

## МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЕКТОРА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Уланов Р.В., ассистент, Шавёлкин А.А., доцент, к.т.н.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

Метод пространственного вектора (векторной ШИМ - ВШИМ) находит широкое применение для формирования выходного напряжения в автономных инверторах напряжения, в том числе и многоуровневых. Для многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ) с каскадным соединением однофазных инверторов, коммутирующих напряжения изолированных источников постоянного тока этот метод пока достаточного применения не нашел.

Для каскадных МПЧ этот метод открывает дополнительные возможности для формирования напряжения на нагрузке (асинхронном двигателе - АД).

Для трехфазного АД пространственный вектор напряжения статора:

$$\underline{U}_s = 2/3(U_a + \underline{a} \cdot U_b + \underline{a}^2 \cdot U_c),$$

где:  $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$ ,  $\underline{a}^2 = e^{-j2\pi/3}$  - операторы поворота, учитывающие пространственное расположение обмоток на статоре двигателя;

При синусоидальном фазном напряжении получаем вектор, равномерно вращающийся с частотой  $\omega$  (частота выходного напряжения) конец вектора описывает окружность. При ступенчатой форме напряжений вектор перемещается скачкообразно, поочередно занимая ряд фиксированных положений, каждому из которых соответствует определенная комбинация напряжений. Конец вектора описывает правильный шестигранник.

$U_a, U_b, U_c$  – значения фазных напряжений двигателя.

В трехфазной системе без нулевого провода напряжения, формируемые в фазах МПЧ  $E_A, E_B, E_C$ , и фазные напряжения на нагрузке  $U_a, U_b, U_c$  различаются. Рассмотрим случай, когда число источников напряжения в фазе МПЧ  $n=3$ , при этом общее число уровней, включая 0, составляет  $N=7$ . Очевидно, что число возможных комбинаций достаточно велико  $K=7 \cdot 7 \cdot 7=343$ . Поэтому ограничимся рядом из них, когда  $E_A \geq 0, E_B \geq 0$  и  $E_C \leq 0$ , что соответствует одной шестой периода выходного напряжения. При известных значениях  $E_A, E_B, E_C$  фазные напряжения для симметричной нагрузки (АД) могут быть рассчитаны с использованием метода узлового напряжения.

Фазные напряжения в относительных единицах (по отношению к напряжению источника постоянного напряжения МПЧ), а также соответствующие пространственные вектора приведены в табл.1 (приведены основные комбинации, образующие два верхних уровня пространственного вектора).

Возможные пространственные вектора для сектора в  $60^\circ$  приведены на рис.1. Нетрудно заметить, что все вектора можно распределить по амплитуде на шесть уровней с дискретностью  $2/3U$ . При этом число векторов с переходом на более высокий уровень растет, дискретность перемещения вектора  $60^\circ, 30^\circ, 20^\circ,$

15°, 12°, 10°. Для каждого уровня амплитуды получаем траекторию перемещения вектора в виде соответствующего правильного шестигранника.

Таблица1 - К расчету напряжений в фазах МПЧ

№	$E_A$	$E_B$	$E_C$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$U$	$\varphi$
1	0	3	-3	0	3	-3	3.464	0
2	1	3	-3	0.666	2.666	-3.3333	3.528	10,9
3	2	3	-3	1.333	2.333	-3.6667	3.71	21
4	3	3	-3	2	2	-4	4	30
5	3	2	-3	2.333	1.333	-3.6667	3.71	39
6	3	1	-3	2.666	0.666	-3.3333	3.528	49.1
7	3	0	-3	3	0	-3	3.464	60
8	1	3	-2	0.333	2.333	-2.667	2.906	6.6
9	2	3	-2	1	2	-3	3.055	19.1
10	3	3	-2	1.667	1.667	-3.333	3.333	30
11	3	2	-2	2	1	-3	3.055	40.9
12	3	1	-2	2.333	0.333	-2.667	2.906	53.4

Дискретность перемещения вектора может быть уменьшена введением дополнительных промежуточных положений вектора на соответствующем временном интервале  $\tau = T/k$  ( $T$ -период выходного напряжения,  $k$  - общее число положений вектора за период).

При классической ВШИМ применяемой в трехфазных инверторах с одним уровнем напряжения используются только шесть ненулевых с дискретностью перемещения 60 град. и два нулевых вектора. Промежуточный вектор формируется из двух соседних векторов  $U_1$  и  $U_2$  и нулевого вектора. При этом формируется некий средний вектор, амплитуда и фаза которого определяются длительностью включения соответствующих исходным векторам комбинаций напряжений на интервале  $\tau$ . Положение вектора определяется как векторная сумма  $\underline{U} = (k_1 \cdot \underline{U}_1 + k_2 \cdot \underline{U}_2)$  ( $k_1, k_2$  – задаются как относительная продолжительность включения соответствующих комбинаций за интервал  $\tau$ ). Введение нулевого вектора при пропорциональном сокращении  $k_1$  и  $k_2$  позволяет регулировать амплитуду результирующего – пространственного вектора. Таким образом, имеется возможность получить вектор постоянной амплитуды с определенной (равномерной) дискретностью перемещения в пространстве, а исходя из этого, определить алгоритм работы схемы МПЧ.

Очевидно, что использование в процессе формирования требуемого промежуточного вектора, для регулирования его амплитуды нулевого вектора нецелесообразно, так как ведет к значительным перепадам в кривой выходного напряжения. Следует отметить также, что получение непрерывно вращающегося вектора достаточно непростая задача и вряд ли имеет практический смысл, поэтому ограничимся рассмотрением получения вектора регулируемой ампли-

туды с той же дискретностью, что и исходные вектора (для четвертого и выше уровней эта дискретность невелика).

Используя в процессе формирования два соседних вектора, получаем перемещение промежуточного вектора по линии, соединяющей концы векторов. В образовании треугольников (на рис.2 выделены более жирно) участвуют три вектора, причем один из них проходит через треугольник, этот участок выделен пунктирной линией. Рассмотрим, как можно сформировать вектор, вершина которого будет перемещаться по выделенной траектории (пунктирная линия

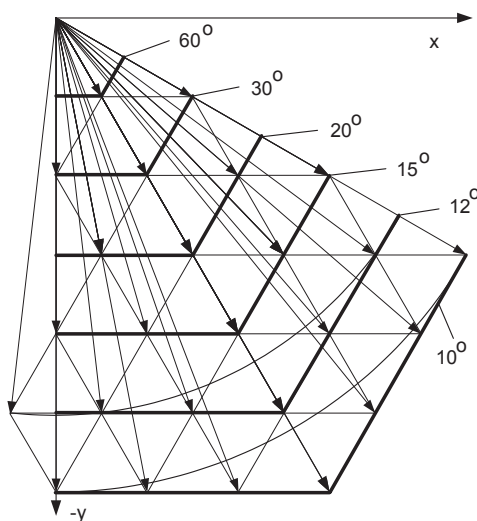


Рисунок 1 – Пространственный вектор для сектора  $60^\circ$

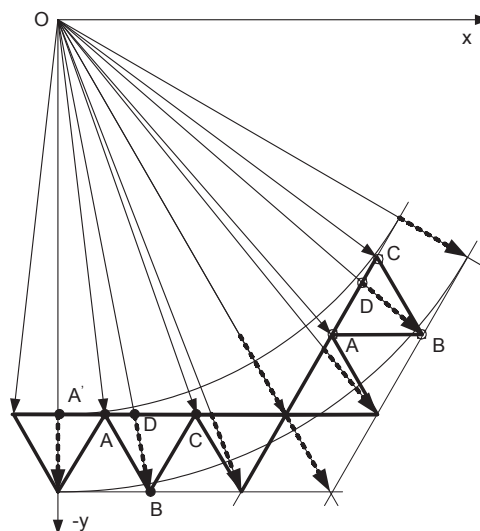


Рисунок 2 – Принцип формирования вектора из трех образующих

рис.2). Для этого воспользуемся рис.3, где отдельно показаны образующие его вектора.

Используя вектора  $\underline{OA}$  и  $\underline{OC}$  можно получить вектор  $\underline{OD} = \underline{U} = (k_1 \cdot \underline{U}_1 + k_2 \cdot \underline{U}_2)$ , где  $k_1 \cdot \underline{U}_1 = \underline{OF}$ ,  $k_2 \cdot \underline{U}_2 = \underline{OE}$ , который совпадает по направлению с вектором  $\underline{OB}$ . Используя вектора  $\underline{OD}$  и  $\underline{DK} = k_3 \cdot \underline{U}_3$ , можно получить вектор

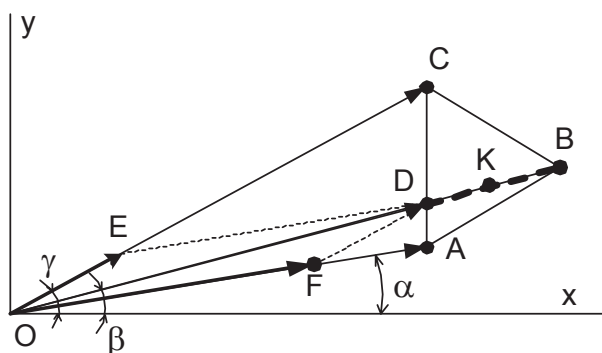


Рисунок 3 – Принцип формирования вектора регулируемой величины

переменного модуля  $\underline{OK}$  (пунктирная траектория на рис.3), конец которого перемещается между точками D и B. При этом суммарная продолжительность нахождения схемы в каждом из состояний равна  $\tau$ . Значения  $k_1 = OF/OA$ ,  $k_2 = OE/OC$ , могут быть рассчитаны исходя из геометрических соотношений по рис.3 и для каждого из треугольников остаются неизменными. Значение  $k_3 = DK/OB$  определяется амплитудой требуемого вектора. Рассмотрим расчет для случая, когда  $OD = 4$ ,  $OB = 5$ , требуемая величина вектора –  $U$ .

$$\text{Имеем } U = 4x + (1-x)5, \text{ где } k_3 = (1-x), \text{ отсюда } x = (5 - U) = \alpha(k_1 + k_2).$$