

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЕКТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАСКАДНЫМ МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Шавёлкин А. А., Уланов Р. В.

Донецкий национальный технический университет
vladimir@koe.dgtu.donetsk.ua

In paper some results of works which are carried out in DonNTU on use method of space voltage vector for control of cascade multilevel converter of frequency are submitted. The reductive method with using fixed states of vector is considered and basic calculation ratio for 3 levels of voltage in phases of multilevel converter of frequency are submitted.

Создание частотно-регулируемого электропривода переменного тока среднего напряжения (6 - 10кВ) в последнее время обычно связывается с применением многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ). Основной принцип их работы - ступенчатая аппроксимация синусоиды выходного напряжения. Достоинствами таких МПЧ являются:

- выходное напряжение по гармоническому составу приближается к существующим стандартам и в отличие от традиционных ШИМ инверторов характеризуется сниженным du/dt , что дает возможность их применения без дополнительных «синусных» фильтров;
- силовые цепи могут быть выполнены на низковольтных полупроводниковых приборах;
- за счет использования на входе многофазных схем выпрямления потребляют от сети практически синусоидальный входной ток;

Наибольший интерес в последнее время уделяется каскадным МПЧ с последовательным соединением в фазах нескольких однофазных инверторов с изолированными источниками постоянного тока [1-3]. При этом выходное напряжение формируется как результат суммирования напряжений отдельных инверторов в фазах. Здесь существенным недостатком является большое число силовых ключей (k) и изолированных источников в схеме - при n - уровнях выходного напряжения $k=4n$ и n - источников на фазу.

Традиционный принцип управления основан на независимом формировании напряжений в фазах МПЧ. При этом используются модифицированные методы ШИМ [1]: многоуровневая или мультиплексорная, когда модулирующие напряжения треугольной формы сдвинуты по уровню или по фазе. Имеются упоминания о использовании для управления пространственного вектора напряжения. Однако какого-либо серьезного применения этот метод пока не нашел. Существующий подход к оценке возможностей и качества напряжения МПЧ в качестве основного показателя использует число уровней выходного напряжения фазы преобразователя, что пригодно для однофазного варианта и схемы с нулевым проводом, но не позволяет оценить напряжение на нагрузке без нулевого провода. Хотя, именно, напряжение нагрузки является конечной целью преобразования.

В последнее время с созданием высоковольтных ключей наметилась тенденция к минимизации силовых цепей МПЧ в плане уменьшения количества изолированных источников и ключей для их коммутации [2-3].

Внедрение частотного привода среднего напряжения, как важнейшего элемента системы энергосбережения, в настоящее время является, как никогда ранее, актуальной задачей. В этом плане актуален вопрос совершенствования схемы и принципов управления МПЧ с целью улучшения его показателей и привода в целом.

Цель работы: исследование возможностей применения метода пространственного вектора напряжения на нагрузке для управления каскадными многоуровневыми преобразователями частоты. При этом необходимо решить следующие задачи:

- Произвести оценку возможностей МПЧ с разным числом источников в фазе по формированию напряжения в фазах симметричной нагрузки (двигатель).
- Исследовать возможные варианты реализации метода пространственного вектора.
- Получить основные соотношения и обосновать принцип управления на основе метода пространственного вектора.

Результаты работы. Основным элементом каскадного МПЧ является мостовая однофазная схема автономного инвертора напряжения (АИН), представляющая собой симметричный коммутатор на четырех ключах с изолированным источником постоянного напряжения E в диагонали постоянного тока. Каждая фаза МПЧ включает n последовательно соединенных АИН (рис.1,а). Снижение напряжений отдельных источников в $\sqrt{3}$ раз достигается при соединении фаз МПЧ по схеме «звезда» (рис.1,б) поскольку формируется фазное напряжение на нагрузке. В качестве источника постоянного напряжения АИН (E) используется трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель с конденсатором, питающийся от отдельной обмотки входного многообмоточного трансформатора.

При замыкании соответствующих ключей в каждом из АИН получаем значения выходного напряжения фазы МПЧ $U_{вых}=\{0; \pm E; \pm 2E; \dots \pm nE\}$, а количество уровней в кривой фазного напряжения МПЧ:

$$N=(2n + 1).$$

(1)

Число ключей на фазу МПЧ $k=4n$.

