

Алгоритм управления многоуровневым инвертором напряжения

Берестов В.М. ¹

¹ 630088, Россия, Новосибирск, Сибиряков – Гвардейцев, 51/3,
 ЗАО "ЭРАСИБ"
 Тел./факс + 7(383) 3422420 E-mail: berestov@erasib.ru

Аннотация: В данной статье представлен векторный алгоритм управления многоуровневым инвертором напряжения. Алгоритм эффективен и не зависит от числа уровней инвертора. Имеет методическое значение для понимания принципа действия многоуровневого инвертора.

Abstract: This paper introduces a general space-vector modulation algorithm for n-level three-phase inverters. The algorithm is computationally extremely efficient and is independent of the number of inverter levels. At the same time, it provides good insight into the operation of multilevel inverters.

Существующие многоуровневые пространственно-векторные ШИМ и эквивалентная им синусоидальная ШИМ с добавлением третьей гармоники реализуют вектор заданного напряжения одной последовательностью комбинаций $V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k$ соответствующих трем ближайшим векторам I, J и K . При этом для каждого вектора (I, J и K) используется лишь одна или две, в зависимости от кратности числа комбинации V , соответствующих одному вектору [1,2], то есть при малых глубинах модуляции используются не все уровни инвертора [3]. В предлагаемой работе при малых глубинах модуляции каждый вектор заданного напряжения реализуется максимально возможным количеством последовательностей комбинаций

состояния ключей $V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k$, так чтобы использовались все комбинации V для каждого вектора. Благодаря проведенной систематизации: треугольников, уравнений границ треугольников и векторов, заканчивающихся в вершинах треугольников, метод применим при любом количестве уровней инвертора. Функциональная схема трехфазного n -уровневого инвертора напряжения приведена на рис.1 [4], где n_a, n_b и n_c положения «переключателей» в фазах a, b и c соответственно. При этом n_a, n_b и n_c принимают n значений $0 \div n-1$, где n – число уровней инвертора.

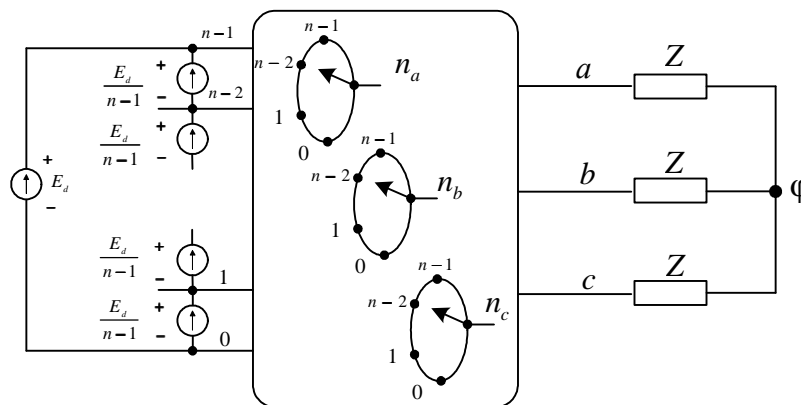


Рис.1 Функциональная схема трехфазного n - уровневго инвертора напряжения

Обозначим через V комбинацию состояний «переключателей» (n_a, n_b, n_c) в трех фазах инвертора (далее будем обозначать $V = (n_a, n_b, n_c)$). Для того, чтобы сузить рассмотрение до одного сектора, будем рассматривать не фазную принадлежность

положений переключателя n_a, n_b, n_c , а $n_{\max}, n_{\text{mid}}, n_{\text{min}}$.

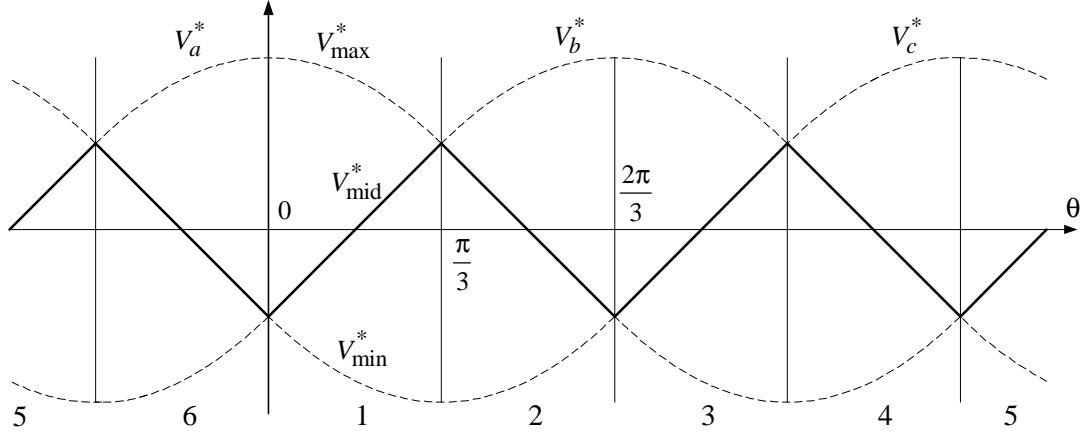


Рис. 2 Система заданных напряжений

В каждой из комбинаций V обозначим максимальное, среднее и минимальное из трех чисел n_a, n_b, n_c как n_{\max}, n_{mid} и n_{\min} . Индексы \max, mid, \min присваивают положению переключателя той фазы, для которой в данном секторе заданное напряжение максимальное, среднее или минимальное, рис. 2.

Многообразие комбинаций V и соответствующее им многообразие векторов состояния инвертора для 5-ти уровневой инвертора при $0 \leq \theta \leq \pi/3$ приведено на рис. 3.

Построение выполнено следующим образом. На выходе каждой стойки n -уровневой инвертора формируются n дискретных значений одного из выходных фазных напряжений инвертора:

$$\begin{aligned} V_{\max-0} &= n_{\max} E_d / (n-1), \\ V_{\text{mid}-0} &= n_{\text{mid}} E_d / (n-1), \\ V_{\min-0} &= n_{\min} E_d / (n-1). \end{aligned} \quad (1)$$

Поскольку нейтраль нагрузки изолирована, то фазные напряжения на нагрузке определяется не фазными напряжениями инвертора, а линейными напряжениями инвертора.

Трем дискретным значениям фазных напряжений инвертора $V_{\max-0}, V_{\text{mid}-0}$ и $V_{\min-0}$ ($n_{\max}, n_{\text{mid}}, n_{\min}$) однозначно соответствуют три линейных напряжения на нагрузке:

$$\begin{aligned} V_{\max-\min} &= V_{\max-0} - V_{\min-0} = \\ &= (n_{\max} - n_{\min}) E_d / (n-1) = i E_d / (n-1); \\ V_{\max-\text{mid}} &= V_{\max-0} - V_{\text{mid}-0} = \\ &= (n_{\max} - n_{\text{mid}}) E_d / (n-1) = j E_d / (n-1); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{mid}-\min} &= V_{\text{mid}-0} - V_{\min-0} = \\ &= (n_{\text{mid}} - n_{\min}) E_d / (n-1) = k E_d / (n-1) \end{aligned}$$

то есть трем числам $n_{\max}, n_{\text{mid}}, n_{\min}$ соответствует единственная тройка чисел i, j, k , где

$$\begin{aligned} i &= n_{\max} - n_{\min}, \\ j &= n_{\max} - n_{\text{mid}}, \\ k &= n_{\text{mid}} - n_{\min}, \end{aligned} \quad (3)$$

i, j и k принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} i &= 0, \dots, n-1; \\ j &= 0, \dots, n-1; \\ k &= 0, \dots, n-1. \end{aligned}$$

Построим $(n-1)$ линии равных дискретных значений линейных напряжений $V_{\max-\min}$:

$$V_{\max-\min} = i E_d / (n-1), \text{ где } i = 0, \dots, n-1,$$

для чего в каждом секторе проведем нормали через интервал $E_d / (n-1)$ к осям линейных напряжений $V_{\max-\min} = V_{ac}, V_{bc}, V_{ba}, V_{ca}, V_{cb}, V_{ab}$ для 1, ..., 6 секторов соответственно (рис. 3) (данный рисунок выполнен для первого сектора).

Полученное множество линий i представляет собой концентрические шестиугольники, уравнения которых

$$i = 0, \dots, (n-1).$$

Построим $(n-1)$ линии равных дискретных значений линейных напряжений $V_{\max-\text{mid}}$

$$V_{\max-\text{mid}} = j E_d / (n-1), \text{ где } j = 0, \dots, n-1,$$

для чего в каждом секторе проведем нормали через интервал $E_d / (n-1)$ к осям линейных напряжений $V_{\max-\text{mid}} = V_{ab}, V_{ba}, V_{bc}, V_{cb}, V_{ca}, V_{ac}$ для 1, ..., 6 секторов соответственно (рис. 3).

