

Новый алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь

А.А. Коротков, А.Б. Виноградов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: vector@drive.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Вопросы исследования структуры, разработки алгоритмов управления и повышения энергоэффективности систем высоковольтного преобразования энергии сохраняют свою актуальность. Известные синусоидальные алгоритмы ШИМ для высоковольтного каскадного преобразователя значительно уступают по потерям энергии в сравнении с векторным подходом формирования ШИМ и не решают вопрос комплексной оптимизации управления преобразователем в составе высоковольтного частотно-регулируемого привода.

Материалы и методы: Расчеты выполнены на основе компьютерного моделирования физических процессов с использованием методов векторного анализа и теории дифференциальных уравнений.

Результаты: Разработан алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтным каскадным преобразователем частоты с минимизацией коммутационных потерь. Предложен алгоритм распределения коммутаций по ячейкам. Проведены комплексные исследования и получены результаты модельных и макетных испытаний 17-уровневого каскадного преобразователя при векторном формировании ШИМ по разработанной методике.

Выводы: Разработанный алгоритм векторного формирования ШИМ каскадного преобразователя обеспечивает снижение коммутационных потерь в сравнении с алгоритмами традиционной синусоидальной ШИМ за счет минимизации числа переключений силовых ключей, а также адаптацию к изменению числа уровней и колебаниям напряжений в звене ячеек.

Ключевые слова: каскадный преобразователь, частотно-регулируемый электропривод, векторное формирование ШИМ, векторная диаграмма напряжений.

New Vector PWM Algorithm for High Voltage Converter with Switching Loss Minimization

A.A. Korotkov, A.B. Vinogradov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: vector@drive.ispu.ru

Abstract

Background: The questions of studying the structure, developing control algorithms and increasing the energy efficiency of High Voltage Energy Converters remain urgent. The well-known Sinusoidal PWM methods for high voltage cascade converters have considerably higher energy losses compared to Space Vector PWM methods and do not resolve the problem of converter control comprehensive optimization in the High Voltage variable-frequency electric drive.

Materials and methods: The calculations are based on computer simulation applying methods of vector analysis and differential equations theory.

Results: A Space Vector Pulse-Width Modulation algorithm for High Voltage cascade frequency converters with reduced switching losses has been developed. An algorithm of sharing commutation between the cells was proposed. The authors have conducted a comprehensive study including mathematical and physical modeling of the 17-level cascade converter with the proposed Space Vector PWM algorithm which resulted in a significant loss reduction in comparison with the traditional Sinusoidal PWM method.

Conclusions: The developed Space Vector PWM algorithm of the cascade converter makes it possible to reduce switching losses through minimizing the number of power key switchings as well as to adjust to the changing number of levels and voltage variations in the cell links.

Key words: Cascade Converter, Variable-Frequency Electric Drive, Pulse-Width Modulation Space Vector, Vector Voltage Diagram.

Мощный высоковольтный электропривод (ВЭП) находит широкое применение во многих современных отраслях народного хозяйства: в промышленности, электроэнергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве и др. Энергоэффективность таких объектов определяется ра-

циональным использованием энергии в процессе производства продукции и во многом зависит от эффективности самого электрооборудования и методов регулирования ВЭП.

Одним из основных путей энергосбережения предприятий, использующих ВЭП, является

модернизация оборудования и внедрение энергоэффективных систем высоковольтного частотно-регулируемого привода (ВЧРП). Регулирование частоты вращения позволяет оптимизировать технологические процессы, повысить уровень их автоматизации, а также, имея возможность задания режима работы, снизить энергопотребление, уменьшить износ и повысить надежность эксплуатации электрического и механического оборудования. Значительный эффект энергосбережения достигается при переходе на управление от ВЧРП мощных турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, компрессоров) [1].

Построение энергоэффективных систем ВЧРП предполагает комплексное решение двух основных задач. Первая – выбор топологии высоковольтного преобразователя частоты (ВПЧ) и расчет параметров схемы – сложная и многокритериальная задача оценки и анализа технико-экономических показателей. Вторая задача – разработка алгоритма управления ВПЧ, позволяющего формировать выходное напряжение в рабочем диапазоне частот с минимумом потерь мощности и допустимым уровнем несинусоидальных искажений.