Вместе с тем количество уровней в кривой фазного напряжения МПЧ N не отражает возможности пре-МПЧ

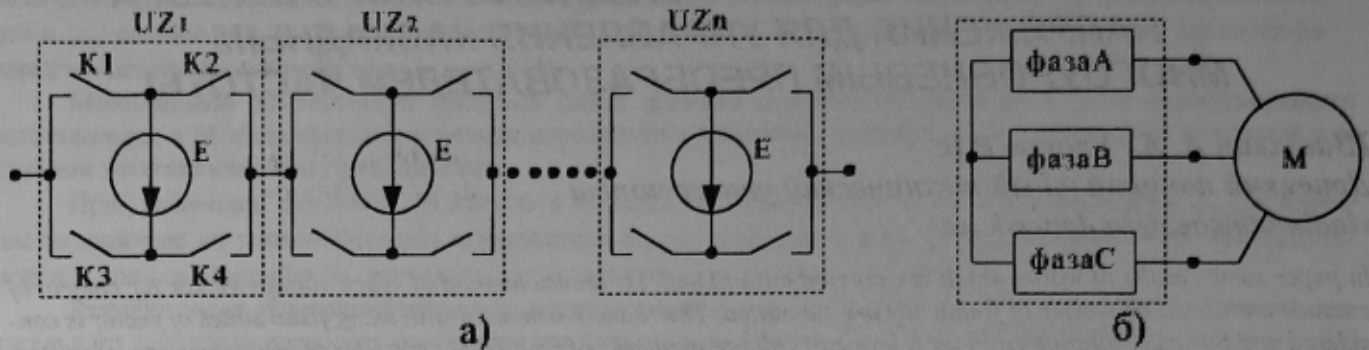


Рисунок 1 - Принцип реализации силовых цепей каскадного МПЧ

образователя по формированию напряжения в фазах нагрузки. Покажем это на простейшем примере, когда $n=1$ и $N=3$, т.е. в каждой фазе МПЧ используется только один инвертор. При этом возможные значения напряжения в фазе преобразователя $U_{вых} = \{0, \pm E\}$. Соответствующие фазные напряжения на нагрузке можно рассчитать (данные в табл. 1 приведены в относительных единицах) в соответствии с рис. 1 (фазы двигателя соединены по схеме «звезда») известными методами, например с использованием метода двух узлов. Нетрудно заметить, что при использовании комбинаций напряжений в фазах МПЧ (E_a, E_b, E_c), когда два из них равны 0, напряжения на нагрузке (U_a, U_b, U_c) принимают значения $\pm E/3$ и $\pm 2E/3$ (первый уровень). Если добавить другие комбинации

(в табл. 1 показаны ниже) получаем на нагрузке уровни $\pm E$ и $\pm 4E/3$ (второй уровень). Соответственно действующее значение напряжения первой гармоники линейного напряжения $U_{л} = E\sqrt{2}$.

Следует отметить, что наиболее полную оценку возможностям схемы МПЧ в плане преобразования напряжения дает метод пространственного вектора напряжения.

Для трехфазного АД пространственный вектор напряжения статора:

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

где: $a = e^{j2\pi/3}$, $a^2 = e^{-j2\pi/3}$ - операторы поворота,

Таблица 1 - Напряжения в фазах МПЧ и нагрузки

E_a	E_b	E_c	U_a	U_b	U_c
0	-1	0	0,333	-0,667	0,333
1	0	0	0,667	-0,333	-0,333
0	0	-1	0,333	0,333	-0,667
1	-1	1	0,667	-1,333	0,667
1	-1	0	1	-1	0
1	-1	-1	1,333	-0,667	-0,667

учитывающие пространственное расположение обмоток на статоре двигателя; U_a, U_b, U_c - значения фазных напряжений двигателя.

При синусоидальном фазном напряжении получаем вектор, равномерно вращающийся с частотой ω (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 (на рис. 2 показан сектор в 60°). Для рассмотренного выше случая имеем два уровня пространственного вектора - соответственно первый и второй от центра шестигранника. Для первого уровня имеем 6 положений вектора с дискретностью перемещения 60° . Для второго 12 положений с дискретностью перемещения 30° .