Полученное множество линий j представляет собой оси $-A$, $-B$ и $-C$ и параллельные им линии, которым соответствуют

$$j = 0, \dots, (n-1).$$

Построим $(n-1)$ линии равных дискретных значений линейных напряжений $V_{mid-min}$:

$$V_{mid-min} = k \frac{E_d}{n-1}, \text{ где } k = 0, \dots, n-1,$$

для чего в каждом секторе проведем нормали через интервал $E_d/(n-1)$ к осям линейных напряжений $V_{mid-min} = V_{bc}, V_{ac}, V_{ca}, V_{ba}, V_{ab}, V_{cb}$ для 1, ..., 6 секторов соответственно (рис. 3).

Полученное множество линий k представляет собой оси A , B и C и параллельные им линии, которым соответствуют

$$k = 0, \dots, n-1.$$

Если наложить три этих множества линий i, j и k друг на друга, то полученное множество точек пересечения линий из трех множеств и является множеством точек окончаний всех возможных векторов состояния инвертора.

Многообразие комбинаций V состояний переключателей, соответствующих одному вектору состояния инвертора, легко может быть получено по линейным координатам i, j и k данного вектора.

Векторам состояния инвертора, заканчивающимся на шестиугольнике с индексом $i = 4$, соответствуют только по одной комбинации $V = (n_a, n_b, n_c)$, в которых $n_{max} = 4$, а $n_{min} = 0$.

Векторам состояния инвертора, заканчивающимся на шестиугольнике с индексом $i = 3$, соответствуют по две комбинации $V = (n_a, n_b, n_c)$, в одной из которых $n_{max} = 4$, а $n_{min} = 1$, а в другой $n_{max} = 3$, а $n_{min} = 0$.

Аналогично при $i = 2$ – по три комбинации $V = (n_a, n_b, n_c)$, при $i = 1$ – по четыре комбинации $V = (n_a, n_b, n_c)$, при $i = 0$ – пять комбинаций $V = (n_a, n_b, n_c)$.

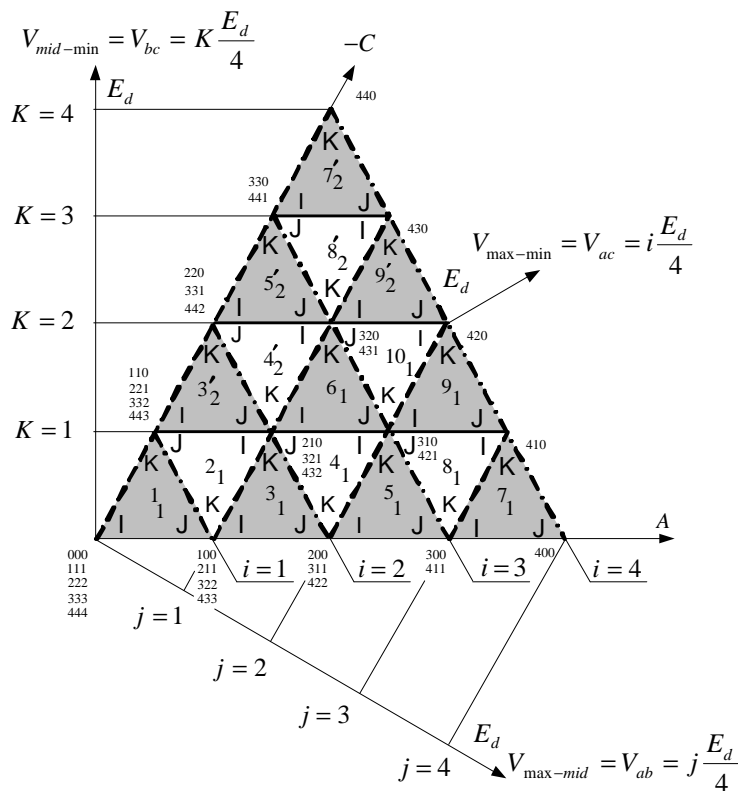


Рис.3 Множество векторов состояния инвертора и их линейные координаты

С другой стороны, множества линий i, j и k разделяют векторную плоскость на треугольники таким образом, что одна из сторон треугольника i_T принадлежит множеству i , другая j_T принадлежит множеству j , а третья - k_T - множеству k (рис. 3).

Три вектора состояния инвертора, которые заканчиваются в вершинах треугольника, противолежащих сторонам треугольника с индексами i_T, j_T и k_T , обозначим I, J и K . Отметим, что как линейные, так и фазные координаты однозначно определяют единственный вектор состояния инвертора, а присваиваемый ему индекс I, J или

K зависит от конкретного треугольника по отношению к которому данный вектор рассматривается (рис. 3).

Проекции вектора состояния инвертора с линейными координатами i_{JK} , j_{JK} и k_{JK} на оси фазных напряжений $V_{\max JK}$, $V_{\text{mid} JK}$, $V_{\min JK}$ (то есть фазные координаты вектора состояния инвертора) при симметричной нагрузке с изолированной нейтралью равны (рис. 4):

$$V_{\max JK} = \frac{i_{JK} + j_{JK}}{3} E_d / (n-1);$$

$$V_{\text{mid} JK} = \frac{-(j_{JK} - k_{JK})}{3} E_d / (n-1); \quad (4)$$

$$V_{\min JK} = \frac{-(i_{JK} + k_{JK})}{3} E_d / (n-1).$$

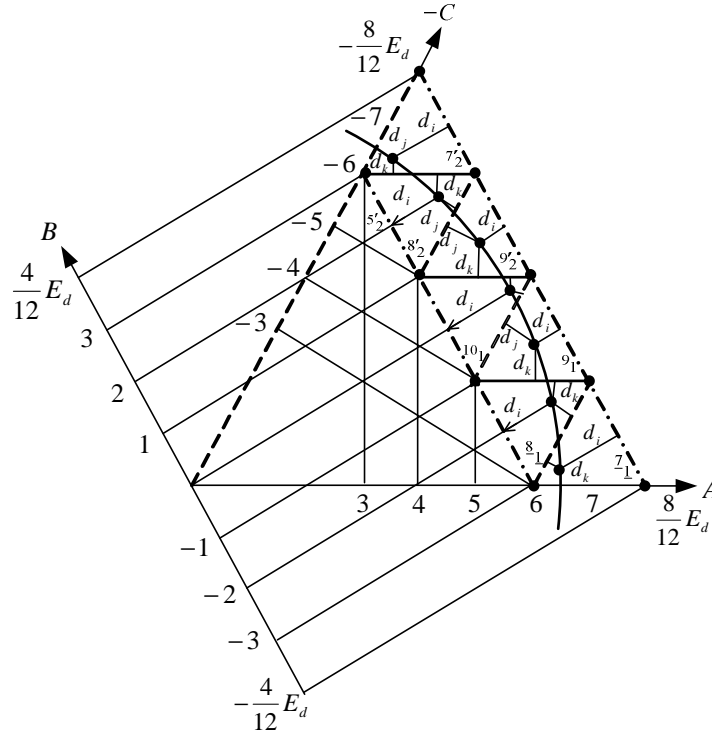


Рис. 4 Множество векторов состояния инвертора и их фазные координаты

Действительно, при симметричной нагрузке с изолированной нейтралью φ справедливо следующее равенство:

$$\frac{V_{\max-0} - V_{\varphi-0}}{Z} + \frac{V_{\text{mid}-0} - V_{\varphi-0}}{Z} + \frac{V_{\min-0} - V_{\varphi-0}}{Z} = 0,$$

откуда с учетом (1)

$$V_{\varphi-0} = \frac{(n_{\max} + n_{\text{mid}} + n_{\min})}{3} \frac{E_d}{(n-1)}.$$

Тогда проекции вектора с линейными координатами i , j , k на оси фазных напряжений равны:

$$V_{\max} = V_{\max-\varphi} = \left[n_{\max} - \frac{n_{\max} + n_{\text{mid}} + n_{\min}}{3} \right] \frac{E_d}{(n-1)} = \frac{(i+j)}{3} \frac{E_d}{(n-1)};$$

$$V_{\text{mid}} = V_{\text{mid}-\varphi} = \left[n_{\text{mid}} - \frac{n_{\max} + n_{\text{mid}} + n_{\min}}{3} \right] \frac{E_d}{(n-1)} = -\frac{(j-k)}{3} \frac{E_d}{(n-1)};$$

$$V_{\min} = V_{\min-\varphi} = \left[n_{\min} - \frac{n_{\max} + n_{\text{mid}} + n_{\min}}{3} \right] \frac{E_d}{(n-1)} = -\frac{(i+k)}{3} \frac{E_d}{(n-1)}.$$

Отметим, что для того чтобы пользоваться равновеликими изображениями векторов на плоскости в системе координат линейных напряжений и в системе координат фазных напряжений, масштабы в этих системах координат должны отличаться в $\sqrt{3}$ раз.