Для известной каскадной топологии высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты (ВМПЧ) [1] нами разработан алгоритм векторного формирования ШИМ, обладающий свойствами адаптации к изменениям структуры и параметров силовой части, а также минимизации коммутационных потерь. Функции адаптации векторной ШИМ предусматривают возможность настройки на текущие параметры структуры ВМПЧ в процессе работы при шунтировании аварийных ячеек, а также компенсации рассогласования реальных напряжений в звене ячеек. Поддержка этих функций в дополнение к базовому алгоритму векторной ШИМ определяет надежность эксплуатации и качество регулирования выходных процессов ВЧРП.

Разработка базового алгоритма векторного формирования ШИМ включает в себя синтез закона модуляции и синтез закона коммутации [2]. В основу симплексного закона модуляции положена известная методика определения длительности включения на периоде ШИМ трех ближайших векторов напряжения, образующих на плоскости треугольник [3]. Алгоритм модуляции, согласно этой методике, представляет собой следующую последовательность расчетов:

1. Нормализация модуля вектора заданного напряжения \vec{U}_z .

2. Определение номера сектора S_i векторной диаграммы и углового положения φ_i в границах этого сектора для заданного нормализованного вектора по его проекциям (u_α, u_β) .

3. Расчет коэффициентов k_1, k_2 , определяющих область двух смежных треугольников векторной диаграммы (рис. 1).

4. Определение типа и номера треугольника Δ_j , в котором лежит вершина заданного вектора. Расчет проекций вершины заданного вектора во вспомогательной системе координат $(u_{\alpha 0}, u_{\beta 0})$.

5. Расчет длительностей включения t_a, t_b, t_0 для векторов треугольника Δ_j .

Получаемые в результате расчетов значения t_a, t_b, t_0 представляют собой длительности включения за цикл ШИМ трех векторов **I**, **J** и **K** в вершинах треугольника соответственно (рис. 1). Пара значений (k_i, k_j) , соотнесенных с каждой вершиной, обозначенной как **I**, **J** и **K**, определяет проекции векторов **I**, **J** и **K** в ортогональной системе координат:

$$u_{\alpha IJK} = k_i - 0,5k_j, \quad u_{\beta IJK} = k_j h. \quad (1)$$

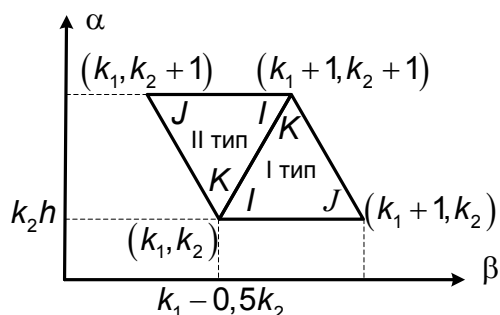


Рис. 1. Обозначение вершин треугольников и расчет их проекций в ортогональной системе координат

Закон коммутации векторной ШИМ устанавливает последовательности переключения определяемых алгоритмом модуляции векторов мгновенного напряжения. В основу синтеза закона коммутации положен принцип симметричного формирования импульсов напряжения относительно точек отсчета, согласно которому полный цикл модуляции составлен из двух полупериодов прямой и обратной последовательностей. В начале и в конце каждого полупериода на равные интервалы времени включаются различные комбинации состояния ключей, соответствующие одному вектору **I**, **J** или **K**. Переключение векторов за цикл ШИМ осуществляется только одной коммутацией.

Для процедуры синтеза алгоритма коммутации ВМПЧ введем следующие понятия:

- «разрешенная» комбинация векторов – группа образующих векторов, выбранных для треугольника Δ_j векторной диаграммы и записанных в оптимальном порядке их коммутации;

- псевдо-нулевой вектор – вектор **I**, **J** или **K** треугольника Δ_j , представляемый минимум двумя комбинациями состояния ключей в записи «разрешенной» комбинации и включаемый в начале и в конце полупериода ШИМ;

- «элементарная» последовательность – последовательность коммутации векторов на полном периоде модуляции, составленная из векторов «разрешенной» комбинации в соответствии с алгоритмом «симметричной» ШИМ и выбранным псевдо-нулевым вектором.