На рис. 3 показано фазное напряжение нагрузки, полученное с использованием метода пространственного вектора при $n=1$ (фактическое количество уровней $N_n=9$ и не соответствует (1)).

Общее количество положений, которое может иметь пространственный вектор напряжения на нагрузке МПЧ определяется количеством уровней выходного напряжения МПЧ N :

$$V = 3N^2 - 3N + 1.$$

Аналогичным образом рассчитаны и построены пространственные вектора для $n=2$ ($N=5$) - третий и четвертый шестигранники на рис. 2 с дискретностью пере-

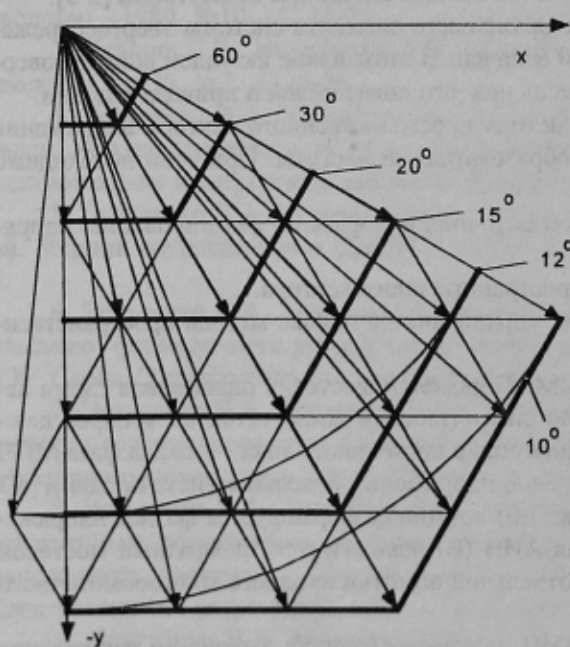


Рисунок 2 - сектор 60° пространственного вектора

мещения 20° и 15° , а также и для $n=3$ ($N=7$) – пятый и шестой шестигранники на рис.2 с дискретностью перемещения 12° и 10° .

Реализация метода пространственного вектора (пространственно – векторной модуляции – SVM), как

правило, основана на геометрических соотношениях исходя из совокупности векторов на плоскости. При этом синтезируемый вектор формируется из трех соседних векторов, концы которых образуют треугольник, внутри которого находится конец этого вектора. Этот метод связан с определением координаты точки (конца синтезируемого вектора) по известным координатам вершин треугольника. Он достаточно громоздок и нашел применение для трех- и пяти – уровневых МПЧ [1].

В [1] также предложен вариант управления для МПЧ с одиннадцатью уровнями $N=11$, который основан на выборе ближайшего (из 331 векторов) к требуемому вектору. Очевидно, что такой вариант в связи с дискретностью по амплитуде векторов применим только на верхних уровнях при достаточном их количестве (при $N=11$ пространственный вектор имеет 10 уровней – описывает десять шестигранников). Информации о фактической дискретности регулирования напряжения на нагрузке в работе [1] не приводится.

Рассмотрим упрощенный вариант реализации метода SVM. Исходим из того, что конец синтезируемого вектора должен перемещаться по окружности (граничной соответствует окружность вписанная в шестигранник). Выше было показано, что уже на третьем уровне дискретность перемещения 20° , а дальше уменьшается до 10° на шестом уровне. Это дает основание сохранить указанную дискретность и перейти к использованию базовых векторов, в качестве которых будем использовать один из трех векторов, образующих треугольник и проходящий через него. Конец синтезируемого вектора при регулировании амплитуды перемещается по базовому вектору по траектории проходящей внутри треугольника (на рис.4 для сектора 30° выделена жирной пунктирной линией).