Поставим в соответствие трехфазной системе заданных фазных напряжений $V_a = V_m \cos \theta$,

$V_b = V_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$, $V_c = V_m \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$ амплитудой V_m вращающийся вектор амплитудой V_m на плоскости с системой координат фазных напряжений А, В и С. На рис. 4 амплитуда заданных фазных напряжений V_m выбрана следующим образом:

$$E_d/2 < V_m < E_d/\sqrt{3}.$$

При этом вектор заданных фазных напряжений проходит последовательно 7-е, 8-е, 9-е и 10-е треугольники.

Будем реализовывать мгновенное значение вектора заданных фазных напряжений средним на интервале дискретности T_s от приложения трех ближайших векторов I, J и K , заканчивающихся в вершинах треугольника, в котором в данный момент расположен вектор заданного напряжения.

При этом относительные длительности d_i, d_j, d_k приложения трех ближайших векторов I, J и K , определяются из условия, чтобы средние на интервале дискретности T_s значения линейных напряжений на нагрузке i_d, j_d, k_d равнялись заданным.

$$\begin{aligned} i_d &= i_I d_i + i_J d_j + i_K d_k = i^*; \\ j_d &= j_I d_i + j_J d_j + j_K d_k = j^*; \\ k_d &= k_I d_i + k_J d_j + k_K d_k = k^*, \end{aligned} \quad (5)$$

где i_{IJK}, j_{IJK} и k_{IJK} - линейные координаты векторов состояния инвертора, i^*, j^*, k^* - линейные координаты вектора заданного напряжения.

Все треугольники можно разбить на два типа: внутренние и внешние. Внутренние треугольники - это 1-е, 3-и, 5-е, 6-е, 7-е и 9-е треугольники. Если вектор заданного напряжения с фазными координатами $V_{max}^*, V_{mid}^*, V_{min}^*$ расположен во внутреннем треугольнике, то его координаты в системе координат линейных напряжений i^*, j^*, k^* (проекции вектора заданного напряжения на оси линейных напряжений) через уравнения сторон треугольника $i = i_T, j = j_T$ и $k = k_T$ в соответствии с рис. 5 имеют вид:

$$\begin{aligned} i^* &= \frac{V_{max}^* - V_{min}^*}{E_d/(n-1)} = i_T + h_i; \\ j^* &= \frac{V_{max}^* - V_{mid}^*}{E_d/(n-1)} = j_T + h_j; \\ k^* &= \frac{V_{mid}^* - V_{min}^*}{E_d/(n-1)} = k_T + h_k, \end{aligned} \quad (6)$$

где h_i, h_j и h_k - длины нормалей, проведенных из вектора заданного напряжения к сторонам треугольника i_T, j_T и k_T для h_i, h_j и h_k соответственно. Отметим, что i^*, j^* и k^* в выражениях (6) изменяются непрерывно в отличие от дискретных (целых) значений координат i_{IJK}, j_{IJK} и k_{IJK} и i_T, j_T и k_T в уравнениях границ треугольников.

Из рис. 5 условие нахождения вектора заданного напряжения во внутреннем треугольнике имеет вид:

$$\begin{aligned} i^* &= \frac{V_{max}^* - V_{min}^*}{E_d/(n-1)} \leq i_T, \\ j^* &= \frac{V_{max}^* - V_{mid}^*}{E_d/(n-1)} \geq j_T, \\ k^* &= \frac{V_{mid}^* - V_{min}^*}{E_d/(n-1)} \geq k_T, \end{aligned} \quad (7)$$

т.е. уравнение сторон внутреннего треугольника можно получить следующим образом:

$$\begin{aligned} i_T &= \left\lfloor \frac{V_{max}^* - V_{min}^*}{E_d/(n-1)} \right\rfloor + 1, \\ j_T &= \left\lfloor \frac{V_{max}^* - V_{mid}^*}{E_d/(n-1)} \right\rfloor, \\ k_T &= \left\lfloor \frac{V_{mid}^* - V_{min}^*}{E_d/(n-1)} \right\rfloor, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\lfloor \quad \rfloor$ - целая часть числа.

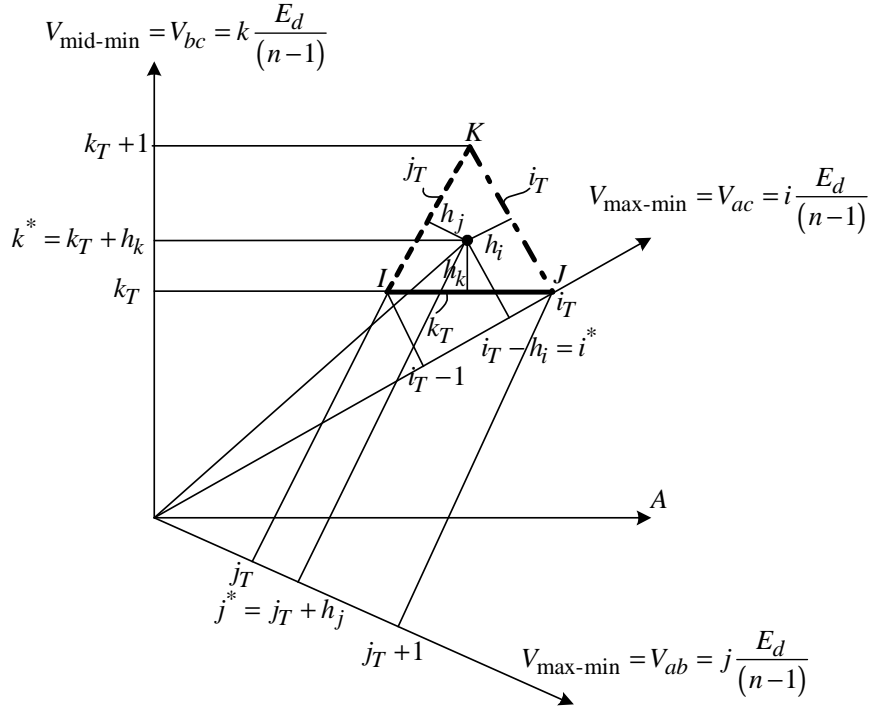


Рис. 5

Отметим, что i_T , j_T и k_T соответствуют линиям, не пересекающимся в одной точке

$$i_T \neq j_T + k_T.$$

Тогда условие нахождения вектора заданного напряжения во внутреннем треугольнике примет вид:

$$\left| \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} \right| = \left| \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{mid}}^*}{E_d / (n-1)} \right| + \left| \frac{V_{\text{mid}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} \right|$$

Линейные координаты i_{JK} , j_{JK} , k_{JK} векторов I , J , K выраженные через уравнения сторон внутреннего треугольника согласно рис. 5 приведены в таб. 1.

Таблица 1

	I	J	K
i_{JK}	$i_T - 1$	i_T	i_T
j_{JK}	j_T	$j_T + 1$	j_T
k_{JK}	k_T	k_T	$k_T + 1$

Если в выражениях (5) заменить координаты i_{JK} , j_{JK} , k_{JK} векторов состояния инвертора I , J , K и координаты i^* , j^* , k^* вектора заданного напряжения их выражениями через уравнения сторон внутреннего треугольника из таблицы 1 и

(6) соответственно, то с учетом, что $d_i + d_j + d_k = 1$ получим:

$$\begin{aligned} i_T - d_i &= i_T - h_i; \\ j_T - d_j &= j_T - h_j; \\ k_T - d_k &= k_T - h_k. \end{aligned} \quad (9)$$

According to (9) and (6) follows that line-to-line voltage during a sampling time will be equal to the reference vectors in the case when

Из выражения (9) и (6) следует, что для того, чтобы средние на интервале дискретности T_s значения линейных напряжений i_d , j_d , k_d равнялись заданным i^* , j^* , k^* необходимо, чтобы относительные длительности d_i , d_j и d_k приложения трех ближайших векторов I , J и K , заканчивающихся в вершинах внутреннего треугольника, равнялись:

$$\begin{aligned} d_i &= h_i = i_T - \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)}; \\ d_j &= h_j = \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{mid}}^*}{E_d / (n-1)} - j_T; \end{aligned} \quad (10)$$

$$d_k = h_k = \frac{V_{\text{mid}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} - k_T,$$

$$\frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} = i_T + h_j;$$

то есть равнялись расстояниям вектора заданных напряжений от сторон треугольника в системе координат линейных напряжений, при этом естественно, что $h_i + h_j + h_k = 1$.

$$\frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{mid}}^*}{E_d / (n-1)} = j_T - h_j; \quad (11)$$

Внешние треугольники – это 2-е, 4-е, 8-е и 10-е треугольники. Если вектор заданного напряжения с фазными координатами $V_{\text{max}}, V_{\text{mid}}, V_{\text{min}}$ расположен во внешнем треугольнике, то его координаты в системе координат линейных напряжений i^*, j^*, k^* через уравнения сторон треугольника в соответствии с рис. 6 имеют вид:

$$\frac{V_{\text{mid}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} = k_T - h_k.$$