Заметим, что вектора **I**, **J**, **K** в вершинах треугольника определяют не один, а группу от 1 до n векторов, каждый из которых соответствует своей комбинации состояния ключей. Для одного треугольника из множества образующих векторов в его вершинах выбирают потенциально используемые, по которым составляют «разрешенную» комбинацию.

Соотношения относительных длительностей включения векторов **I**, **J**, **K** на периоде ШИМ следующие: $d_i = t_i / T_0$, $d_j = t_j / T_0$, $d_k = t_k / T_0$, где T_0 – период модуляции, определяет условие выбора псевдо-нулевого вектора. Один из векторов **I**, **J** или **K** с наибольшей длительностью включения выступает в качестве псевдо-нулевого вектора. В геометрическом представлении относительные длительности d_i , d_j , d_k вырождаются в длины перпендикуляров, опущенных из вершины заданного вектора \vec{U}_z на противоположные соответствующим вершинам **I**, **J**, **K** боковые грани треугольника (рис. 2), т.е.:

$$h_i = (\sqrt{3}/2)d_i, \quad h_j = (\sqrt{3}/2)d_j, \quad h_k = (\sqrt{3}/2)d_k.$$

Разделение треугольников I и II типа на участки псевдо-нулевых векторов (ПНВ) ПНВ **I**, ПНВ **J**, ПНВ **K** показано на рис. 2. Границы ПНВ в пределах одного треугольника определяют перпендикуляры, проведенные из центра этого треугольника к его боковым граням, что соответствует условию $d_i = d_j = d_k$.

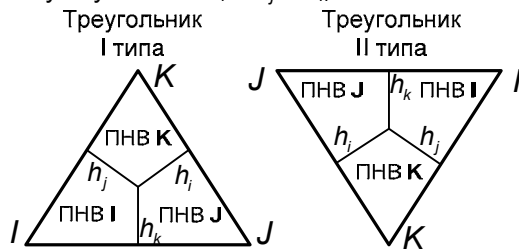


Рис. 2. Участки псевдо-нулевых векторов **I, J, K** в пределах треугольников I и II типа

Все возможные комбинации состояния ключей (s_a , s_b , s_c) векторов **I**, **J** или **K**, для которого определена пара коэффициентов k_i и k_j , вычисляют по вспомогательным параметрам m_2 , m_3 , m_4 и m_5 , значения которых для каскадной структуры преобразователя находят по формулам:

$$\begin{aligned} m_2 &= n - k_i, \\ m_3 &= (n - 1) / 2, \\ m_4 &= k_i - m_3, \\ m_5 &= k_j - m_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где n – число уровней напряжения преобразователя.

Количество комбинаций состояния ключей задает параметр m_2 , а значения параметров m_4 , m_5 и m_3 определяют состояния ключей i -й комбинации по следующим формулам:

$$\begin{aligned} s_a &= m_4 + i - 1, \\ s_b &= m_5 + i - 1, \\ s_c &= -m_3 + i - 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, по заданным коэффициентами k_i и k_j вектору напряжения и номеру комбинации в диапазоне $i = 1, 2, \dots, m_2$ формулы (2) и (3) восстанавливают состояния ключей, соответствующие положению этого вектора в первом секторе диаграммы напряжений. Определив положение заданного вектора \vec{U}_z в секторе S_i , пересчет выбранных комбинаций осуществляют в соответствии с таблицей.

Взаимосвязь состояний ключей по секторам векторной диаграммы

Сектор S_i	Состояние ключей фазы А	Состояние ключей фазы В	Состояние ключей фазы С
S_1	s_a	s_b	s_c
S_2	$-s_b$	$-s_c$	$-s_a$
S_3	s_c	s_a	s_b
S_4	$-s_a$	$-s_b$	$-s_c$
S_5	s_b	s_c	s_a
S_6	$-s_c$	$-s_a$	$-s_b$

Синтез алгоритма коммутации включает в себя процедуру выбора используемых комбинаций состояния ключей для векторов **I**, **J**, **K** треугольника Δ_j , по которым составляют «разрешенную» комбинацию векторов, и процедуру переключения псевдо-нулевых векторов. Совместно они обеспечивают минимизацию коммутационных потерь.