Рассмотрим, как можно сформировать вектор, регулируемой амплитуды, вершина которого будет перемещаться по выделенной траектории. Для этого воспользуемся рис.5, где выделен треугольник ABC и образующие его вектора \overline{OC} , \overline{OB} , \overline{OA} . В качестве базового используем вектор \overline{OB} . Тогда синтезируемый вектор \overline{OK} можно представить как сумму неизменного вектора \overline{OD} и вектора с переменной амплитудой \overline{DK} . Вектор \overline{OD} можно получить как сумму векторов \overline{OE} и \overline{OF} :

$$\overline{OD} = (\tau_1 \cdot \overline{OA} + \tau_2 \cdot \overline{OC}), \quad (2)$$

где $\tau_1 \cdot \overline{OA} = \overline{OF}$, $\tau_2 \cdot \overline{OC} = \overline{OE}$. Соответствующие коэффициенты определяются соотношениями:

$$\tau_1 = \frac{OF}{OA}, \quad \tau_2 = \frac{OE}{OC} \quad (3)$$

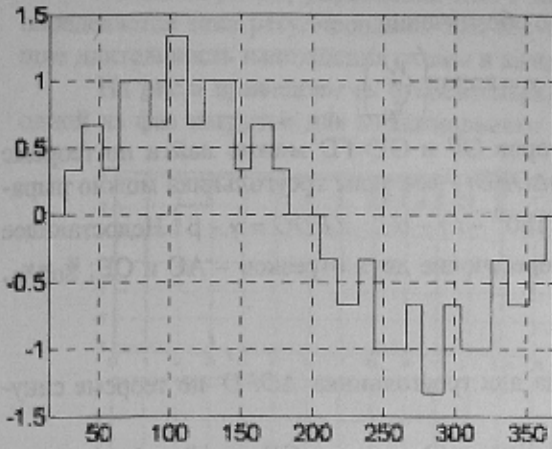


Рисунок 3 – Напряжение на фазе нагрузки при $n=1$

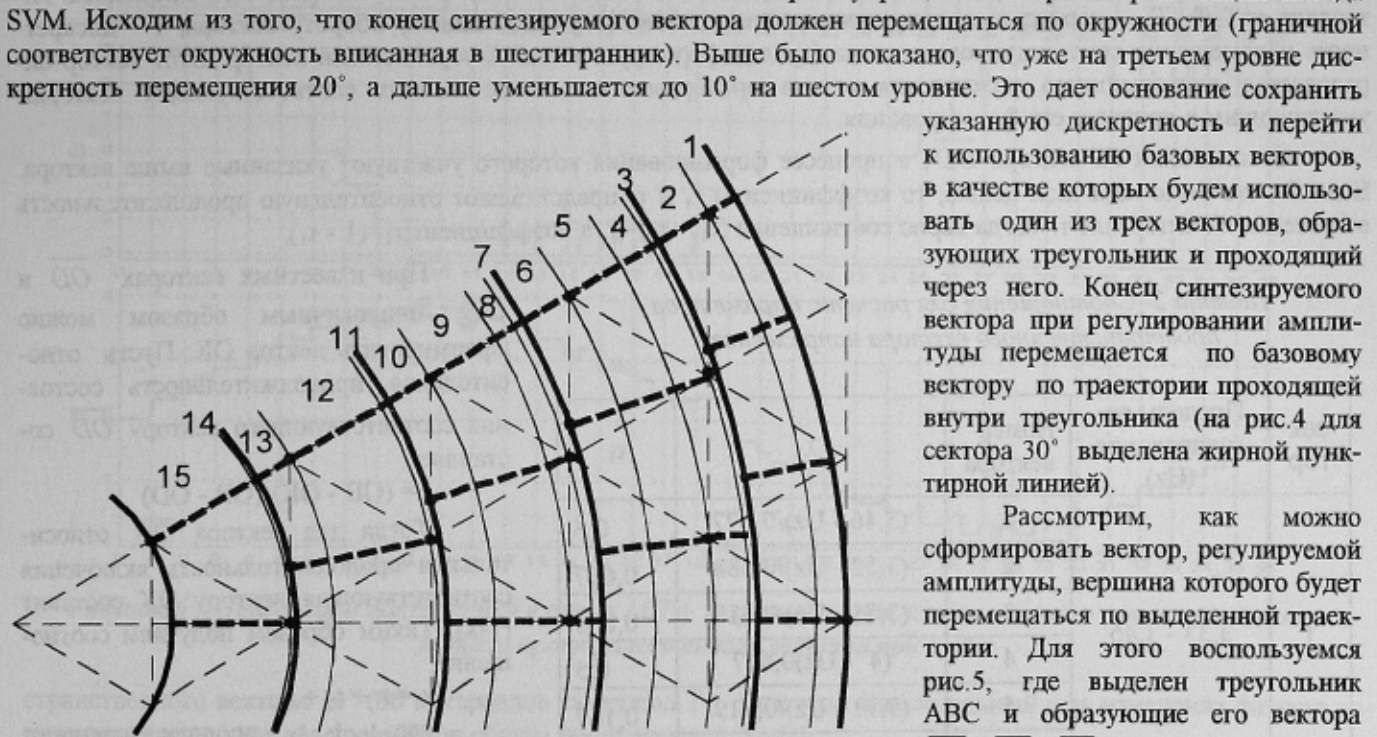


Рисунок 4 – Определение зон регулирования пространственного вектора

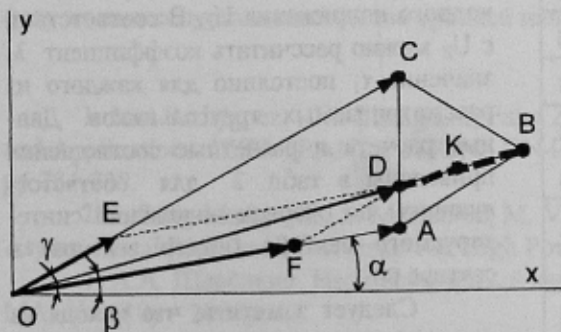


Рисунок 5 – К расчету коэффициентов

А используя два коллинеарных вектора \overline{OD} и \overline{OB} , можно получить требуемый вектор переменного (заранее задаваемого) модуля \overline{OK} , конец которого перемещается между точками D и B. Значения τ_1 и τ_2 , могут быть рассчитаны исходя из геометрических соотношений по рис.5 и для каждого из треугольников остаются неизменными.

Для расчета амплитудных коэффициентов введем следующие обозначения:

$$\angle xOA = \alpha = \arctan\left(\frac{y_A}{x_A}\right), \quad \angle xOB = \beta = \arctan\left(\frac{y_B}{x_B}\right), \quad \angle xOC = \gamma = \arctan\left(\frac{y_C}{x_C}\right).$$