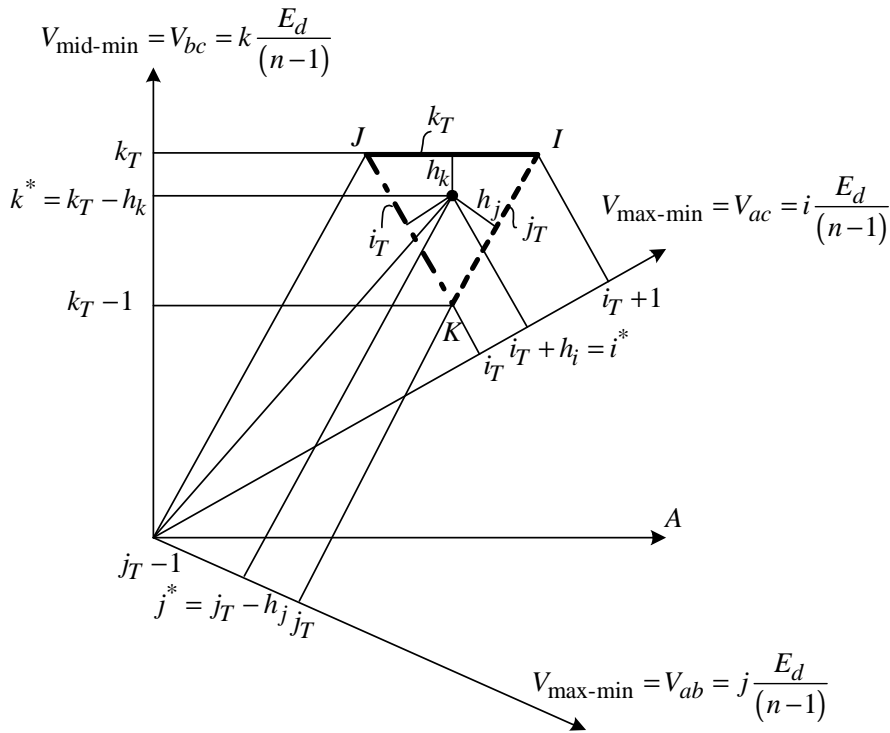


Рис. 6

Условие нахождения вектора заданного напряжения во внешнем треугольнике имеет вид:

$$i^* = \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} \geq i_T;$$

$$j^* = \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{mid}}^*}{E_d / (n-1)} \leq j_T;$$

$$k^* = \frac{V_{\text{mid}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} \leq k_T,$$

$$i_T = \left\lfloor \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} \right\rfloor;$$

$$j_T = \left\lfloor \frac{V_{\text{max}}^* - V_{\text{mid}}^*}{E_d / (n-1)} \right\rfloor + 1; \quad (12)$$

$$k_T = \left\lfloor \frac{V_{\text{mid}}^* - V_{\text{min}}^*}{E_d / (n-1)} \right\rfloor + 1.$$

Тогда условие нахождения вектора заданного напряжения во внешнем треугольнике примет вид:

т.е. уравнение сторон внешнего треугольника можно получить следующим образом:

$$\left\lfloor \frac{V_{\max}^* - V_{\min}^*}{E_d / (n-1)} \right\rfloor + 1 = \left\lfloor \frac{V_{\max}^* - V_{\text{mid}}^*}{E_d / (n-1)} \right\rfloor + 1 + \left\lfloor \frac{V_{\text{mid}}^* - V_{\min}^*}{E_d / (n-1)} \right\rfloor + 1 \quad (13)$$

Аналогично тому, как это делалось для внутреннего треугольника можно показать, что для того чтобы средние на интервале дискретности T_s значения линейных напряжений i_d , j_d , k_d равнялись заданным i^* , j^* , k^* необходимо, чтобы относительные длительности приложения d_i, d_j и d_k трех ближайших векторов \mathbf{I} , \mathbf{J} и \mathbf{K} , заканчивающихся в вершинах внешнего треугольника, равнялись

$$\begin{aligned} d_i = h_i &= \frac{V_{\max} - V_{\min}}{E_d / (n-1)} - i_T; \\ d_j = h_j &= j_T - \frac{V_{\max} - V_{\text{mid}}}{E_d / (n-1)}; \\ d_k = h_k &= k_T - \frac{V_{\text{mid}} - V_{\min}}{E_d / (n-1)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Как видно из рис. 3 для внутренних треугольников число комбинаций состояния ключей V_i соответствующих вектору состояния инвертора \mathbf{I} на единицу больше числа комбинаций состояния ключей V_j и V_k соответствующих векторам \mathbf{J} и \mathbf{K} . Поэтому векторы заданного выходного напряжения расположенные во внутренних треугольниках будем реализовывать на интервале дискретности T_s последовательностями комбинаций $V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k$ первого типа, в которых вектор \mathbf{I} реализуется двумя комбинациями V_i , а каждый вектор \mathbf{J} или \mathbf{K} реализуются одной комбинацией V_j или V_k , соответственно. При этом на краях интервала дискретности T_s располагаются две равные по длительности $d_i/2$ комбинации V_i вектора \mathbf{I} , две комбинации V_j и V_k векторов \mathbf{J} или \mathbf{K} располагаются по середине интервала дискретности, с начала V_j , длительностью d_j , а потом V_k , длительностью d_k . Последовательности комбинаций первого типа для внутренних треугольников приведены в таблице 1. Максимально возможное количество различных последовательностей комбинаций $V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k$ первого типа для первого треугольника равно $n-1=4$, для третьего треугольника равно $n-2=3$, для пятого и шестого треугольников $n-3=2$ и для седьмого и девятого треугольников $n-4=1$. Отметим, что при этом оказываются использованными все кратные комбинации состояния ключей как V_i так и V_j и V_k , соответствующи-

щие векторам состояния инвертора \mathbf{I} , \mathbf{J} и \mathbf{K} , заканчивающимся в вершинах каждого внутреннего треугольника. Отметим также, что каждая последующая комбинация в таблице 1 отличается от предыдущей комбинации только на одну единицу и только в одном разряде, т.е. соответствует одному переключению в одной фазе инвертора.

Для внешних треугольников кратность числа комбинаций состояния ключей V_i на единицу меньше кратности числа комбинаций V_j и V_k . Поэтому вектора заданного выходного напряжения расположенные во внешних треугольниках будем реализовывать последовательностями комбинаций второго типа, в которых каждый вектор \mathbf{J} или \mathbf{K} реализуется двумя комбинациями V_j или V_k , а вектор \mathbf{I} реализуется одной комбинацией V_i .

В последовательностях комбинаций второго типа комбинация V_i вектора \mathbf{I} располагается по середине симметричного относительно центра интервала дискретности, а из четырех комбинаций векторов \mathbf{J} и \mathbf{K} одновременно (на одном интервале дискретности) используются только три: две комбинации вектора большей длительности располагаются по краям интервала дискретности и одна комбинация вектора меньшей длительности располагается перед (до) или после комбинации вектора \mathbf{I} .

При $d_k > d_j$ в начале интервала дискретности T_s располагаются нижняя комбинация $V_{kн}$ вектора \mathbf{K} с относительной длительностью существования $d_{kн} = (d_k - d_j)/2$, далее следует нижняя комбинация $V_{jн}$ вектора \mathbf{J} с $d_{jн} = d_j$, затем симметрично относительно центра T_s располагается комбинация V_i вектора \mathbf{I} , а на конце интервала дискретности располагается верхняя комбинация $V_{кв}$ вектора \mathbf{K} с относительной длительностью $d_{кв} = (d_k + d_j)/2$.

При $d_k < d_j$ на краях интервала дискретности располагаются нижняя $V_{jн}$ и верхняя $V_{jв}$ комбинации вектора \mathbf{J} длительностью $(d_j + d_k)/2$ и $(d_j - d_k)/2$, а у вектора \mathbf{K} используется одна верхняя комбинация $V_{кв}$, которая располагается после комбинации вектора \mathbf{I} .

Максимально возможное количество различных последовательностей комбинаций второго типа для внешних треугольников: второго, четвертого, восьмого и десятого равна $n-2=3$, $n-3=2$ и $n-4=1$ соответственно. Последовательности комбинаций для внешних треугольников приведе-

ны в таблице 2. Отметим, что при $d_k > d_j$ не используется последняя комбинация V_j , а при $d_k < d_j$ не используется первая комбинация V_k .