«Разрешенные» комбинации определяют последовательности коммутации векторов, составленные для треугольника так, что каждому вектору соответствует единственная комбинация состояния ключей, порядковый номер которой указывают верхним индексом в обозначении вектора. Таким образом:

- группа векторов $I^{(1)}, I^{(2)}, \dots, I^{(m_{2I})}$ соответствует вектору **I** треугольника;
 - группа векторов $J^{(1)}, J^{(2)}, \dots, J^{(m_{2J})}$ соответствует вектору **J** треугольника;
 - группа векторов $K^{(1)}, K^{(2)}, \dots, K^{(m_{2K})}$ соответствует вектору **K** треугольника,
- где m_{2I} , m_{2J} , m_{2K} – число комбинаций состояния ключей векторов **I**, **J**, **K** соответственно.

Выделить определенный вектор из группы векторов означает указать номер его комбинации состояния ключей в верхнем индексе названия соответствующей группы.

В зависимости от типа треугольника (I и II тип) и четности коэффициента k_i выбирается своя «разрешенная» комбинация векторов:

– для треугольника I типа, если значение k_1 четно:

$$I^{(i)} \Leftrightarrow J^{(i)} \Leftrightarrow K^{(i)} \Leftrightarrow I^{(i+1)} \Leftrightarrow J^{(i+1)} \Leftrightarrow K^{(i+1)} \Leftrightarrow \dots \\ \dots \Leftrightarrow I^{(i+2)};$$

– для треугольника II типа, если значение k_1 четно:

$$K^{(i)} \Leftrightarrow J^{(i)} \Leftrightarrow I^{(i)} \Leftrightarrow K^{(i+1)} \Leftrightarrow J^{(i+1)} \Leftrightarrow I^{(i+1)} \Leftrightarrow \dots \\ \dots \Leftrightarrow K^{(i+2)} \Leftrightarrow J^{(i+2)};$$

– для треугольника I типа, если значение k_1 нечетно:

$$J^{(i)} \Leftrightarrow K^{(i)} \Leftrightarrow I^{(i)} \Leftrightarrow J^{(i+1)} \Leftrightarrow K^{(i+1)} \Leftrightarrow I^{(i+1)} \Leftrightarrow \dots \\ \dots \Leftrightarrow J^{(i+2)} \Leftrightarrow K^{(i+2)};$$

– для треугольника II типа, если значение k_1 нечетно:

$$I^{(i)} \Leftrightarrow K^{(i)} \Leftrightarrow J^{(i)} \Leftrightarrow I^{(i+1)} \Leftrightarrow K^{(i+1)} \Leftrightarrow J^{(i+1)} \Leftrightarrow \dots \\ \dots \Leftrightarrow I^{(i+2)}.$$

Начальный порядковый номер комбинации состояния ключей рассчитывается по следующим формулам:

$$i = \text{int}\left(\frac{n - k_1}{2}\right), \text{ если } k_1 \text{ четно;} \\ i = \text{int}\left(\frac{n - k_1}{2}\right) - 1, \text{ если } k_1 \text{ нечетно,} \quad (4)$$

где $\text{int}()$ – функция выделения целой части.

Так, векторам **I**, **J**, **K** соответствуют 3 используемые комбинации с индексами:

$$i_1 = \text{int}((n - k_i)/2), \quad i_2 = i_1 + 1 \text{ и } i_3 = i_1 + 2,$$

если значение k_i этого вектора четно, либо 2 комбинации с индексами:

$$i_1 = \text{int}((n - k_i)/2) \text{ и } i_2 = i_1 + 1,$$

если значение k_i этого вектора нечетно.

Из числа векторов «разрешенной» комбинации, составленной для треугольника Δ_j , выделяют «элементарную» последовательность коммутации, предварительно рассчитав псевдо-нулевой вектор и его используемые комбинации состояния ключей в начале и в конце полцикла «симметричной» ШИМ. Полный цикл модуляции состоит из двух полциклов – прямой и обратной последовательности, каждая из которых начинается и заканчивается включением псевдо-нулевого вектора.