Необходимые для расчета коэффициентов амплитуды векторов OF и OE=FD можно найти по теореме синусов применительно к $\triangle OFD$. Итак, рассмотрим треугольник $\triangle OFD$ - все углы треугольника можно выразить через принятые выше обозначения: $\angle DOF = \beta - \alpha$, $\angle OFD = 180^\circ - (\gamma - \alpha)$, $\angle FDO = \gamma - \beta$. Недостающее значение OD можно найти, определив координату точки D, как пересечение двух отрезков - AC и OB: $x_D = x_A$,

$$y_D = \frac{y_B}{x_B} \cdot x_D.$$

Координаты соответствующих векторов нам известны. Тогда для треугольника $\triangle OFD$ по теореме синусов:

$$\frac{OD}{\sin(180^\circ - \gamma + \alpha)} = \frac{OF}{\sin(\gamma - \alpha)} = \frac{FD}{\sin(\beta - \alpha)}, \quad \text{откуда: } OF = \frac{OD \cdot \sin(\gamma - \beta)}{\sin(180^\circ - \gamma + \alpha)}, \quad FD = \frac{OD \cdot \sin(\beta - \alpha)}{\sin(180^\circ - \gamma + \alpha)}.$$

Исходя из полученных значений определяем соответствующие коэффициенты по выражению (3).

Сущность метода пространственного вектора (SVM) состоит в том, что на определенном временном интервале $\tau = T_2/\theta$ (T_2 - период выходного напряжения, соответствующий одному обороту вектора, θ - дискретность перемещения синтезируемого вектора (град.)) формируется некий усредненный вектор. Этот вектор определяется длительностью нахождения схемы преобразователя в состояниях соответствующих векторам участвующим в процессе его формирования.

Остановимся на векторе \overline{OD} , в процессе формирования которого участвуют указанные выше вектора. Если бы это было конечной целью, то коэффициенты τ_1 и τ_2 представляют относительную продолжительность включения на интервале τ . Тогда верно соотношение $(\tau_1 + \tau_2) = 1$, а коэффициент $\tau_2 = (1 - \tau_1)$.

Таблица 2- Соотношения для расчета параметров пространственного вектора напряжения

сектор	Пределы регулирования (U_z)	Номер вектора	λ	τ_1
1	3,33 - 3,46	1	$(3,46 - U_z)/0,577$	0,5
		2	$(3,52 - U_z)/0,588$	0,667
		3	$(3,71 - U_z)/0,619$	0,833
		4	$(4 - U_z)/0,667$	0,5
		5	$(3,71 - U_z)/0,619$	0,167
		6	$(3,52 - U_z)/0,588$	0,333
2	3,09 - 3,33	1	$(3,46 - U_z)/0,577$	0,5
		2	$(3,52 - U_z)/0,588$	0,667
		3	$(3,71 - U_z)/0,619$	0,833
		4	$(3,33 - U_z)/0,667$	0,5
		5	$(3,71 - U_z)/0,619$	0,167
		6	$(3,52 - U_z)/0,588$	0,333
3	3,06 - 3,09	1	$(2,91 - U_z)/(-0,581)$	0,4
		2	$(3,06 - U_z)/0,611$	0,2
		3	$(3,33 - U_z)/0,667$	0,5
		4	$(3,06 - U_z)/0,611$	0,8
		5	$(2,91 - U_z)/(-0,581)$	0,6

При известных векторах \overline{OD} и \overline{OB} аналогичным образом можно сформировать вектор OK. Пусть относительная продолжительность состояния соответствующего вектору \overline{OD} составляет:

$$\lambda = (OB - OK)/(OB - OD)$$

Тогда для вектора \overline{OB} относительная продолжительность включения соответствующая вектору DK составит $(1-\lambda)$. Таким образом получаем соотношение:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3,$$

где: τ_1, τ_2, τ_3 - продолжительности состояний соответствующих векторам OA, OC и OB, значения которых:

$$\tau_1 = \lambda \cdot \tau_1 \cdot \tau, \quad \tau_2 = \lambda \cdot \tau_2 \cdot \tau, \quad \tau_3 = (1 - \lambda) \cdot \tau.$$

Синтезируемый вектор OK представляет собой заданное значение выходного напряжения U_z . В соответствии с U_z можно рассчитать коэффициент λ , значение τ_1 постоянно для каждого из рассматриваемых треугольников. Данные расчета и расчетные соотношения приведены в табл. 2 для соответствующих по очереди положений синтезируемого вектора (номер вектора) в секторе 60° .

Следует заметить, что исходя из геометрических соотношений весь диапазон регулирования напряжения может

быть разбит на 15 зон (для 6 уровней рассматриваемого пространственного вектора). На рис.4 зоны регулирования ограничены соседними окружностями. Данные в табл.2 приведены для зон 1,2,3. Нетрудно заметить, что отдельные зоны (3, 7, 11) имеют ширину порядка 1% и могут без ущерба исключены.

Таким образом, управление МПЧ может быть реализовано следующим образом: в соответствии с U_Z определяется зона регулирования, для текущего номера вектора рассчитываются значения t_1, t_2, t_3 определяющие длительность нахождения схемы в каждом состоянии.

На рис.6 приведены (в относительных единицах) диаграммы напряжений в фазах МПЧ и напряжение в одной из фаз нагрузки для максимального значения напряжения (зона 1) при дискретности перемещения про-

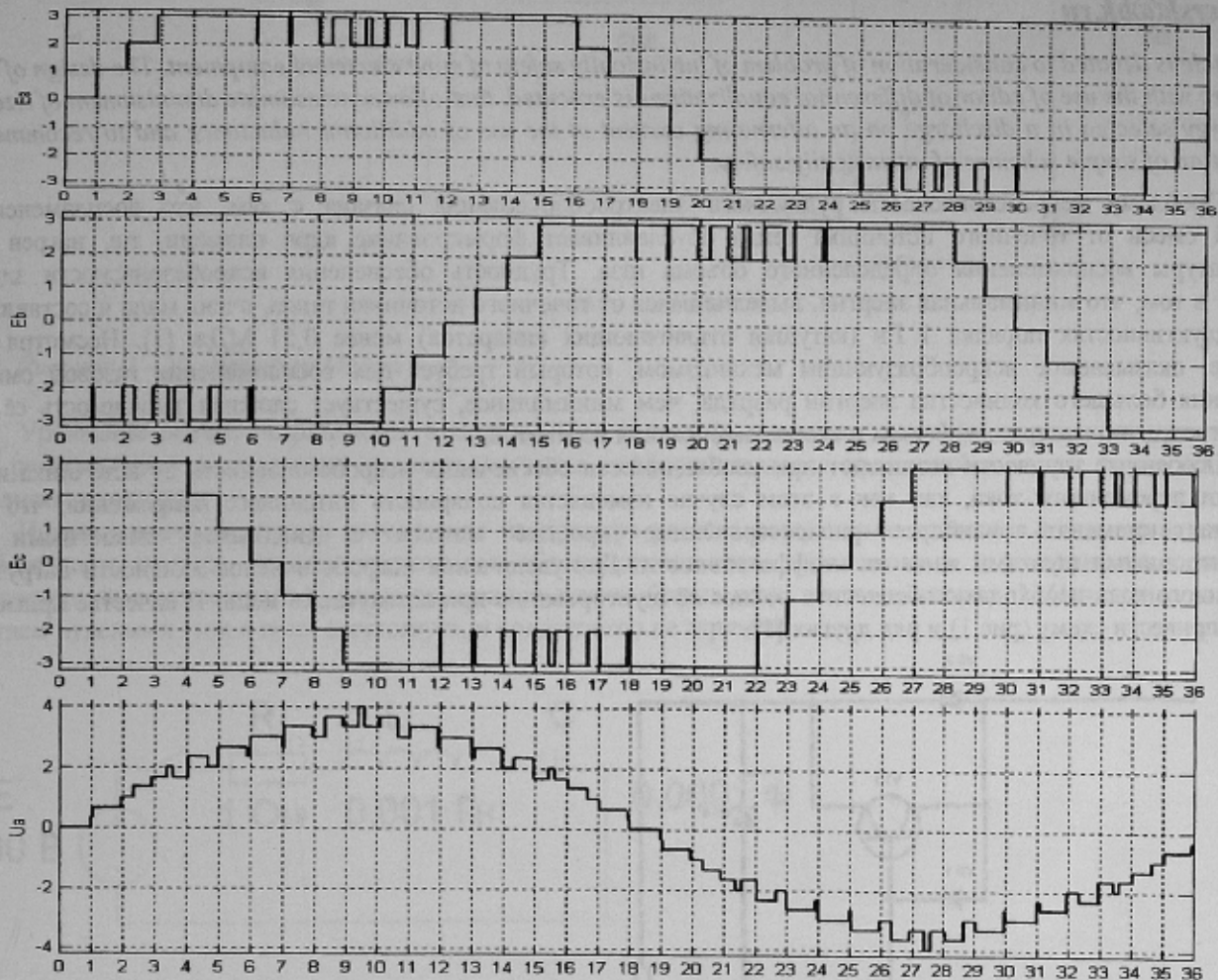


Рисунок 6 – Диаграммы напряжений в фазах МПЧ и фазное напряжение нагрузки при использовании метода пространственного вектора при $n=3$.

странственного вектора 10° (36 интервалов за период T_2). При этом максимальный шаг изменения фазного напряжения составляет два уровня при общем числе уровней $N_H=25$.

Исходя из этого, при использовании пространственного вектора можно также сформулировать подход к минимизации схемы МПЧ исходя из достаточности количества уровней в кривой напряжения на фазах нагрузки и ограничения количества уровней напряжения в фазе МПЧ значением $n=3$ или 4 ($N_H=33$).

Наиболее полно возможности минимизации схемы МПЧ могут быть использованы при использовании различных (кратных) значений напряжений инверторов [3]. Так уже при использовании только двух инверторов на фазу можно получить количество уровней напряжения в фазе МПЧ значением $n=4$ ($N_H=33$).

ЛИТЕРАТУРА

1. José Rodríguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 4, AUGUST 2002, pp.724-738.
2. J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, A. Rufer. A Generalized Design Principle of a Uniform Step Asymmetrical Multilevel Converter For High Power Conversion. EPE 2001 – Graz.
3. А.А. Шавёлкин. Несимметричный каскадный многоуровневый преобразователь частоты// Праці ЛВ МАІ №1 (10) – 2005р.