Таблица 1

№ треугольника	V_i	V_j	V_k	V_i
1_1	000	→ 100	→ 110	→ 111
	111	→ 211	→ 221	→ 222
	222	→ 322	→ 332	→ 333
	333	→ 433	→ 443	→ 444
	444			
3_1	100	→ 200	→ 210	→ 211
	211	→ 311	→ 321	→ 322
	322	→ 422	→ 432	→ 433
	433			
5_1	200	→ 300	→ 310	→ 311
	311	→ 411	→ 421	→ 422
	422			
6_1	210	→ 310	→ 320	→ 321
	321	→ 421	→ 431	→ 432
	432			
7_1	300	→ 400	→ 410	→ 411
	411			
9_1	310	→ 410	→ 420	→ 421
	421			

Таблица 2

№ треугольника	$d_k > d_j$				$d_j > d_k$			
	V_k	V_j	V_i	V_k	V_j	V_i	V_k	V_j
2_1	100	→ 110	→ 210	→ 211	110	→ 210	→ 211	→ 221
	211	→ 221	→ 321	→ 322	221	→ 321	→ 322	→ 332
	322	→ 332	→ 432	→ 433	332	→ 432	→ 433	→ 443
	433	→ 443			443			
4_1	200	→ 210	→ 310	→ 311	210	→ 310	→ 311	→ 321
	311	→ 321	→ 421	→ 422	321	→ 421	→ 422	→ 432
	422	→ 432			432			
8_1	300	→ 310	→ 410	→ 411	310	→ 410	→ 411	→ 421
	411	→ 421			421			
10_1	310	→ 320	→ 420	→ 421	320	→ 420	→ 421	→ 431
	421	→ 431			431			

На рис. 7 представлены кривые изменения мгновенных значений фазных напряжений на нагрузке V_{max} , V_{mid} , V_{min} на интервале дискретности $0 - 2T_s$ для 7_1 , 8_1 , 9_1 , 10_1 , $9'_2$, $8'_2$ и $7'_2$ треугольников. При этом в каждом треугольнике выбрано по одному значению вектора заданных фазных напряжений, а именно, в точках равно удаленных от границ j_T и k_T (см. рис.4).

Векторы I , J и K , их проекции на оси фазных напряжений, относительные длительности d_i , d_j и d_k их очередность определялись в соответствии с рис. 3, 4 и таблицей 1, 2.

Предлагаемый векторный алгоритм управления многоуровневым инвертором напряжения полностью эквивалентен синусоидальной ШИМ с добавлением к трем заданным напряжениям 3-й гармоники и модифицированной, соответствующим образом, системой опорных напряжений.

Для реализации всех кратных последовательностей комбинаций $V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k$ в синусоидальной ШИМ с добавлением к трем заданным управляющим напряжениям $V_{ymid}/2$, период системы опорных напряжений должен быть увеличен в число раз равное кратности последовательностей в табл. 1, 2, рис. 8.

На рис. 9, 12 представлены разбиения интервалов дискретности на интервалы существования комбинаций для различных амплитуд заданных управляющих напряжений (V_{ym}) для синусоидальной ШИМ с прибавлением $1/2V_{ymid}$ и системой опорных напряжений представленной на рис 8. Значения амплитуд заданных напряжений выбраны таким образом, что окружности, описываемые результирующим вектором выходных напряжений инвертора являются вписанными и описанными для шестиугольников, которым соответствуют $i = 1, 2, 3, 4$.

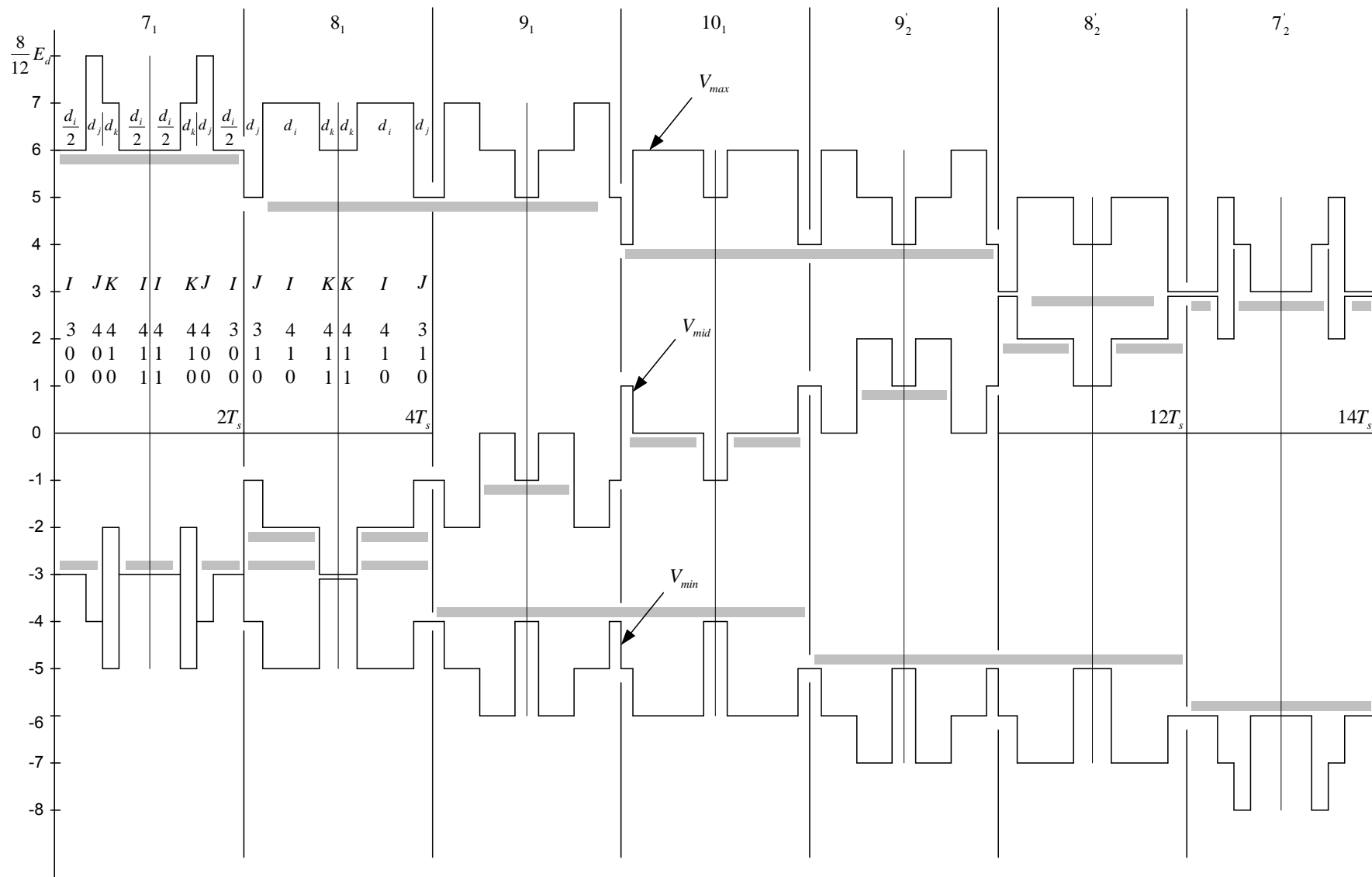


Рис. 7

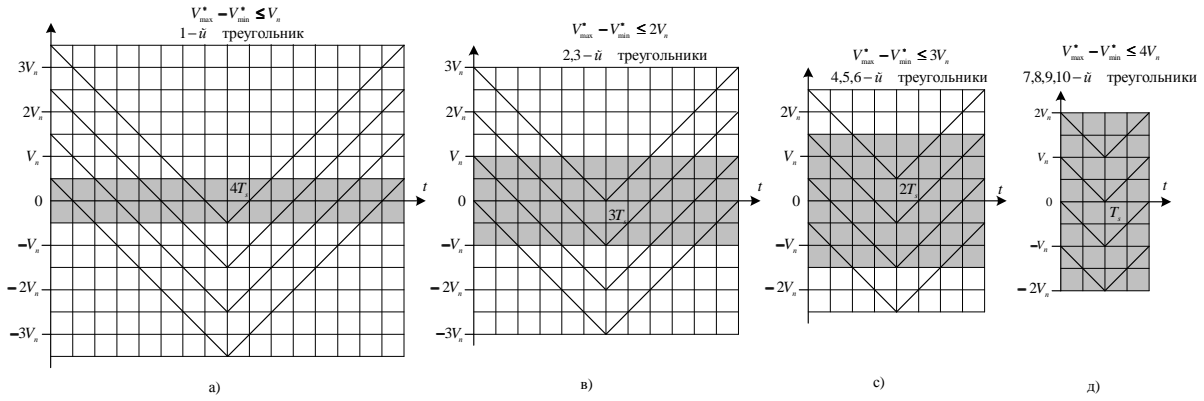


Рис. 8

На рисунках 9-12 представлено отображение трехфазной системы заданных управляющих напряжений $V_{y\max}^*$, $V_{y\text{mid}}^*$ и $V_{y\min}^*$ системой из четырех опорных напряжений на полупериод отрицательного наклона опорного напряжения в функции угла θ при изменении θ от нуля до $\frac{\pi}{3}$.

Если система опорных напряжений имеет вид рис.