Рассмотрим пример составления «элементарных» последовательностей из векторов «разрешенной» комбинации для треугольника II типа с четным значением k_1 :

– вектор **I** – псевдо-нулевой вектор:

$$I^{(i_1)} \rightarrow K^{(i_{2K})} \rightarrow J^{(i_{2J})} \rightarrow I^{(i_{2I})} \rightarrow \dots$$

прямая последовательность

$$\dots \rightarrow I^{(i_{2I})} \rightarrow J^{(i_{2J})} \rightarrow K^{(i_{2K})} \rightarrow I^{(i_1)};$$

обратная последовательность

– вектор **J** – псевдо-нулевой вектор:

$$J^{(i_{1J})} \rightarrow I^{(i_{1I})} \rightarrow K^{(i_{2K})} \rightarrow J^{(i_{2J})} \rightarrow \dots$$

прямая последовательность

$$\dots \rightarrow J^{(i_{2J})} \rightarrow K^{(i_{2K})} \rightarrow I^{(i_{1I})} \rightarrow J^{(i_{1J})} \text{ или}$$

обратная последовательность

$$J^{(i_{2J})} \rightarrow I^{(i_{2I})} \rightarrow K^{(i_{3K})} \rightarrow J^{(i_{3J})} \rightarrow \dots$$

прямая последовательность

$$\dots \rightarrow J^{(i_{3J})} \rightarrow K^{(i_{3K})} \rightarrow I^{(i_{2I})} \rightarrow J^{(i_{2J})};$$

обратная последовательность

– вектор **K** – псевдо-нулевой вектор:

$$K^{(i_{1K})} \rightarrow J^{(i_{1J})} \rightarrow I^{(i_{1I})} \rightarrow K^{(i_{2K})} \rightarrow \dots$$

прямая последовательность

$$\dots \rightarrow K^{(i_{2K})} \rightarrow I^{(i_{1I})} \rightarrow J^{(i_{1J})} \rightarrow K^{(i_{1K})} \text{ или}$$

обратная последовательность

$$K^{(i_{2K})} \rightarrow J^{(i_{2J})} \rightarrow I^{(i_{2I})} \rightarrow K^{(i_{3K})} \rightarrow \dots$$

прямая последовательность

$$\dots \rightarrow K^{(i_{3K})} \rightarrow I^{(i_{2I})} \rightarrow J^{(i_{2J})} \rightarrow K^{(i_{2K})},$$

обратная последовательность

где $i_{1I} = \text{int}((n - k_{iI})/2)$, $i_{2I} = i_{1I} + 1$ – номера используемых комбинаций состояния ключей вектора **I**; $i_{1J} = \text{int}((n - k_{iJ})/2)$, $i_{2J} = i_{1J} + 1$, $i_{3J} = i_{1J} + 2$ – номера используемых комбинаций состояния ключей вектора **J**; $i_{1K} = \text{int}((n - k_{iK})/2)$, $i_{2K} = i_{1K} + 1$, $i_{3K} = i_{1K} + 2$ – номера используемых комбинаций состояния ключей вектора **K**; k_{iI}, k_{iJ}, k_{iK} – значения коэффициентов k_i , соответствующих векторам **I**, **J**, **K** в вершинах треугольника Δ_j .

Все «элементарные» последовательности составлены так, чтобы каждая коммутация, обозначаемая символом « \rightarrow », соответствовала переключению только в одном плече одной ячейки преобразователя. Но переход между треугольниками, секторами векторной диаграммы и участками псевдо-нулевых векторов может сопровождаться одновременной коммутацией нескольких ячеек. Такие коммутации, выполняемые в начале цикла ШИМ, всегда устанавливают новый псевдо-нулевой вектор. На рис. 3,а векторная диаграмма n -уровневого инвертора дополнительными линиями, соединяющими центры смежных треугольников, имеющих общую грань, разделена на области ПНВ, при переходе между которыми необходимо «перешагивать» на новый псевдо-нулевой вектор и составлять соответствующие ему последовательности коммутаций.

Заметим, что траектория движения вектора напряжения внутри границ образованного шестиугольника, площадь которого выделена пунктирными линиями (рис. 3,а), задает единственный псевдо-нулевой вектор, выбранные

