

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА СОСТАВНОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Введение. В высоковольтных преобразователях частоты находят применение составные автономные инверторы напряжения (АИН), в каждую фазу нагрузки которых последовательно включены несколько однофазных мостовых инверторов. На рис. 1 приведена схема одного из подобных АИН. Каждая его фаза состоит из трех однофазных мостовых АИН (например, А1, А2, А3), которые питаются от независимых источников постоянного напряжения U_d .

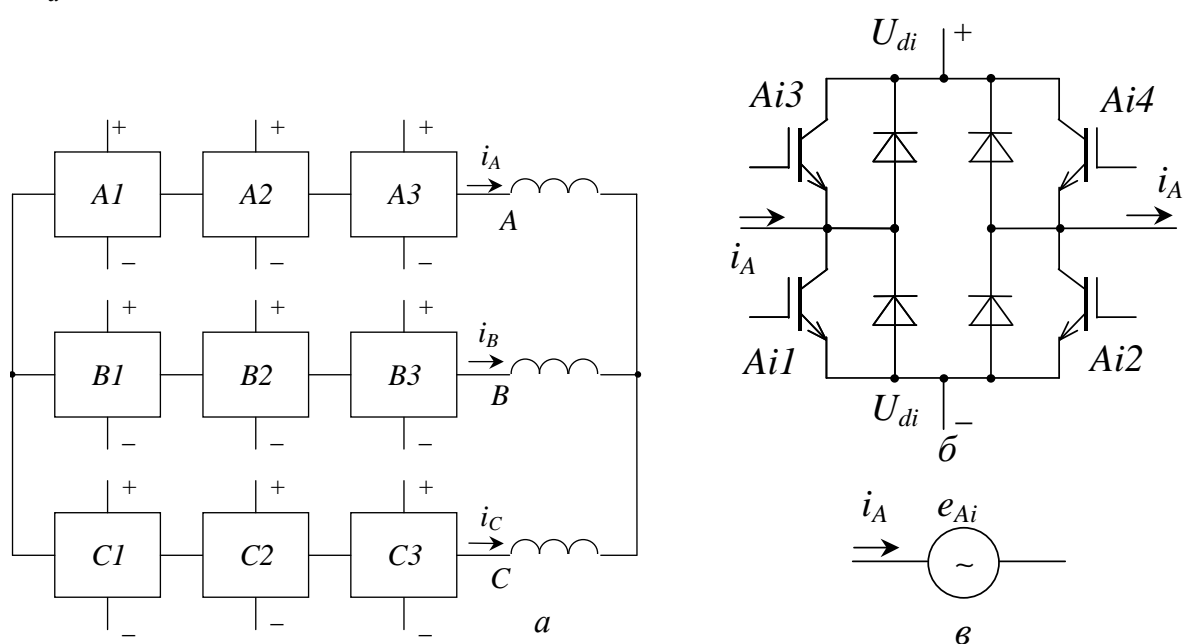


Рис. 1. Трехфазный составной инвертор напряжения: а – общая структура силовой цепи; б – однофазный АИН; в – схема замещения однофазного АИН

В схемах такого рода благодаря последовательному соединению мостов удастся применить сравнительно недорогие низковольтные ключи. Увеличение статических потерь вследствие большого количества одновременно открытых ключей (в схеме на рис. 1 – по 6 ключей в каждой фазе) в высоковольтных инверторах не столь актуально. Зато появляется возможность формирования алгоритмов управления, улучшающих качество выходного тока и минимизирующих число коммутаций управляемых ключей.

Цель настоящей работы – анализ возможных состояний составного АИН и рациональных алгоритмов управления им.

Результаты работы. Каждый из однофазных АИН может быть представлен эквивалентным источником ЭДС (рис. 1, в). Для обеспечения непрерывности фазного тока в нем должно быть одновременно открыто 2 ключа. Поэтому

однофазный АИН характеризуется тремя состояниями в зависимости от того, какие ключи открыты:

- A_{i1} и A_{i4} (ЭДС равна U_d);
- A_{i2} и A_{i3} (ЭДС равна $-U_d$);
- A_{i1} и A_{i2} или A_{i3} и A_{i4} (ЭДС равна нулю).

Отметим, что переход от одного уровня ЭДС моста к соседнему сопровождается одной коммутацией (запираанием одного ключа и отпираанием другого).