8 а, а $V_{ym} \leq \frac{V_n}{\sqrt{3}}$ то отображающая функция четырехзначная, а полупериод опорного напряжения состоит из четырех аналогичных интервалов дискретности T_S (рис. 9) с опорным напряжением на каждом интервале как для двухуровневого инвертора.

При этом на каждом интервале дискретности T_S используются различные пары уровней инвертора 0-1, 1-2, 2-3 и 3-4, а при изменении θ от нуля до $\frac{\pi}{3}$ эквивалентный вектор выходного напряжения проходит треугольник 1_1 .

Если система опорных напряжений имеет вид рис. 8 б, а $V_{ym} \leq \frac{2V_n}{\sqrt{3}}$, то отображающая функция

трехзначная, а полупериод опорного напряжения состоит из трех аналогичных интервалов дискретности T_S (рис. 10) с системой опорных напряжений на каждом интервале, как для трехуровневого инвертора на полупериоде с отрицательным наклоном опорного напряжения. При этом на каждом интервале дискретности T_S используются различные «тройки» уровней 0-1-2, 1-2-3, 2-3-4, а эквивалентный вектор выходного напряжения при изменении θ от нуля до $\frac{\pi}{3}$ проходит последовательно треугольники 3_1 , 2_1 и 3_2 .

Если система опорных напряжений имеет вид рис. 8 с, а $V_{ym} \leq \frac{3V_n}{\sqrt{3}}$, то отображающая функция

двухзначная, а полупериод опорного напряжения состоит из двух аналогичных интервалов дискретности T_S (рис. 11) с системой опорных напряже-

ний на каждом интервале, как для четырехуровневого инвертора. При этом эквивалентный вектор выходного напряжения при изменении θ от нуля до $\frac{\pi}{3}$ проходит последовательно треугольники 5_1 , 4_1 , 6_1 , 4_2 , 5_2 .

Полученное отображение разбивает интервал дискретности T_S на интервалы с относительными длительностями $\frac{d_i}{2}$, d_j , d_k и $\frac{d_i}{2}$ если вектор заданного напряжения при изменении угла θ проходит внутренний треугольник. При этом интервал d_j расположен между отображениями $V_{y\max}^*$ и $V_{y\text{mid}}^*$, интервал d_k расположен между отображениями $V_{y\text{mid}}^*$ и $V_{y\min}^*$, а два интервала $\frac{d_i}{2}$ расположены между началом T_S и отображением $V_{y\max}^*$ - первый и между $V_{y\min}^*$ и концом T_S - второй. Относительные длительности d_i , d_j , d_k при этом равны:

$$d_i = i_T - \frac{V_{y\max}^* - V_{y\min}^*}{V_n};$$

$$d_j = \frac{V_{y\max}^* - V_{y\text{mid}}^*}{V_n} - j_T;$$

$$d_k = \frac{V_{y\text{mid}}^* - V_{y\min}^*}{V_n} - k_T.$$

Точки пересечения отображений $V_{y\max}^*$, $V_{y\text{mid}}^*$ и $V_{y\min}^*$ соответствуют обращению в ноль одной из длительностей d_i , d_j или d_k , а, следовательно, соответствуют нахождению эквивалентного вектора на границе треугольника.

Если вектор заданного напряжения при изменении угла θ проходит внешний треугольник, то отображения $V_{y\max}^*$, $V_{y\text{mid}}^*$ и $V_{y\min}^*$ разбивают интервал дискретности T_S на интервалы длительностью $\frac{d_k - d_j}{2}$, d_j , d_i и $\frac{d_k + d_j}{2}$ при $d_k > d_j$ или на интервалы $\frac{d_j + d_k}{2}$, d_i , d_k и $\frac{d_j - d_k}{2}$ при $d_j > d_k$. При этом относительные длительности d_i , d_j и d_k равны:

$$d_i = \frac{V_{y\max}^* - V_{y\min}^*}{V_{\Pi}} - i_T;$$

$$d_j = j_T - \frac{V_{y\max}^* - V_{y\text{mid}}^*}{V_{\Pi}};$$

$$d_k = k_T - \frac{V_{y\text{mid}}^* - V_{y\min}^*}{V_{\Pi}}.$$

Для иллюстрации предлагаемого алгоритма по сравнению с традиционным алгоритмом при малых глубинах модуляции на рис. 6÷8 выделены области, которые соответствуют традиционной системе опорных напряжений (рис. 8, д).

Как следует из рис. 9÷11 при традиционном способе векторы выходного напряжения реализуются только одной *средней* последовательностью для всех треугольников. При этом, если максимально возможное количество последовательностей в предлагаемом способе нечетное, как имеет место для 3-го внутреннего и 2-го внешнего треугольников, то находящиеся в них векторы заданного напряжения при традиционном способе реализуются одной средней последовательностью такого же типа, как и в предлагаемом способе. Если максимально возможное количество последовательностей в предлагаемом способе четное, как имеет место для 1-го, 5-го и 6-го внутренних треугольников и 4-го внешнего, то расположенные в них векторы заданного напряжения при традиционном способе реализуются одной средней последовательностью другого типа, т. е. для внутренних треугольников (1-го, 5-го и 6-го) последователь-

ностью второго типа и для внешнего треугольника (4-го) последовательностью первого типа.

При этом последовательности первого типа для внешнего треугольника (4-го) имеют вид $V_i \rightarrow V_k \rightarrow V_j \rightarrow V_i$, т.е. в отличие от последовательности первого типа для внутренних треугольников $V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k \rightarrow V_i$ комбинации V_j и V_k расположены на интервале дискретности T_S в обратной очередности. Последовательности второго типа для внутренних треугольников 1-го, 5-го и 6-го имеют вид $V_k \rightarrow V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k$ при $d_k > d_j$ и вид $V_j \rightarrow V_k \rightarrow V_i \rightarrow V_j$ при $d_k < d_j$, т.е. в отличие от последовательности второго типа для внешних треугольников $V_k \rightarrow V_j \rightarrow V_i \rightarrow V_k$ при $d_k > d_j$ и $V_j \rightarrow V_i \rightarrow V_k \rightarrow V_j$ при $d_k < d_j$, изменено расположение на интервале дискретности T_S комбинации вектора меньшей длительности V_j при $d_k > d_j$ и V_k при $d_k < d_j$ относительно комбинации V_i .

Разработан пространственно-векторный алгоритм ШИМ и эквивалентный алгоритм синусоидальной ШИМ для многоуровневых инверторов напряжения, обеспечивающий использование всех уровней инвертора и при малых глубинах модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берестов В.М., Харитонов С.А. Пространственно-векторный алгоритм управления многоуровневым инвертором напряжения. Технічна електродинаміка. Тематический выпуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 1. Київ, 2004, с.112-119
2. G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutati, and G. Sciotto, «A new multilevel PWM method: A theoretical analysis», IEEE Trans. Power Electron. vol.7, pp. 497-505, July 1992.
3. L. Tolbert, F. Peng, T. Habetler «Multilevel PWM Method at Low Modulation Indices» », IEEE Trans. Power Electron. vol.15, pp. 719-725, 2000.
4. N. Celanovic, D. Boroyevich, A Fast Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three-Phase Converters. IEEE transactions on industry applications, vol. 37, no. 2, March/April 2001