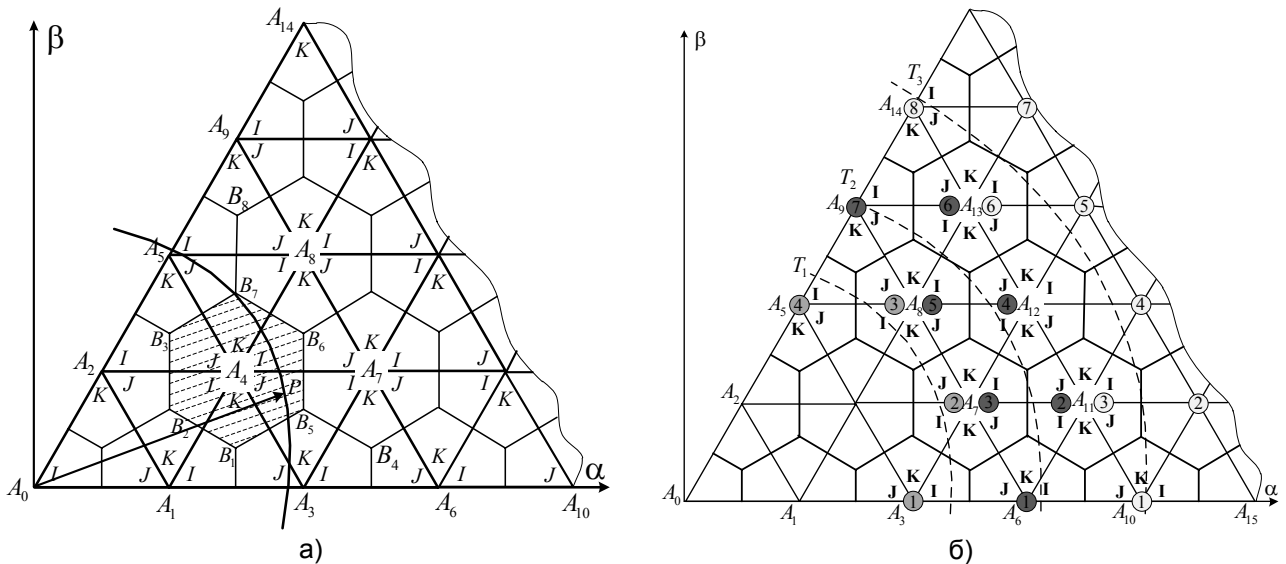


Рис. 3. Диаграмма напряжений многоуровневого инвертора в 1-м секторе: а – характерные области, определяющие ПНВ; б – последовательность пересечения границ областей ПНВ различных траекторий движения заданного вектора

комбинации состояния ключей которого не меняются. Изменяется только буквенное обозначение этого вектора. При этом коммутации в начале цикла модуляции отсутствуют. Момент пересечения границ таких шестигранников сопровождается переключением псевдо-нулевого вектора и, следовательно, коммутациями в начале цикла ШИМ. При движении вершины вектора $\overline{A_0P}$ внутри площади заштрихованного шестигранника $B_1B_2B_3B_7B_6B_5$ (рис. 3,а) алгоритм коммутации составляет аналогию «симметричной» ШИМ двухуровневого инвертора, диаграмма напряжений которого представлена шестигранником $A_1A_2A_5A_8A_7A_3$. Вектор $\overline{A_0A_4}$ является псевдо-нулевым вектором в каждом секторе шестигранника $B_1B_2B_3B_7B_6B_5$ и, в зависимости от положения вектора $\overline{A_0P}$ в этом шестиграннике, меняет только буквенное обозначение I, J или K.

Последовательность пересечения границ областей ПНВ для трех различных траекторий T_1 , T_2 , и T_3 , описывающих движение вершины заданного вектора, показана на рис. 3,б и обозначена цифрами в центре соответствующих шестигранников. Для траектории T_1 приведем последовательность переключения ПНВ:

$$A_0A_3 \rightarrow A_0A_7 \rightarrow A_0A_8 \rightarrow A_0A_5.$$

Таким образом, расчет в реальном времени синтезированного алгоритма коммутаций многоуровневого каскадного преобразователя включает в себя следующие процедуры:

1. Расчет потенциально используемых комбинаций состояния ключей для векторов I, J, K треугольника Δ_j по коэффициентам k_1 и k_2 этого треугольника.

2. Составление «разрешенной» комбинации векторов по используемым расчетным комбинациям состояния ключей.

3. Определение псевдо-нулевого вектора I, J или K.

4. Составление «элементарной» последовательности коммутации векторов за цикл модуляции из числа векторов «разрешенной» комбинации.

5. Выбор комбинации состояния ключей псевдо-нулевого вектора, включаемой в начале цикла ШИМ, по условию минимизации суммарного числа коммутаций по всем фазам.

