voltage of a Valve Converter. Bulletin of MPEI. 2022;1:85—93. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-85-93.

## Введение

В настоящее время трехфазные двигатели — самые распространенные и широко применяемые электро-механические преобразователи энергии. Развитие теории, разработка и применение трехфазного двигателя с вращающимся полем (а ни пяти- или семифазного) было предопределено трехфазной системой электроснабжения.

Однако современный уровень развития силовой электроники и преобразовательной техники, информационных технологий и микроконтроллеров позволяет создать преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока на любое число фаз: 3, 4, 5, 6, 7 и т. д.

Двигатель с числом фаз более трех может быть разработан на основе магнитной системы трехфазной машины при модернизации схемы рабочей обмотки.

В настоящее время существует большое количество публикаций, посвященных повышению качества электроприводов на основе трехфазного двигателя, в которых рассматриваются различные аспекты векторного управления [1 — 6]. Также имеются разработки многофазной электротяги, располагающиеся в области практического применения [7]. Большой интерес к повышению качества электропривода проявляют разработчики электромобилей, водного и железнодорожного транспорта [8].

Преимущества электроприводов на основе многофазных двигателей по сравнению с трехфазными электроприводами — снижение номинального фазного тока, понижение вибраций электромагнитного происхождения, повышение надежности, а также дополнительные возможности при реализации управления [9 — 13].

Следовательно, исследования в области многофазных электромеханических систем актуальны и имеют научное и практическое значение.

Настоящая работа посвящена исследованию семифазной электромеханической системы, а именно, алгоритмам управления семифазного преобразователя, реализующего пространственно-векторную модуляцию напряжения семифазной симметричной обмоткой.

На рисунке 1 изображена функциональная схема семифазного вентильного преобразователя (ВП), подключенного к симметричной семифазной обмотке ( $ABCDEF G$ ) двигателя с вращающимся полем (ЭД),

соединенной по схеме «звезда». Преобразователь подключен к источнику питания (ИП) с напряжением  $U_{вх}$ . Анодная группа ключей (АГ) обозначена нечетными, а катодная группа ключей (КГ) — четными числами. Входное напряжение преобразователя равно единице.

Семифазный преобразователь имеет  $2^7 = 128$  логических состояний. Если верхний ключ плеча преобразователя замкнут, а нижний разомкнут, логическое состояние плеча преобразователя — «1». Если верхний ключ плеча преобразователя разомкнут, а нижний замкнут, логическое состояние плеча — «0». Так, логическое состояние 1000000 соответствует замкнутому ключу 1 (при разомкнутом ключе 2) и разомкнутым ключам 3, 5, 7, 9 (при замкнутых ключах 4, 6, 8, 10).

Каждое логическое состояние соответствует дискретному пространственно-временному (результатирующему) вектору напряжения, формируемому семифазной симметричной обмоткой. Процесс формирования пространственно-временных векторов дискретных состояний принято называть пространственно-векторной модуляцией.

Логические состояния 0000000 и 1111111 соответствуют замыканию фаз семифазной обмотки нижними или верхними ключами. Векторы, формирующиеся при этом семифазной обмоткой, принято называть нулевыми векторами. Таким образом, семифазная обмотка формирует 126 активных и 2 нулевых векторов. Хотя более корректна формулировка: существует два логических состояния преобразователя, которые формируют нулевые векторы, поскольку нулевой вектор является реакцией на предыдущий активный вектор.

Применять нулевые векторы при формировании фазного напряжения трехфазного двигателя предло-

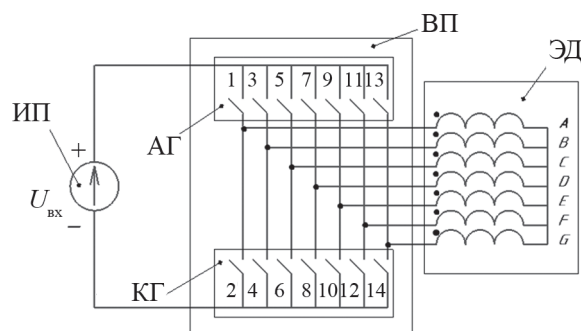


Рис. 1. Функциональная схема семифазной системы

жил I. Takahashi [14]. Его подход был альтернативой идеям F. Blaschke [15], основанным на реализации линейного векторного управления с использованием режима SPWM, также для трехфазного двигателя.

Уникальные свойства семифазной обмотки, связанные с увеличением пространственной дискретности, позволяют предположить, что при реализации электропривода на основе семифазного двигателя, используются более простые способы управления. Увеличение пространственной дискретности компенсирует необходимость роста временной дискретности. Векторное управление можно осуществлять с помощью нелинейной системы управления, используя обычную 14-ступенчатую коммутацию, а применение режима SPWM или «нулевого вектора» становятся избыточными.

Кроме того, применение семифазного двигателя вместо трехфазного позволяет снизить номинальный фазный ток и уменьшить токовую нагрузку на ключи, понизить уровень вибраций электромагнитного происхождения, а также повысить уровень надежности электромеханической системы. Экспериментально установлено, что при обрыве даже четырех фаз семифазный двигатель не теряет работоспособности, а увеличение активного сопротивления фазы положительно влияет на процесс коммутации ключей преобразователя, коммутирующих токи меньшей величины, по сравнению с трехфазным двигателем.

При формировании симметричного семифазного напряжения реализуется 14-ступенчатая коммутация. При этом 126 логических состояний преобразователя (126 активных векторов) формируют  $126/14 = 9$  вариантов симметричного семифазного напряжения с различными формами фазного напряжения.

Для сравнения, трехфазная система имеет  $2^3 = 8$  состояний преобразователя и может сформировать 6 активных и 2 нулевых векторов. Симметричное трехфазное напряжение формируется 6-ступенчатой коммутацией, следовательно, возможна  $6/6 = 1$  форма фазного напряжения. Пятифазная система обладает  $2^5 = 32$  логических состояний преобразователя и формирует 30 активных и 2 нулевых векторов. Симметричное пятифазное напряжение формируется 10-ступенчатой коммутацией, следовательно, возможно  $30/10 = 3$  формы фазного напряжения.

Приведенные рассуждения справедливы в том случае, если при формировании симметричного семифазного напряжения применяется коммутация в семь ключей. Также можно формировать симметричное семифазное напряжение «аккордами» в шесть, пять, четыре, три и два ключей. При этом реализуется 14-ступенчатая коммутация, но некоторые плечи моста в течение периода не загружены. Наиболее интересен режим коммутации в шесть ключей.

Исследованы два (из девяти возможных) алгоритмы работы преобразователя, формирующих симметричное семифазное напряжение и реализующих про-

странственно-векторную модуляцию напряжения. Каждый алгоритм формирует векторное пространство дискретных векторов, некоторые из них описаны в [16].

Изучены режимы, соответствующие временной последовательности чередования фаз *ABCDEFGF*, т. е. режимы «по первой гармонике». В [17] установлено, что симметричная семифазная обмотка при временной последовательности чередования фаз *ABCDEFGF* является «фильтром» для высших пространственно-временных гармоник. Только первая временная гармоника фазного напряжения симметричной семифазной обмотки становится пространственно-временной.

Существуют режимы временной последовательности чередования фаз *ACEGBDF* и *ADGCFBE*. Форма фазного напряжения с усиленной пятой временной гармоникой (вариант 9) эффективна для временной последовательности чередования фаз *ACEGBDF*, а форма фазного напряжения с усиленной третьей временной гармоникой [16] — для временной последовательности чередования фаз *ADGCFBE*. Под эффективностью подразумевается следующее. При временной последовательности чередования фаз *ACEGBDF* рабочим результирующим вектором является вектор пятой гармоники. Частота преобразователя  $f$  соответствует частоте вращения вектора  $5f$ . Количество коммутируемых ключей за период возрастает и становится равным  $70 = 14 \cdot 5$ , а модуль дискретного результирующего вектора напряжения по пятой гармонике имеет максимально возможную величину. Такой же величиной обладает модуль результирующего вектора дискретного состояния по первой гармонике при временной последовательности чередования фаз *ABCDEFGF*. Указанные векторы принадлежат к семейству векторов по варианту 1 и имеют максимальную величину. Хотя, при разложении в ряд Фурье соответствующих функций фазного напряжения, получим 0,637 и 0,555 — амплитуды первой и пятой временных гармоник. Фактически, это модули обобщенных векторов непрерывного вращения. Следовательно, модуль вектора непрерывного вращения по первой гармонике больше модуля вектора непрерывного вращения по пятой гармонике на 15%.

Аналогичные исследования проведены для пятифазной обмотки при временной последовательности чередования фаз *ACEBD* [18].

Возможные варианты последовательностей логических состояний преобразователя, или алгоритмы управления преобразователя (9 выборов по 14 из 126), формирующие симметричное семифазное напряжение, имеют следующий вид.

#### Вариант 1

1000111, 1000011, 1100011, 1100001, 1110001, 1110000, 1111000, 0111000, 0111100, 0011100, 0011110, 0001110, 0001111, 0000111.

14 коммутаций за период.

*Вариант 2*

1010100, 1011010, 0101010, 0101101, 0010101, 1010110,  
1001010, 0101011, 0100101, 1010101, 1010010, 1101010,  
0101001, 0110101.

14·3 = 42 коммутации за период.

*Вариант 3*

0000011, 1100111, 1000001, 1110011, 1100000, 1111001,  
0110000, 1111100, 0011000, 0111110, 0001100, 0011111,  
0000110, 1001111.

14·3 = 42 коммутации за период.

*Вариант 4*

1000110, 1001011, 0100011, 1100101, 1010001, 1110010,  
1101000, 0111001, 0110100, 1011100, 0011010, 0101110,  
0001101, 0010111.

14·3 = 42 коммутации за период.

*Вариант 5*

1000100, 1011011, 0100010, 1101101, 0010001, 1110110,  
1001000, 0111011, 0100100, 1011101, 0010010, 1101110,  
0001001, 0110111.

14·5 = 70 коммутаций за период.

*Вариант 6*

1001110, 0001011, 0100111, 1000101, 1010011, 1100010,  
1101001, 0110001, 1110100, 1011000, 0111010, 0101100,  
0011101, 0010110.

14·3=42 коммутации за период.

*Вариант 7*

1010111, 1000010, 1101011, 0100001, 1110101, 1010000,  
1111010, 0101000, 0111101, 0010100, 1011110, 0001010,  
0101111, 0000101.

14·3 = 42 коммутации за период.

*Вариант 8*

1101111, 0000001, 1110111, 1000000, 1111011, 0100000,  
1111101, 0010000, 1111110, 0001000, 0111111, 0000100,  
1011111, 0000010.

14·5 = 70 коммутаций за период.

*Вариант 9*

1101100, 0011001, 0110110, 1001100, 0011011, 0100110,  
1001101, 0010011, 1100110, 1001001, 0110011, 1100100,  
1011001, 0110010.

14·5 = 70 коммутаций за период.

Исследованы варианты восемь и девять. Каждая выборка формирует симметричное семифазное напряжение с оригинальной формой фазного напряжения и оригинальные векторные пространства, соответствующие данным формам напряжения. Модули и начальная фаза результирующих дискретных векторов каждой выборки имеют определенные численные значения. Изучены векторные пространства, формируемые каждой выборкой.

Вектор 9-й выборки, формирующийся первым импульсом периода и соответствующий логическому состоянию преобразователя 1101100, обозначим числом 9.1. Вектор 1.14 принадлежит векторному пространству 1-й выборки, соответствует логическому состоянию преобразователя 0000111 и формируется условным 14-м импульсом периода.

Если одно из 14-ти логических состояний выборки варианта 9 поменять на любое другое логическое состояние другой выборки, например, варианта 1, (9.1 на 1.5), то симметричное семифазное напряжение по варианту 9 станет несимметричным. При этом поведение двигателя изменится, но изменения будут предсказуемы.

На рисунке 2 даны симметричное семифазное напряжение, а также теоретическая и экспериментальная формы фазного напряжения, соответствующие алгоритму управления по варианту 8.

На рисунке 3 изображены эквивалентная схема нагрузки преобразователя и векторное пространство фазных напряжений семифазной системы, формирующее результирующий дискретный пространственно-временной вектор напряжения  $\underline{U}_1$ .

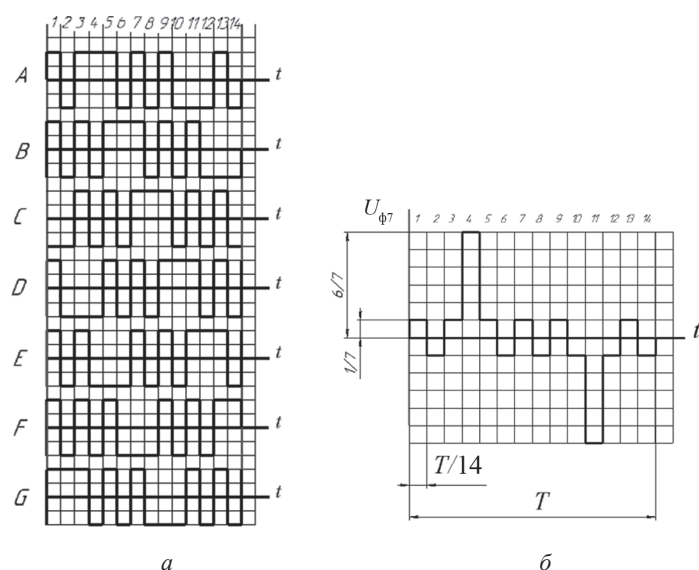


Рис. 2. Симметричное семифазное напряжение (а) и форма фазного напряжения (б, в) (вариант 8)



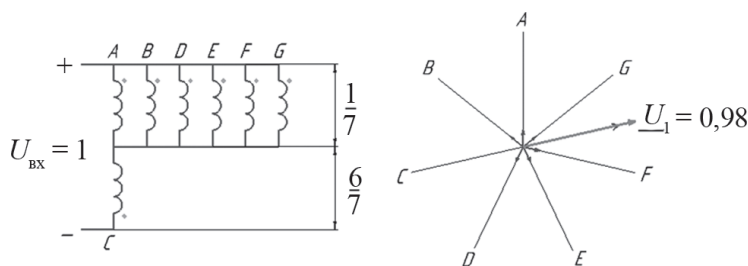


Рис. 3. Эквивалентная схема нагрузки преобразователя и векторное пространство фазных напряжений по варианту 8

Эквивалентная схема соответствует логическому состоянию 8.1 и месту в течение времени  $T/14$ , где  $T$  — период напряжения преобразователя. За время периода происходят 14 коммутаций, формируются 14 дискретных результирующих пространственно-временных векторов, пространственный шаг между векторами равен  $25,714$  эл. градусов, направление перемещения — против часовой стрелки, вектор соответствует первой гармонике фазного напряжения (см. рис. 2, б).

При единичном входном напряжении  $U_{vx} = 1$  модули векторов фазных напряжений равны

$$|U_A| = |U_B| = |U_D| = |U_E| = |U_F| = |U_G| = \frac{1}{7}, \quad |U_C| = \frac{6}{7},$$

а модуль результирующего вектора  $|U_1|$  определяется, как:

$$\begin{aligned} |U_1| &= |U_C| + \cos \frac{\pi}{7} |U_F| + \cos \frac{\pi}{7} |U_G| - \\ &- \cos \frac{2\pi}{7} |U_B| - \cos \frac{2\pi}{7} |U_D| + \cos \frac{3\pi}{7} |U_A| + \\ &+ \cos \frac{3\pi}{7} |U_E| = \frac{6}{7} + 2 \frac{1}{7} \cos \frac{\pi}{7} - 2 \frac{1}{7} \cos \frac{2\pi}{7} + \\ &+ 2 \frac{1}{7} \cos \frac{3\pi}{7} = \frac{6}{7} + \frac{2}{7} \cdot 0,901 - \frac{2}{7} \cdot 0,6235 + \frac{2}{7} \cdot 0,2225 = 1. \end{aligned}$$

Поскольку рабочая обмотка семифазная, модуль обобщенного вектора напряжения  $|U_1|_{об}$  составляет  $2/7$  от модуля результирующего вектора  $|U_1|$  и выглядит следующим образом:

$$|U_1|_{об} = \frac{2}{7} |U_1| = \frac{2}{7} \cdot 1 = 0,2857.$$

Векторное пространство обобщенных дискретных векторов напряжения семифазной системы приведено на рис. 4.

После разложения в ряд Фурье функции фазного напряжения, изображенной на рис. 2, б, амплитуда первой гармоники равна  $U_{m1(\Phi 7)} = 0,28$ . Таким образом, модуль вектора непрерывного вращения соответствует модулю обобщенного вектора дискретных состояний.

На рисунке 5 изображены симметричное семифазное напряжение, теоретическая и экспериментальная формы фазного напряжения, соответствующие алгоритму управления по варианту 9.

На рисунке 6 даны эквивалентная схема нагрузки преобразователя и векторное пространство фазных напряжений семифазной системы, формирующее результирующий дискретный пространственно-временной вектор напряжения  $U_1$ .

Эквивалентная схема соответствует логическому состоянию 9.1 в течение  $T/14$ . За время периода происходят 14 коммутаций, формируются 14 дискретных результирующих пространственно-временных векторов, пространственный шаг между векторами —  $25,714$  эл. градусов, направление перемещения — против часовой стрелки. Вектор соответствует первой гармонике фазного напряжения рис. 5, б.

При  $U_{vx} = 1$  модули векторов фазных напряжений равны

$$|U_A| = |U_B| = |U_D| = |U_E| = \frac{3}{7}, \quad |U_C| = |U_F| = |U_G| = \frac{4}{7},$$

а модуль результирующего вектора  $|U_1|$  равен:

$$\begin{aligned} |U_1| &= -|U_C| + \cos \frac{\pi}{7} |U_F| + \cos \frac{\pi}{7} |U_G| + \\ &+ \cos \frac{2\pi}{7} |U_B| + \cos \frac{2\pi}{7} |U_D| - \cos \frac{3\pi}{7} |U_A| - \\ &- \cos \frac{3\pi}{7} |U_E| = -\frac{4}{7} + 2 \frac{4}{7} \cos \frac{\pi}{7} + 2 \frac{3}{7} \cos \frac{2\pi}{7} - \\ &- 2 \frac{3}{7} \cos \frac{3\pi}{7} = -\frac{4}{7} + \frac{8}{7} \cdot 0,901 + \frac{6}{7} \cdot 0,6235 - \frac{6}{7} \cdot 0,2225 = 0,8. \end{aligned}$$

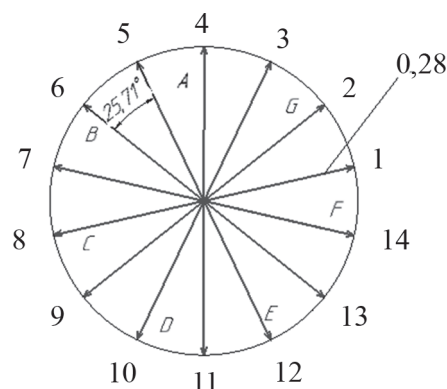


Рис. 4. Векторное пространство обобщенных дискретных векторов напряжения (вариант 8)

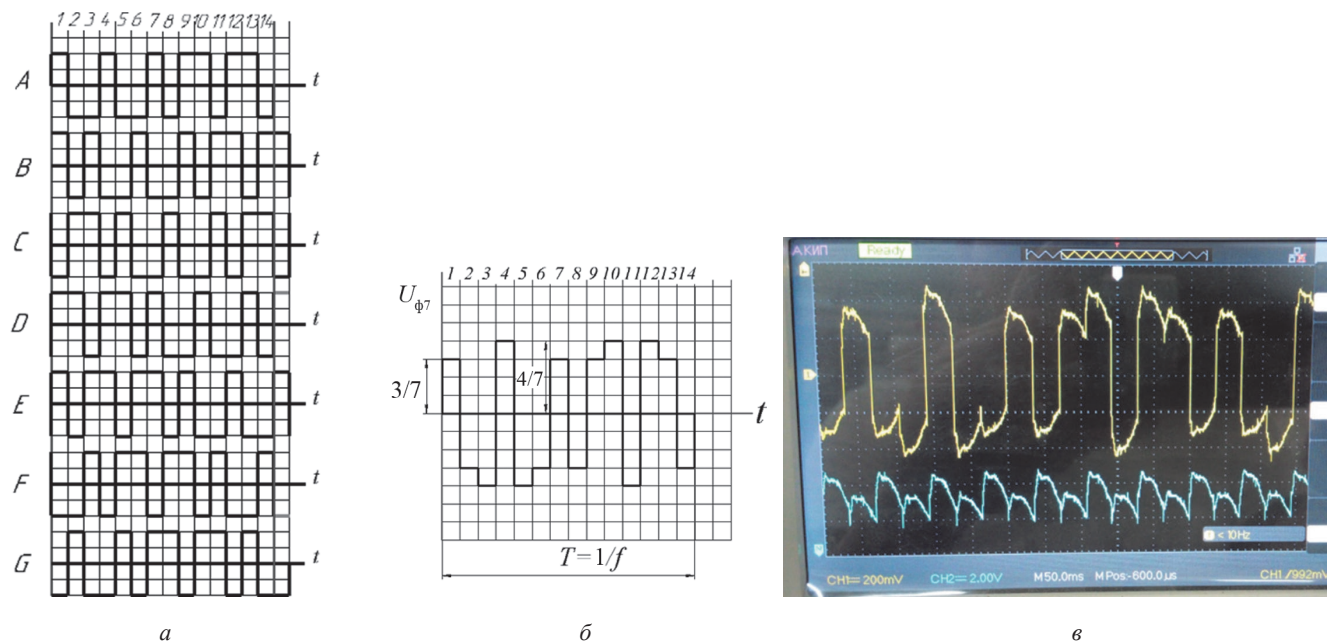


Рис. 5. Симметричное semifазное напряжение (а) и форма фазного напряжения (б, в) (вариант 9)

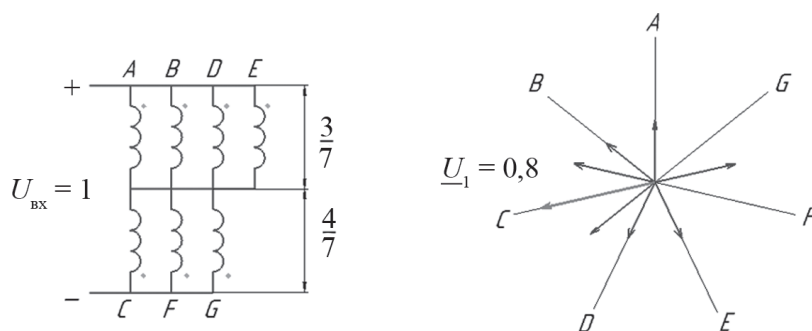


Рис. 6. Эквивалентная схема нагрузки преобразователя и векторное пространство фазных напряжений (вариант 9)

Поскольку рабочая обмотка semifазная, модуль обобщенного вектора напряжения  $|U_1|_{об}$  составляет  $2/7$  от модуля результирующего вектора  $U_1$  и равен

$$|U_1|_{об} = \frac{2}{7}|U_1| = \frac{2}{7} \cdot 0,8 = 0,2286.$$

Векторное пространство обобщенных дискретных векторов напряжения semifазной системы приведено на рис. 7.

После разложения в ряд Фурье функции фазного напряжения, показанной на рис. 5, б, амплитуда синуса первой гармоники приблизительно составляет  $U_{m1(\phi7)} = 0,22$ . Таким образом, модуль вектора непрерывного вращения соответствует модулю обобщенного вектора дискретных состояний, и начальная фаза вектора непрерывного вращения также соответствует векторному пространству из рис. 7.

**Обсуждение**

Результаты работы позволяют предположить, что алгоритмы управления 11-фазного преобразователя,

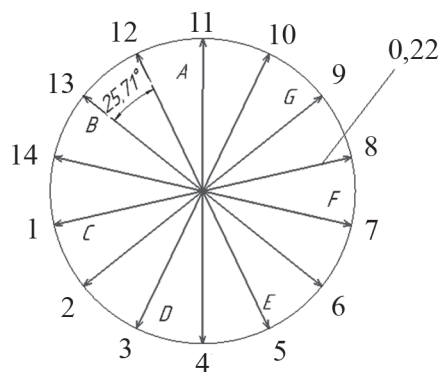


Рис. 7. Векторное пространство обобщенных дискретных векторов напряжения (вариант 9)

реализующего пространственно-векторную модуляцию напряжения в симметричной 11-фазной обмотке, имеют более широкий диапазон, а именно, 11-фазный преобразователь обладает  $2^{11} = 2048$  логических состояний, каждое из которых формирует результирующий вектор дискретных состояний в 11-фазной симметричной обмотке, 2046 активных векторов и 2 нулевых

вектора. По аналогии с приведенными рассуждениями 11-фазный преобразователь способен сформировать  $2046/22 = 93$  вида симметричного 11-фазного напряжения с оригинальной формой фазного напряжения (93 выборки по 22). Иными словами, существуют 93 оригинальные формы фазного напряжения (а не 9, как у семифазной симметричной системы, или 3, как у пятифазной).

Рассуждения справедливы и для 9-фазной системы с небольшими исключениями, математически связанными с тем, что девять кратно трем.

Общее количество логических состояний преобразователя определяется как  $2^9 = 512$ . При этом формируются 510 активных векторов и 2 нулевых вектора. Однако 9-фазный преобразователь способен сформировать  $(510 - 6)/18 = 28$  видов симметричного 9-фазного напряжения с оригинальными формами фазного напряжения (а не 9, как у семифазной симметричной обмотки и не 93, как у 11-фазной системы). Цифра 6 — результат кратности трем 9-ти и трехфазной обмоток. Аналогичные рассуждения справедливы для 13-ти, 15-фазных систем.

Величины модулей дискретных векторов (результатирующих и обобщенных) получены в результате графических построений, менее точных по сравнению с аналитическими расчетами. Поэтому итоги аналитических расчетов незначительно отличаются от результатов, приведенных на рисунках.

Амплитуды по первой гармонике синусоид функций (рис. 2, б, 5, б) приблизительно равны модулям обобщенных векторов дискретных состояний (рис. 4, 7).

Возможные величины модулей результирующих векторов дискретных состояний при формировании симметричного семифазного напряжения и единичном

входном напряжении преобразователя имеют следующие значения:

- 1) 2,247;
- 2) 0,555;
- 3) 1,8;
- 4) 1,41;
- 5) 0,44;
- 6) 1,41 (отличается от варианта 4 начальной фазой);
- 7) 1,24;
- 8) 0,98;
- 9) 0,8.

Все величины соответствуют амплитудам первой гармоники фазного напряжения в симметричной семифазной обмотке. Временная последовательность чередования фаз — *ABCDEFGF*.

Результаты могут быть полезны при реализации нелинейного векторного управления.

### Выводы

Определены значения модулей дискретных векторов напряжений (результатирующих и обобщенных) семифазной симметричной обмотки при выполнении алгоритмов управления преобразователя, реализующего пространственно-векторную модуляцию.

Наибольшее значение модуля вектора дискретного состояния соответствует варианту 1. При временной последовательности чередования фаз *ACEGBDF* форма фазного напряжения по варианту 9 (с усиленной 5-й временной гармоникой) наиболее эффективна, так как векторное пространство соответствует векторному пространству варианта 1. Рабочим вектором станет вектор пятой гармоники, а частота преобразователя *f* будет соответствовать частоте вращения вектора *5f*.

Семифазный двигатель более адаптивен к изменениям входного напряжения преобразователя.

### References

1. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // *Электротехника*. 2019. № 3. С. 3—37.
2. Томасов В.С., Усольцев А.А., Вертегел Д.А., Денисов К.М. Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 2. С. 359—368.
3. Усольцев А.А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. СПб.: ИТМО, 2011.
4. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика) [Электрон. ресурс] [www.avislab.com/blog/wpcontent/uploads/2016/11/Vector\\_Kalachev.pdf](http://www.avislab.com/blog/wpcontent/uploads/2016/11/Vector_Kalachev.pdf) (дата обращения 09.09.2019).
5. Space Vector Pulse with Modulation MSS Software Implementation User Guide [Электрон. ресурс] [www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/133495-space-vector-pulse-width-modulation-mss-soft](http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/133495-space-vector-pulse-width-modulation-mss-soft)
1. Kozyaruk A.E. Sovremennye Effektivnye Elektroprivody Proizvodstvennykh i Transportnykh Mekhanizmov. *Elektrotehnika*. 2019;3:3—37. (in Russian).
2. Tomasov V.S., Usol'tsev A.A., Vertegel D.A., Denisov K.M. Issledovanie Pul'satsiy Elektromagnitnogo Momenta v Pretsizionnom Servoprivode pri Sinusoidal'noy Shirotno-Impul'snoy Modulyatsii. *Nauchno-tehnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki*. 2019;19;2:359—368. (in Russian).
3. Usol'tsev A.A. Sovremennyy Asinkhronnyy Elektropriwod Optiko-mekhanicheskikh kompleksov. SPb.: ITMO, 2011. (in Russian).
4. Kalachev Yu.N. Vektornoe Regulirovanie (Zametki Praktika) [Elektron. Resurs] [www.avislab.com/blog/wpcontent/uploads/2016/11/Vector\\_Kalachev.pdf](http://www.avislab.com/blog/wpcontent/uploads/2016/11/Vector_Kalachev.pdf) (Data Obrashcheniya 09.09.2019). (in Russian).
5. Space Vector Pulse with Modulation MSS Software Implementation User Guide [Elektron. Resurs] [www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/133495-space-vector-pulse-width-modulation-mss-soft](http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/133495-space-vector-pulse-width-modulation-mss-soft)

software-implementation-user-guide/ (дата обращения 09.09.2019).

6. **Texas Instruments Incorporated**, Application Report Space-Vector PWM with TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns [Электрон. ресурс] [www.ti.com/lit/an/spra524/spra524.pdf](http://www.ti.com/lit/an/spra524/spra524.pdf) (дата обращения 09.09.2019).

7. **Электровоз** грузовой постоянного тока 2ЭС10 (Гранит) с асинхронными тяговыми электродвигателями [Электрон. ресурс] [www.twirpx.com/search/](http://www.twirpx.com/search/) (дата обращения 11.11.2019).

8. **Chan C.C., Bouscayrol A., Chen K.** Electric, Hybrid, and Fuel-cell Vehicles: Architectures and Modeling // IEEE Trans. Vehicular Technol. 2010. V. 59. No. 2. Pp. 589—598.

9. **Guzman H. e. a.** Application of DSP in Power Conversion Systems — a Practical Approach for Multiphase Drives [Электрон. ресурс] [www.cdn.intechopen.com/pdfs-wm/48835.pdf](http://www.cdn.intechopen.com/pdfs-wm/48835.pdf) (дата обращения 09.09.2019).

10. **Голубев А.Н., Игнатенко С.В.** Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики // Электротехника. 2000. № 6. С. 28—31.

11. **Williamson S., Smith S.** Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines // IEEE Trans. Indust. Appl. 2003. V. 39. No. 4. Pp. 986—993.

12. **Barrero F., Duran M.J.** Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines — Pt. I // IEEE Trans. Industrial Electronics. 2016. V. 63. No. 1. Pp. 449—455.

13. **Prieto I.G., Duran M.J., Garcia-Entrambasaguas P., Bermudez M.** Field-oriented Control of Multiphase Drives with Passive Fault Tolerance // IEEE Trans. Industrial Electronics. 2020. V. 67(9). Pp. 7228—7238.

14. **Takahashi I., Noguchi T.** A New Quick-response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Motor // IEEE Trans. Industry Appl. 1986. V. IA-22. No. 5. Pp. 820—827.

15. **Blaschke F.** The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-loop Control System for Rotating-Field Machines // Rev. 1972. V. 34. Pp. 217—220.

16. **Tereshkin V.M., Grishin D.A., Balgazin I.I., Tereshkin V.V.** Research of Control Algorithms for a Semiphase Converter Implementing Spatial Vector Modulation // IEEE Intern. Conf. Electrotechnical Complexes and Systems. 2020. Pp. 383—387.

17. **Терешкин В.М.** Аналитический метод оценки вибраций электромагнитного происхождения в семи-фазной машине переменного тока // Вестник Ивановского гос. энергетического ун-та. 2019. № 1. С. 61—69.

18. **Терешкин В.М., Аитов И.Л., Макулов И.А., Гришин Д.А.** Влияние временной последовательности чередования фаз пятифазной обмотки на формирование результирующего вектора напряжения // Электротехника. 2020. № 12. С. 69—75.

ware-implementation-user-guide/ (Data Obrashcheniya 09.09.2019).

6. **Texas Instruments Incorporated**, Application Report Space-Vector PWM with TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns [Elektron. Resurs] [www.ti.com/lit/an/spra524/spra524.pdf](http://www.ti.com/lit/an/spra524/spra524.pdf) (Data Obrashcheniya 09.09.2019).

7. **Elektrovoz** Gruzovoy Postoyannogo Toka 2ES10 (Granit) s Asinkhronnymi Tyagovymi Elektrodvigatelyami [Elektron. Resurs] [www.twirpx.com/search/](http://www.twirpx.com/search/) (Data Obrashcheniya 11.11.2019). (in Russian).

8. **Chan C.C., Bouscayrol A., Chen K.** Electric, Hybrid, and Fuel-cell Vehicles: Architectures and Modeling. IEEE Trans. Vehicular Technol. 2010;59;2: 589—598.

9. **Guzman H. e. a.** Application of DSP in Power Conversion Systems — a Practical Approach for Multiphase Drives [Elektron. Resurs] [www.cdn.intechopen.com/pdfs-wm/48835.pdf](http://www.cdn.intechopen.com/pdfs-wm/48835.pdf) (Data Obrashcheniya 09.09.2019).

10. **Golubev A.N., Ignatenko C.B.** Vliyanie Chisla Faz Statornoy Obmotki Asinkhronnogo Dvigatelya na Ego Vibroshumovye Kharakteristiki. Elektrotekhnik. 2000;6:28—31. (in Russian).

11. **Williamson S., Smith S.** Pulsating Torque and Losses in Multiphase Induction Machines. IEEE Trans. Indust. Appl. 2003;39;4:986—993.

12. **Barrero F., Duran M.J.** Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines — Pt. I. IEEE Trans. Industrial Electronics. 2016;63;1: 449—455.

13. **Prieto I.G., Duran M.J., Garcia-Entrambasaguas P., Bermudez M.** Field-oriented Control of Multiphase Drives with Passive Fault Tolerance. IEEE Trans. Industrial Electronics. 2020;67(9):7228—7238.

14. **Takahashi I., Noguchi T.** A New Quick-response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Motor. IEEE Trans. Industry Appl. 1986;IA-22;5: 820—827.

15. **Blaschke F.** The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-loop Control System for Rotating-Field Machines. Rev. 1972;34: 217—220.

16. **Tereshkin V.M., Grishin D.A., Balgazin I.I., Tereshkin V.V.** Research of Control Algorithms for a Semiphase Converter Implementing Spatial Vector Modulation. IEEE Intern. Conf. Electrotechnical Complexes and Systems. 2020:383—387.

17. **Tereshkin V.M.** Analiticheskiy Metod Otsenki Vibratsiy Elektromagnitnogo Proiskhozhdeniya v Semifaznoy Mashine Peremennogo Toka. Vestnik Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta. 2019;1:61—69. (in Russian).

18. **Tereshkin V.M., Aitov I.L., Makulov I.A., Grishin D.A.** Vliyanie Vremennoy Posledovatel'nosti Cheredovaniya Faz Pyatifaznoy Obmotki na Formirovanie Rezul'tiruyushchego Vektora Napryazheniya. Elektrotekhnik. 2020;12:69—75. (in Russian).



**Сведения об авторах:**

**Терешкин Владимир Михайлович** — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: tvn53@mail.ru

**Гришин Дмитрий Анатольевич** — ведущий инженер, ООО «Газ-Проект-Инжиниринг», e-mail: lowrat@mail.ru

**Баландин Сергей Павлович** — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: balandin.matem@yandex.ru

**Терешкин Вячеслав Владимирович** — аспирант Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, Уфа, e-mail: stierishkin@mail.ru

**Information about authors:**

**Tereshkin Vladimir M.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: tvn53@mail.ru

**Grishin Dmitriy A.** — Lead Engineer, LLC «Gaz-Project-Engineering», e-mail: lowrat@mail.ru

**Balandin Sergey P.** — Ph.D. (Phys.-Math.), Assistant Professor of Electromechanics Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: balandin.matem@yandex.ru

**Tereshkin Vyacheslav V.** — Ph.D-student, Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: stierishkin@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 14.12.2020

**The article received to the editor:** 14.12.2020