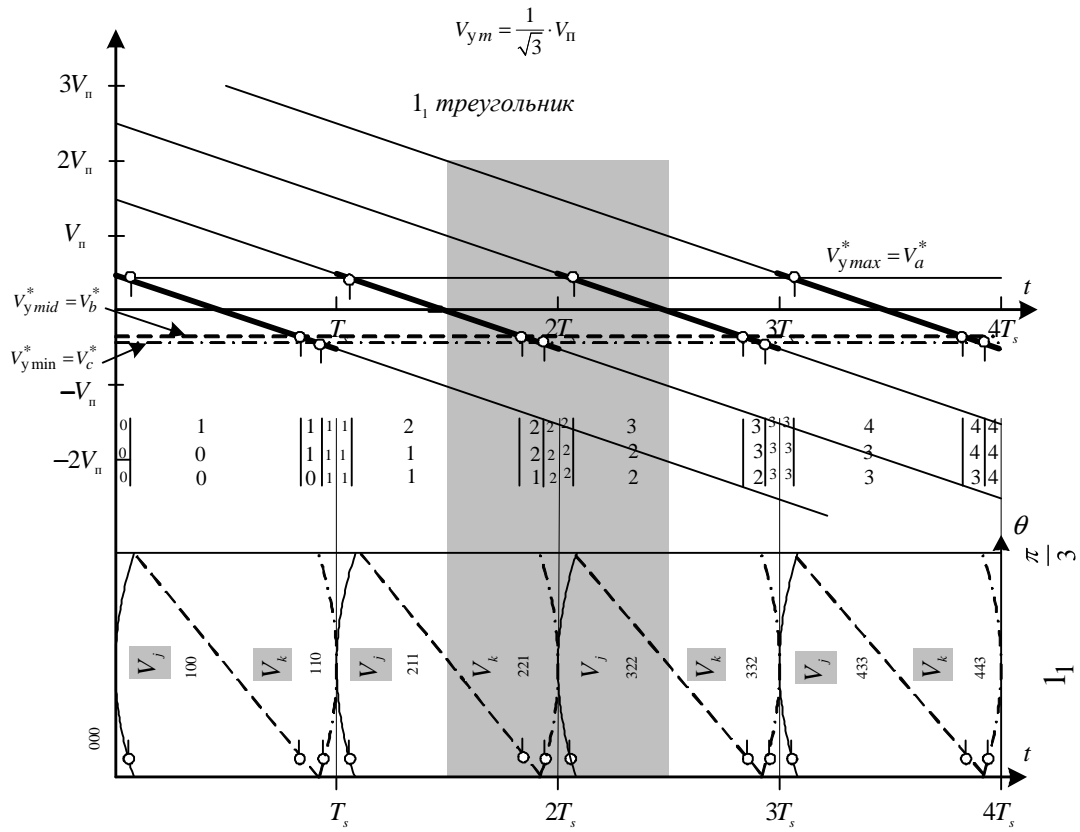
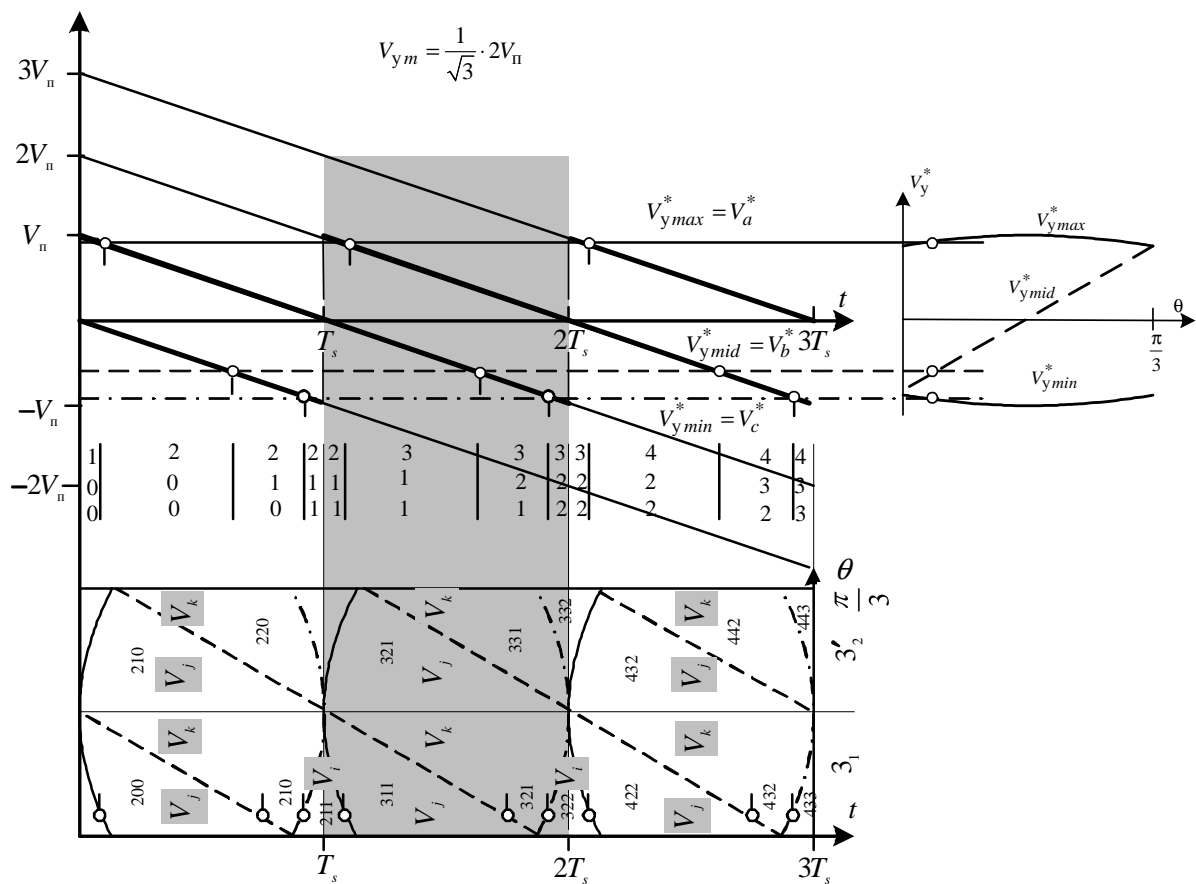
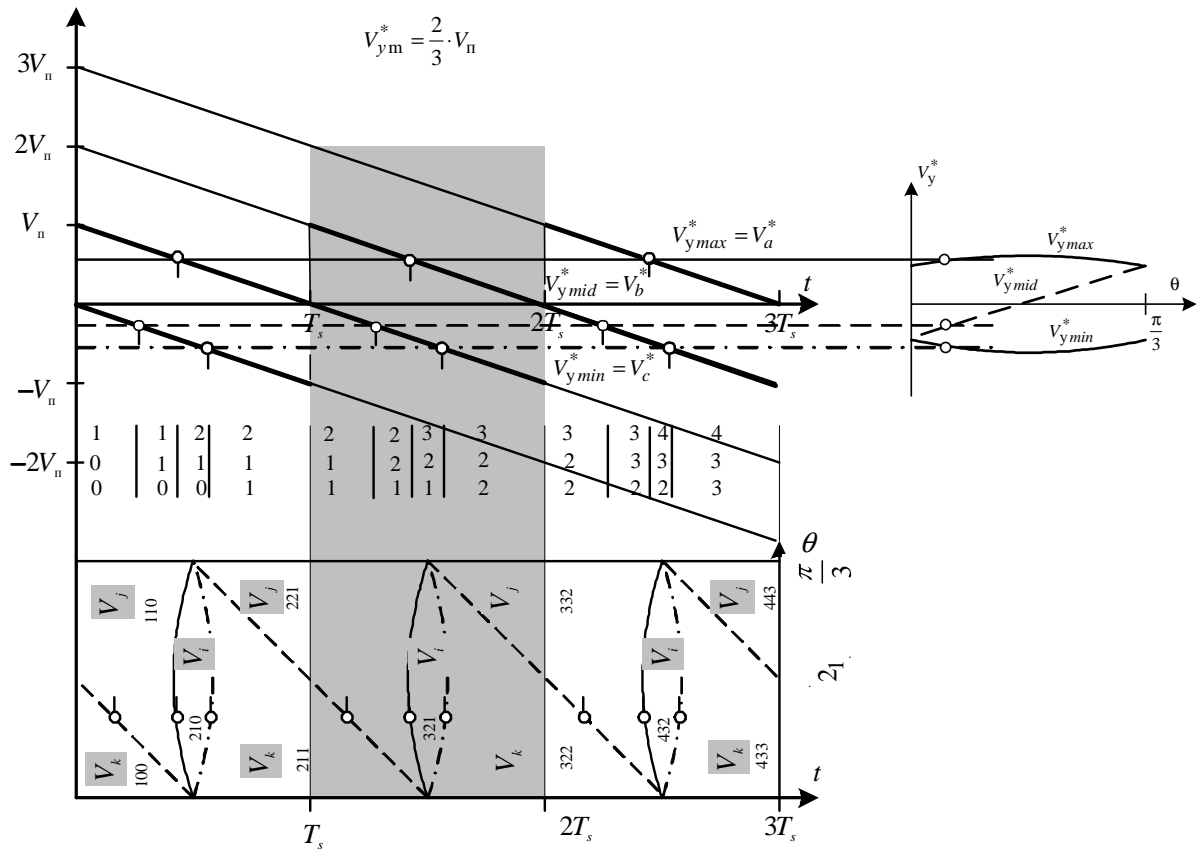