Алгоритмы модуляции и коммутации векторной ШИМ каскадного многоуровневого преобразователя устанавливают последовательности коммутации векторов напряжения, длительности их включения на периоде ШИМ и соответствующие каждому вектору комбинации состояния ключей. Состояния ключей s_a , s_b , s_c , в общем случае, задают дискретные уровни фазного напряжения преобразователя, определяя только сумму состояний всех ячеек в соответствующей фазе. Состояние же каждой ячейки однозначно не определено, и его необходимо вычислять, составляя дополнительные условия выбора коммутируемых ячеек. Одним из таких условий является требование равномерного распределения коммутаций по ячейкам в фазе. Идентификация состояния отдельной ячейки зависит также от последовательности предыдущих состояний этой ячейки. Разработанный алгоритм распределения коммутаций векторной ШИМ выполняет поиск коммутируемой ячейки по следующим условиям:

- ненулевые состояния ячеек (+1 или -1) в фазе преобразователя должны быть одного знака;
- чередование нулевых (0^+ и 0^-) и ненулевых (+1 и -1) состояний одной ячейки;
- среди потенциальных ячеек, отобранных в каждой фазе преобразователя, большим приоритетом коммутации обладает ячейка с

меньшим количеством выполненных ранее коммутаций.

По комбинациям состояния ключей каждого вектора, включаемого за цикл ШИМ, алгоритм распределения коммутаций формирует управление по всем ячейкам, определяя индексы коммутируемых ячеек и их состояния после коммутации. Центральное место в алгоритме распределения коммутаций, блок-схема которого показана на рис. 4, занимает процедура поиска коммутируемых ячеек, выполняемая по изложенным выше условиям для каждой фазы в отдельности. Поиск коммутируемых ячеек и моделирование их коммутаций выполняет виртуальная модель преобразователя в реальном времени. Виртуальная модель – один из основных элементов структуры векторного алгоритма ШИМ, выполняющий контроль состояний и коммутаций ячеек реального преобразователя. Используемые в расчетах переменные s_{a_mod} , s_{b_mod} , s_{c_mod} показывают текущее состояние ключей виртуального каскадного преобразователя.

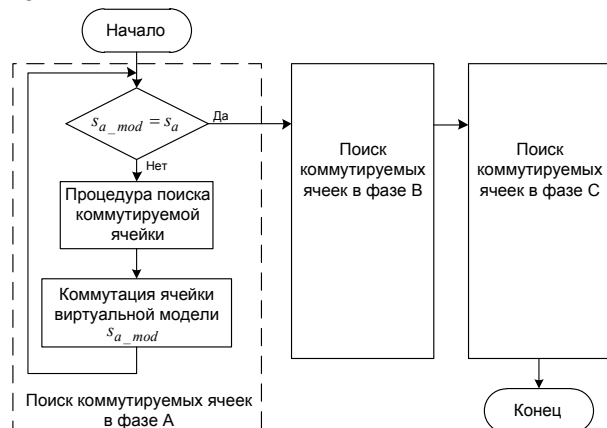


Рис. 4. Алгоритм распределения коммутаций по ячейкам для векторного формирования ШИМ

Исследование разработанного алгоритма векторного формирования ШИМ выполнено на компьютерной модели ВЧРП, составленной в среде программирования Delphi7 и включающей в себя: структуру 17-уровневого каскадного ВМПЧ с высоковольтным асинхронным двигателем (АД) типа АОД-1000-6ДУ1 номинальной мощностью 1 МВт; систему частотного управления по закону $u/f = \text{const}$ и модулятор с разработанными алгоритмами векторной ШИМ. Модельный расчет энергетических характеристик ВЧРП с предлагаемым алгоритмом векторного формирования ШИМ показал снижение суммарных потерь мощности в преобразователе на 43–46 % по сравнению с традиционным алгоритмом синусоидальной ШИМ [4].

Полученные в результате моделирования диаграммы линейного напряжения U_{AB} на выходе ВМПЧ и фазного тока I_A статора АД приведены на рис. 5, 6 в режимах работы ВЧРП с частотой 20 и 50 Гц на холостом ходу.