Благодаря этому суммарная ЭДС каждой фазы может иметь 7 уровней: $\pm 3U_d$; $\pm 2U_d$; $\pm U_d$; 0. Общее количество состояний трехфазного АИН равно $7^3=343$. Кроме семи нулевых состояний (когда все фазные ЭДС равны друг другу по величине и знаку), они образуют 21 симметричную трехфазную систему напряжений, 9 из которых наиболее удобны для формирования алгоритмов управления. На рис. 2 приведены векторные диаграммы обобщенных векторов (ОВ) выходного напряжения, соответствующие этим девяти системам, причем, для каждой из систем оси фаз являются осями симметрии.

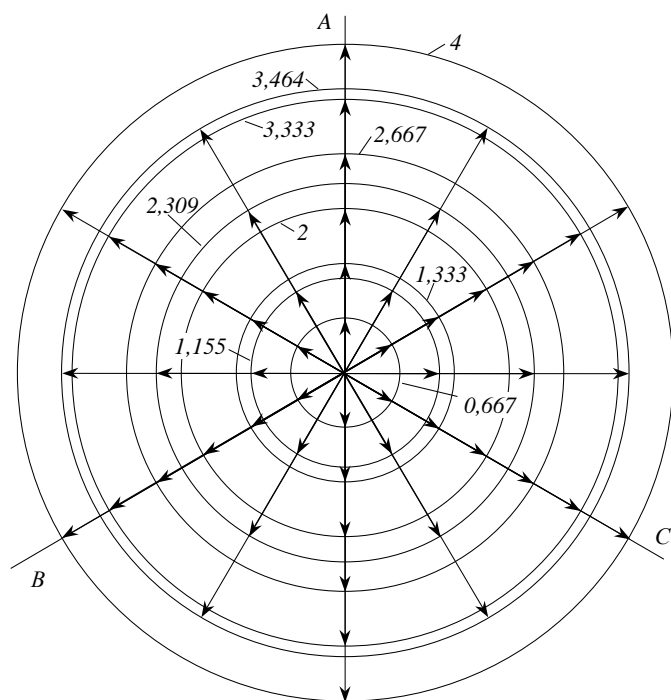


Рис. 2. Системы обобщенных векторов выходного напряжения составного АИН

Как видно, модуль ОВ выходного напряжения может принимать 10 значений: 0; 0,67; 1,15; 1,33; 2; 2,31; 2,67; 3,33; 3,46; 4. Кроме того, 6 систем синфазны с осями фаз (назовем их синфазными системами), а три системы сдвинуты относительно фазных осей на 30° (несинфазные системы). Во всех синфазных системах в любой момент времени две фазные ЭДС равны по величине и знаку. В несинфазных системах одна их фазных ЭДС всегда равна нулю, а две другие равны по модулю и противоположны по знаку.

Большинство симметричных систем напряжений (рис. 2) имеют несколько (от двух до шести) вариантов реализации, отличающихся набором используемых состояний инвертора.

Остальные 26 систем, которые не показанные на рис. 2, имеют модуль вектора напряжения, изменяющийся в пределах 1,76...3,71, что не позволяет расширить диапазон регулирования напряжения. Фазовый сдвиг векторов на-

пряжения относительно осей обмоток не кратен 30° , что затрудняет реализацию алгоритмов с улучшенной формой напряжения.

Чередуя вектора одинаковой длины, отличающиеся по фазе на 60° , можно сформировать 9 простых алгоритмов управления с различными уровнями напряжения с переключением состояний через $1/6$ периода. Кроме того, чередование векторов синфазных и несинфазных систем различной длины (в том числе нулевой) дает еще 27 составных алгоритмов с переключением состояний через $1/12$ периода.

В табл. 1 приведены фазные напряжения (в долях от напряжения U_d) в функции угла для всех 36 алгоритмов управления. В столбце «Системы векторов» даны длины обобщенных векторов (рис. 2), использованных для формирования соответствующего алгоритма. В табл. 2 сведены основные характеристики полученных алгоритмов: модуль обобщенного вектора напряжения U_m (обозначение типа 4+3,46 означает, что в алгоритме использованы две системы напряжений с модулями ОВ 4 и 3,46); число вариантов соответствующего алгоритма, идентичных по форме выходного напряжения и отличающихся лишь состояниями ключей; число состояний АИН, использованных в данном алгоритме; суммарное число коммутаций ключей за период выходного напряжения; уровни линейного напряжения; максимальное $U_{фm}$, среднеквадратичное $U_{фск}$ и среднее $U_{фср}$ значения фазного напряжения; действующее значение первой гармоники $U_{ф(1)}$ и коэффициент искажения напряжения $k_U = U_{ф(1)}/U_{фск}$.

Диапазон регулирования действующего значения выходного напряжения в соответствии с табл. 2 равен 8,48, причем, в этом диапазоне можно получить 31 уровень напряжения.

Как следует из табл. 1 и 2, для алгоритмов 1; 3; 4; 6; 7; 9, сформированных из векторов синфазных систем, характерно наличие четырех уровней фазного напряжения, а применение лишь векторов несинфазных систем (алгоритмы 2; 5; 8) обеспечивает три уровня фазного напряжения. Однако с точки зрения качества выходного напряжения все эти девять алгоритмов идентичны.

Для составных алгоритмов 10...27, использующих поочередно состояния синфазных и несинфазных систем, характерна намного лучшая форма напряжения (как следствие – и тока) ввиду вдвое большей дискретности переключения. Однако с увеличением различия между модулями используемых векторов коэффициент искажения заметно падает (ср. алгоритмы 13...17). Причина этого – увеличение амплитуд 5, 7, 17 и 19-й гармоник.

Алгоритмы управления

| № алгоритма | Системы векторов | Уровни фазного напряжения в функции угла | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|--|----------|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 0...30° | 30...60° | 60...90° | 90...120° | 120...150° | 150...180° | 180...210° | 210...240° | 240...270° | 270...300° | 300...330° | 330...360° |
| 1 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | -2 | -2 | -4 | -4 | -2 | -2 | 2 | 2 |
| 2 | 3,46 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 | -3 | -3 | -3 | -3 | 0 | 0 | 3 |
| 3 | 3,33 | 10/3 | 10/3 | 5/3 | 5/3 | -5/3 | -5/3 | -10/3 | -10/3 | -5/3 | -5/3 | 5/3 | 5/3 |
| 4 | 2,67 | 8/3 | 8/3 | 4/3 | 4/3 | -4/3 | -4/3 | -8/3 | -8/3 | -4/3 | -4/3 | 4/3 | 4/3 |
| 5 | 2,31 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | -2 | -2 | -2 | -2 | 0 | 0 | 2 |
| 6 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | -1 | -1 | -2 | -2 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 7 | 1,33 | 4/3 | 4/3 | 2/3 | 2/3 | -2/3 | -2/3 | -4/3 | -4/3 | -2/3 | -2/3 | 2/3 | 2/3 |
| 8 | 1,15 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 0,67 | 2/3 | 2/3 | 1/3 | 1/3 | -1/3 | -1/3 | -2/3 | -2/3 | -1/3 | -1/3 | 1/3 | 1/3 |
| 10 | 4+3,46 | 4 | 3 | 2 | 0 | -2 | -3 | -4 | -3 | -2 | 0 | 2 | 3 |
| 11 | 4+2,31 | 4 | 2 | 2 | 0 | -2 | -2 | -4 | -2 | -2 | 0 | 2 | 2 |
| 12 | 4+1,15 | 4 | 1 | 2 | 0 | -2 | -1 | -4 | -1 | -2 | 0 | 2 | 1 |
| 13 | 3,46+3,33 | 3 | 10/3 | 3 | 5/3 | 0 | -5/3 | -3 | -10/3 | -3 | -5/3 | 0 | 5/3 |
| 14 | 3,46+2,67 | 3 | 8/3 | 3 | 4/3 | 0 | -4/3 | -3 | -8/3 | -3 | -4/3 | 0 | 4/3 |
| 15 | 3,46+2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 0 | -1 | -3 | -2 | -3 | -1 | 0 | 1 |
| 16 | 3,46+1,33 | 3 | 4/3 | 3 | 2/3 | 0 | -2/3 | -3 | -4/3 | -3 | -2/3 | 0 | 2/3 |
| 17 | 3,46+0,67 | 3 | 2/3 | 3 | 1/3 | 0 | -1/3 | -3 | -2/3 | -3 | -1/3 | 0 | 1/3 |
| 18 | 3,33+2,31 | 10/3 | 2 | 5/3 | 0 | -5/3 | -2 | -10/3 | -2 | -5/3 | 0 | 5/3 | 2 |
| 19 | 3,33+1,15 | 10/3 | 1 | 5/3 | 0 | -5/3 | -1 | -10/3 | -1 | -5/3 | 0 | 5/3 | 1 |
| 20 | 2,67+2,31 | 8/3 | 2 | 4/3 | 0 | -4/3 | -2 | -8/3 | -2 | -4/3 | 0 | 4/3 | 2 |
| 21 | 2,67+1,15 | 8/3 | 1 | 4/3 | 0 | -4/3 | -1 | -8/3 | -1 | -4/3 | 0 | 4/3 | 1 |
| 22 | 2,31+2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | -2 | -2 | -1 | 0 | 1 |
| 23 | 2,31+1,33 | 2 | 4/3 | 2 | 2/3 | 0 | -2/3 | -2 | -4/3 | -2 | -2/3 | 0 | 2/3 |
| 24 | 2,31+0,67 | 2 | 2/3 | 2 | 1/3 | 0 | -1/3 | -2 | -2/3 | -2 | -1/3 | 0 | 1/3 |
| 25 | 2+1,15 | 2 | 1 | 1 | 0 | -1 | -2 | -2 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| 26 | 1,33+1,15 | 4/3 | 1 | 2/3 | 0 | -2/3 | -2 | -4/3 | -2 | -2/3 | 0 | 2/3 | 2 |
| 27 | 1,15+0,67 | 1 | 2/3 | 1 | 1/3 | 0 | -1/3 | -1 | -2/3 | -1 | -1/3 | 0 | 1/3 |
| 28 | 4+0 | 4 | 0 | 2 | 0 | -2 | 0 | -4 | 0 | -2 | 0 | 2 | 0 |
| 29 | 3,46+0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | -3 | 0 | -3 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 3,33+0 | 10/3 | 0 | 5/3 | 0 | -5/3 | 0 | -10/3 | 0 | -5/3 | 0 | 5/3 | 0 |
| 31 | 2,67+0 | 8/3 | 0 | 4/3 | 0 | -4/3 | 0 | -8/3 | 0 | -4/3 | 0 | 4/3 | 0 |
| 32 | 2,31+0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | -2 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 2+0 | 2 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | -2 | 0 | -1 | 0 |
| 34 | 1,33+0 | 4/3 | 0 | 2/3 | 0 | -2/3 | 0 | -4/3 | 0 | -2/3 | 0 | 2/3 | 0 |
| 35 | 1,15+0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0,67+0 | 2/3 | 0 | 1/3 | 0 | -1/3 | 0 | -2/3 | 0 | -1/3 | 0 | 1/3 | 0 |

Составные алгоритмы, использующие нулевые состояния, характеризуются наихудшей формой напряжения.

Общее количество коммутаций ключей в течение периода выходного напряжения заметно снижается с уменьшением уровня напряжения (до 6...12), но составные алгоритмы с существенно различающимися длинами используемых векторов характеризуются резким ростом количества коммутаций (до 48...108). Следует, однако, отметить, что в рассматриваемой схеме количество коммута-

Обобщенные характеристики алгоритмов

| № алгоритма | U_m | Число вариантов | Число постоянных | Число коммутаций | Уровни U_L | $U_{фm}$ | $U_{фек}$ | $U_{фep}$ | $U_{ф(l)}$ | k_U |
|-------------|-----------|-----------------|------------------|------------------|--------------------------------|----------|-----------|-----------|------------|-------|
| 1 | 4 | 1 | 6 | 36 | 0; ± 6 | 4 | 2,828 | 2,667 | 2,701 | 0,955 |
| 2 | 3,46 | 1 | 6 | 36 | ± 3 ; ± 6 | 3 | 2,45 | 2 | 2,339 | 0,955 |
| 3 | 3,33 | 2 | 6 | 30 | 0; ± 5 | 10/3 | 2,357 | 2,222 | 2,251 | 0,955 |
| 4 | 2,67 | 3 | 6 | 24 | 0; ± 4 | 8/3 | 1,886 | 1,778 | 1,801 | 0,955 |
| 5 | 2,31 | 3 | 6 | 24 | ± 2 ; ± 4 | 3 | 1,633 | 1,333 | 1,559 | 0,955 |
| 6 | 2 | 4 | 6 | 18 | 0; ± 3 | 3 | 1,414 | 1,333 | 1,351 | 0,955 |
| 7 | 1,33 | 5 | 6 | 12 | 0; ± 2 | 4/3 | 0,943 | 0,889 | 0,900 | 0,955 |
| 8 | 1,15 | 5 | 6 | 12 | ± 1 ; ± 2 | 3 | 0,817 | 0,667 | 0,78 | 0,955 |
| 9 | 0,67 | 6 | 6 | 6 | 0; ± 1 | 2/3 | 0,471 | 0,444 | 0,450 | 0,955 |
| 10 | 4+3,46 | 1 | 12 | 36 | 0; ± 3 ; ± 6 | 4 | 2,646 | 2,333 | 2,609 | 0,986 |
| 11 | 4+2,31 | 3 | 12 | 60 | 0; ± 2 ; ± 4 ; ± 6 | 4 | 2,309 | 2 | 2,205 | 0,955 |
| 12 | 4+1,15 | 5 | 12 | 84 | 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 6 | 4 | 2,082 | 1,667 | 1,802 | 0,866 |
| 13 | 3,46+3,33 | 2 | 12 | 42 | 0; ± 3 ; ± 5 ; ± 6 | 3 | 2,404 | 2,111 | 2,376 | 0,988 |
| 14 | 3,46+2,67 | 3 | 12 | 48 | 0; ± 3 ; ± 4 ; ± 6 | 3 | 2,186 | 1,889 | 2,143 | 0,980 |
| 15 | 3,46+2 | 4 | 12 | 54 | 0; ± 3 ; ± 6 | 3 | 2 | 1,667 | 1,91 | 0,955 |
| 16 | 3,46+1,33 | 5 | 12 | 72 | 0; ± 2 ; ± 3 ; ± 6 | 3 | 1,856 | 1,444 | 1,677 | 0,904 |
| 17 | 3,46+0,67 | 6 | 12 | 90 | 0; ± 1 ; ± 3 ; ± 6 | 3 | 1,764 | 1,222 | 1,444 | 0,819 |
| 18 | 3,33+2,31 | 6 | 12 | 42 | 0; ± 2 ; ± 4 ; ± 5 | 10/3 | 2,028 | 1,778 | 1,972 | 0,973 |
| 19 | 3,33+1,15 | 10 | 12 | 66 | 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 5 | 10/3 | 1,764 | 1,444 | 1,569 | 0,889 |
| 20 | 2,67+2,31 | 9 | 12 | 24 | 0; ± 2 ; ± 4 | 8/3 | 1,764 | 1,556 | 1,739 | 0,986 |
| 21 | 2,67+1,15 | 15 | 12 | 48 | 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 4 | 8/3 | 1,453 | 1,222 | 1,336 | 0,919 |
| 22 | 2,31+2 | 12 | 12 | 24 | 0; ± 2 ; ± 3 ; ± 4 | 3 | 1,528 | 1,333 | 1,506 | 0,986 |
| 23 | 2,31+1,33 | 15 | 12 | 36 | 0; ± 2 ; ± 4 | 3 | 1,333 | 1,111 | 1,273 | 0,955 |
| 24 | 2,31+0,67 | 18 | 12 | 54 | 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 4 | 3 | 1,202 | 0,889 | 1,040 | 0,865 |
| 25 | 2+1,15 | 20 | 12 | 30 | 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 3 | 3 | 1,443 | 1,25 | 1,407 | 0,975 |
| 26 | 1,33+1,15 | 25 | 12 | 12 | 0; ± 1 ; ± 2 | 4/3 | 1,236 | 1,028 | 1,174 | 0,95 |
| 27 | 1,15+0,67 | 30 | 12 | 18 | 0; ± 1 ; ± 2 | 3 | 0,667 | 0,556 | 0,637 | 0,955 |
| 28 | 4+0 | 1 | 8 | 72 | 0; ± 6 | 4 | 2 | 1,333 | 1,398 | 0,699 |
| 29 | 3,46+0 | 3 | 7 | 108 | 0; ± 3 ; ± 6 | 3 | 1,732 | 1 | 1,211 | 0,699 |
| 30 | 3,33+0 | 2 | 8 | 84 | 0; ± 5 | 10/3 | 1,667 | 1,111 | 1,165 | 0,699 |
| 31 | 2,67+0 | 3 | 8 | 72 | 0; ± 4 | 8/3 | 1,333 | 0,889 | 0,932 | 0,699 |
| 32 | 2,31+0 | 3 | 7 | 48 | 0; ± 2 ; ± 4 | 3 | 1,155 | 0,667 | 0,807 | 0,699 |
| 33 | 2+0 | 1 | 7 | 36 | 0; ± 3 | 2 | 1 | 0,667 | 0,699 | 0,699 |
| 34 | 1,33+0 | 1 | 7 | 36 | 0; ± 2 | 4/3 | 0,667 | 0,444 | 0,466 | 0,699 |
| 35 | 1,15+0 | 3 | 7 | 36 | 0; ± 1 ; ± 2 | 1 | 0,577 | 0,333 | 0,404 | 0,699 |
| 36 | 0,67+0 | 1 | 7 | 12 | 0; ± 1 | 2/3 | 0,333 | 0,222 | 0,233 | 0,699 |

ций, приходящееся на один ключ, даже в самом худшем случае лишь в три раза выше, чем в трехфазной мостовой (при амплитудной модуляции). Большинству же алгоритмов присуща малая частота коммутаций при той же или лучшей форме напряжения.

Таким образом, с точки зрения качества выходного напряжения и частоты

коммутации ключей наиболее рациональны алгоритмы 1...9, использующие по 6 состояний АИН, а также составные алгоритмы с близкими амплитудами исходных векторов (№ 10, 13, 18, 20, 22, 25, 26, 27).

Если в каждой фазе составного АИН лишь два однофазных моста, максимальное значение модуля обобщенного вектора напряжения равно 2,67, а из рассмотренных алгоритмов применимы только № 4...9, 20...27 и 31...36. Диапазон регулирования напряжения при этом снизится до 5,6.

Фактически алгоритмы, приведенные в табл. 1, реализуют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) на основной частоте. Большинство из них может быть сформировано благодаря введению в кривые ЭДС однофазных инверторов пауз длительностью β и фазовому сдвигу ЭДС последовательно включенных инверторов на угол α (рис. 3). Оба угла кратны 30° . Для некоторых алгоритмов необходимо, чтобы ЭДС одного или двух мостов равнялись нулю в течение всего периода выходного напряжения.

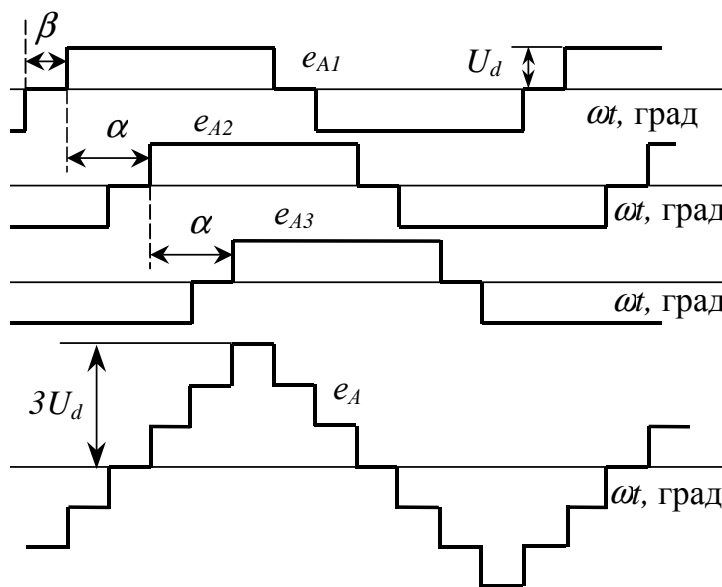


Рис. 3. Формирование ЭДС фазы составного АИН с ШИМ на основной частоте

Выводы. Из 21 симметричной трехфазной системы выходного напряжения наиболее удобны для формирования алгоритмов управления те 9 из них, для которых оси фаз являются осями симметрии. С помощью ШИМ на основной частоте в рассматриваемом инверторе может быть получено до 31 уровня напряжения, причем диапазон его регулирования составит 8,48. Наилучшую форму выходного напряжения и наименьшее количество коммутаций имеют составные алгоритмы, в которых чередуются состояния синфазных и несинфазных систем с наиболее близкими модулями обобщенного вектора напряжения.