Рис.9



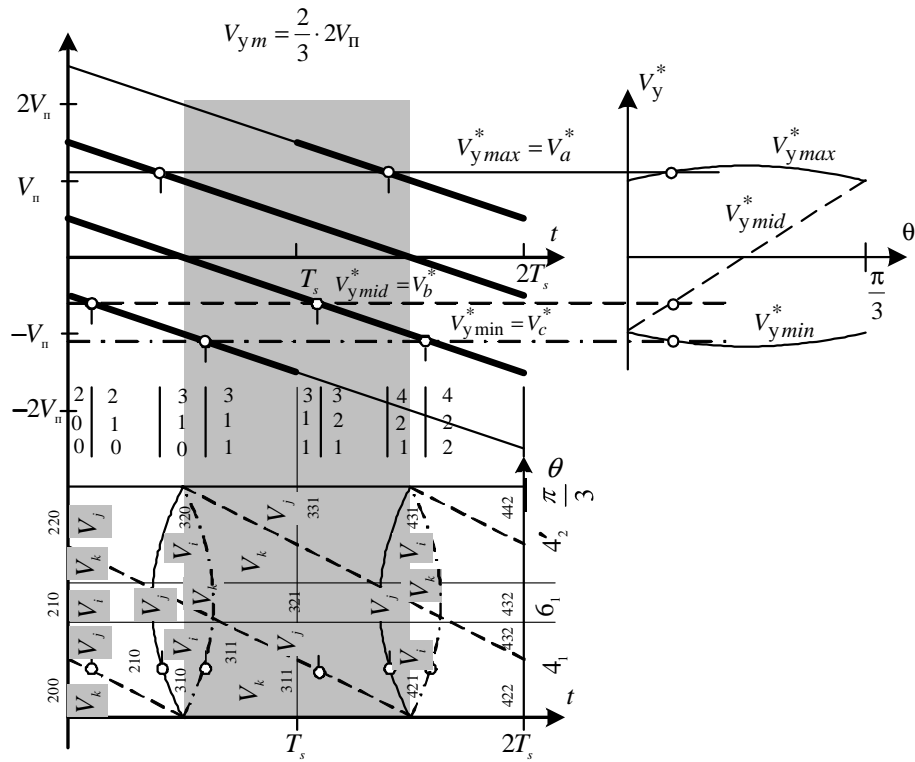


Рис. 11, а

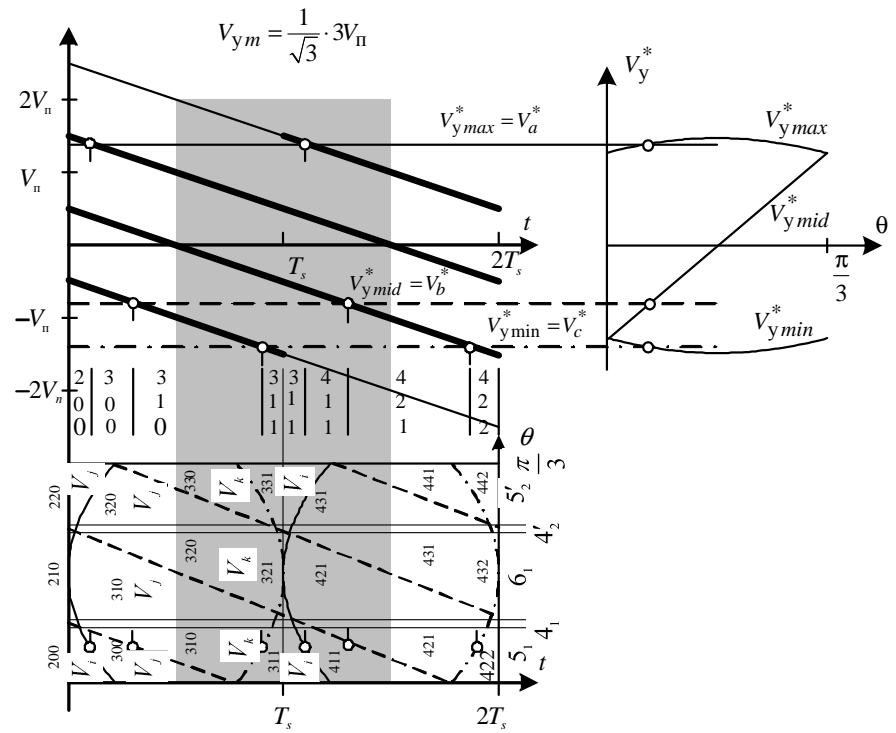


Рис. 11, б

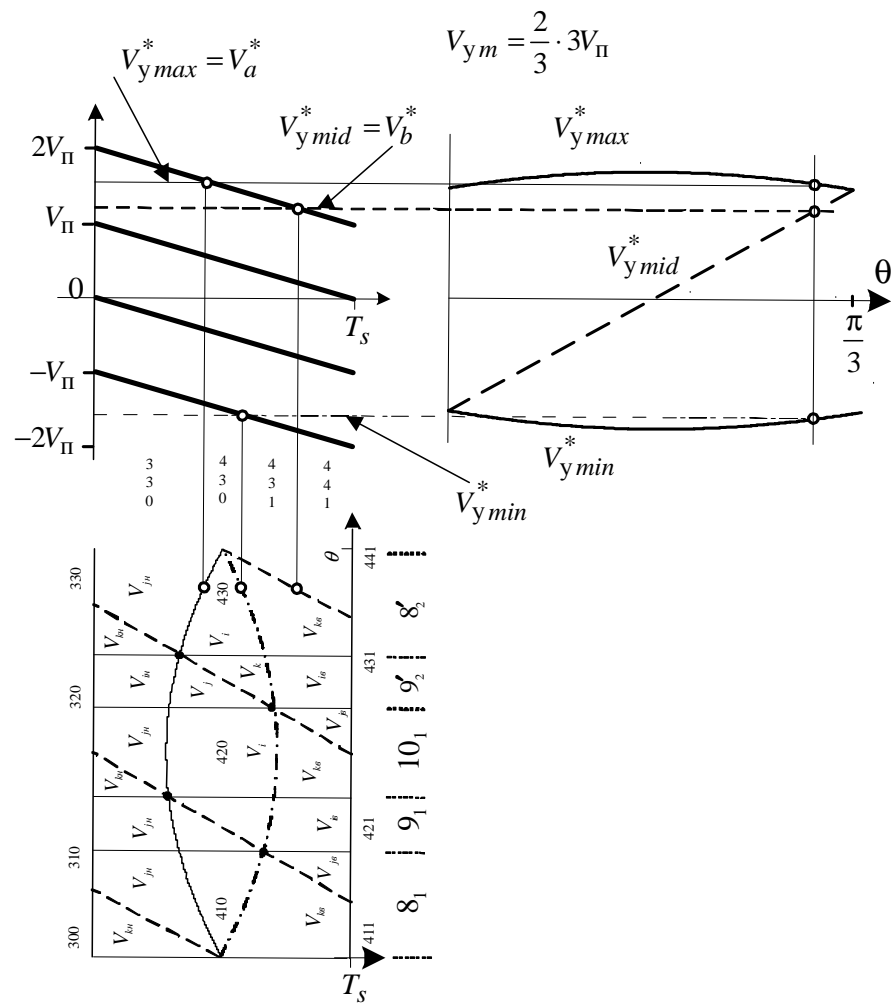


Рис. 12, а

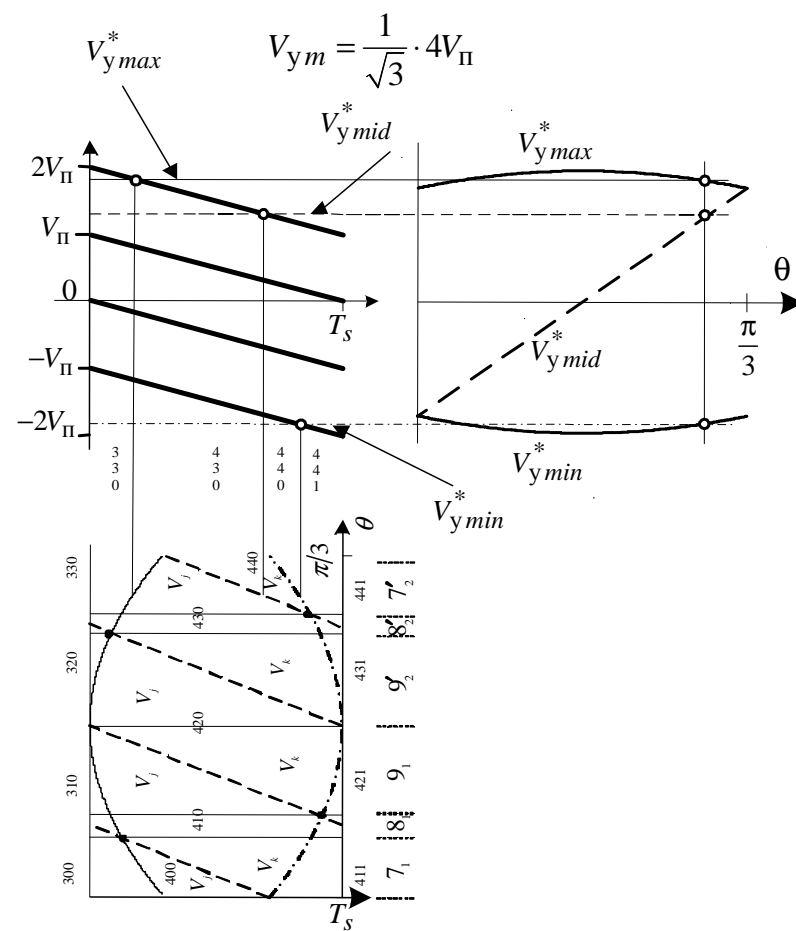


Рис. 12, б