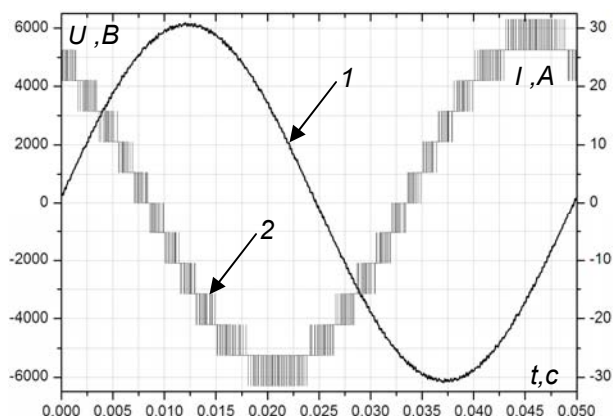


Рис. 5. Диаграммы фазного тока АД (1) и линейного напряжения (2) в режиме работы ВЧРП с частотой 20 Гц

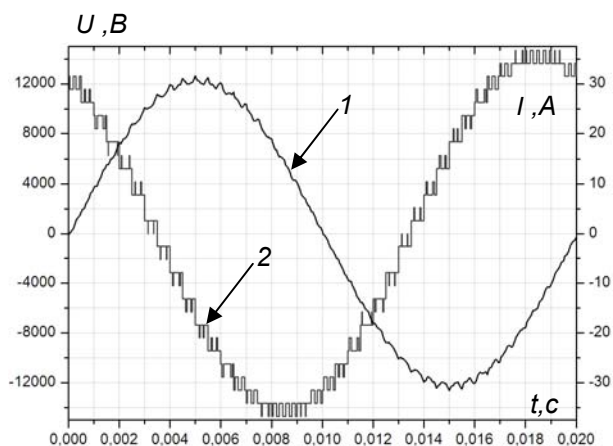


Рис. 6. Диаграммы фазного тока АД (1) и линейного напряжения (2) в режиме работы ВЧРП с частотой 50 Гц

Разработанный алгоритм векторной ШИМ прошел экспериментальную апробацию на макетном образце ВМПЧ и показал хорошую сходимость с результатами расчетов и моделирования.

Список литературы

1. Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных схем // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32). – С. 30–36.
2. Изосимов Д.Б., Рывкин С.Е., Шевцов С.В. Симплексные алгоритмы управления трехфазным автономным инвертором напряжения с ШИМ // Электротехника. – 1993. – № 12. – С. 14–20.
3. Gupta A.K., Khambadkone A.M. A General Space Vector PWM Algorithm for Multilevel Inverters Including Operation in Overmodulation Range // IEEE Transactions on Power Electronics. – March, 2007. – Vol. 22. – No. 2. – P. 517–526.
4. Сравнительный анализ энергетических показателей алгоритмов управления высоковольтным многоуровневым преобразователем / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, А.А. Коротков, Д.А. Монов // Труды VII Международ. (XVIII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012). – Иваново, 2012. – С.109–113.

References

1. Lazarev, G.B. Vysokovol'tnyye preobrazovateli dlya chastotno-reguliruемого электропривода. Postroenie razlichnykh

skhem [High-voltage converters for variable-frequency drives. Development of different scheme]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, issue 2, pp. 30–36.

2. Izosimov, D.B., Rvkin, S.E., Shevtsov, S.V. Simpleksnye algoritmy upravleniya trekhfaznym avtonomnym invertorom napryazheniya s ShIM [Simplex algorithms of 3-phase autonomous voltage inverter control with PWM]. *Elektrotehnika*, 1993, no. 12, pp. 14–20.

3. Gupta, A.K., Khambadkone, A.M. A General Space Vector PWM Algorithm for Multilevel Inverters Including Opera-

tion in Overmodulation Range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 517–526.

4. Vinogradov, A.B., Sibirtsev, A.N., Korotkov, A.A., Monov, D.A. Sravnitel'nyy analiz energeticheskikh pokazateley algoritmov upravleniya vysokovol'tnym mnogourovnevym preobrazovatelem [Comparative Analysis of Energy Efficiency of High Voltage Source PWM Converter Control Algorithms]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2012)* [Proceedings of the VIIth International (XVIIIth All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive]. Ivanovo, 2012, pp.109–113.

Коротков Александр Александрович,
НТЦ Электропривода «Вектор»,
инженер-программист,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru

Виноградов Анатолий Брониславович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры ЭП и АПУ, научный руководитель НТЦ Электропривода «Вектор»,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru