

## Функции компенсации небаланса и шунтирования ячеек алгоритма векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Для векторной стратегии ШИМ многоуровневого каскадного преобразователя вопросы компенсации рассогласования (небаланса) напряжений ячеек и шунтирования аварийных ячеек в процессе работы изучены недостаточно. Разработка и практическая реализация способов компенсации небаланса в реальном времени и поддержка функции шунтирования аварийных ячеек без прерывания работы позволят повысить качество регулирования выходных процессов и надежность эксплуатации высоковольтного привода.

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

**Результаты:** Для векторной ШИМ каскадного преобразователя предложены алгоритм компенсации небаланса напряжений ячеек и методика самонастройки на текущую конфигурацию преобразователя при шунтировании аварийных ячеек. Приведены результаты модельных расчетов каскадного преобразователя с базовой векторной ШИМ, дополненной модулями компенсации небаланса и шунтирования ячеек.

**Выводы:** Компьютерное моделирование 17-уровневого каскадного преобразователя с модулятором векторной ШИМ и компенсацией небаланса напряжений ячеек показывает снижение среднеквадратичных значений ошибок формирования выходного напряжения по модулю и по фазе на 70–80 % при заданном распределении постоянных напряжений по ячейкам. Модуль шунтирования ячеек векторного алгоритма ШИМ, по сравнению с известным способом шунтирования ячеек синусоидальной ШИМ, обеспечивает отключение только вышедших из строя ячеек и выигрыш по напряжению на 6,25 % при некоторых комбинациях шунтирования.

**Ключевые слова:** каскадный преобразователь, векторное формирование ШИМ, небаланс напряжений ячеек, шунтирование ячеек.

## Unbalance Voltage Compensation and Cell Shunting Functions of Space Vector PWM Algorithm for High-Voltage Converters

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

### Abstract

**Background:** The problems of cell voltage unbalance compensation and on-stream emergency cell shunting of Cascade Voltage Source Converters (VSC) with Space Vector PWM (SVPWM) control strategy are not studied well. The development and practical application of real-time unbalance compensation methods and on-the-go emergency cell shunting functions, supplementing the suggested basic SVPWM algorithm, improve the output control quality and high-voltage drive reliability.

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

**Results:** An algorithm of cell voltage unbalance compensation and a technique of auto-adjustment to the current VSC configuration (during emergency cell shunting) for the Cascade Voltage Source Converters (VSC) with Space Vector PWM have been developed. The paper represents the results of model simulation of cascade VSC with a basic SVPWM extended by unbalance voltage compensation and cell shunting modules.

**Conclusions:** Computer simulation of a 17-level Cascade VSC with a SVPWM modulator and an unbalance voltage compensation module has shown that RMS errors of output voltage magnitude and phase decrease by 70–80 % when the constant cell voltage distribution is given. The cell shunting module of SVPWM algorithm, in comparison with the conventional cell shunting method of Sinusoidal PWM, makes it possible to disconnect only out-of-work cells and to get a voltage advantage of 6,25 % in certain shunting combinations.

**Key words:** Cascade Converter, Space Vector Pulse-Width Modulation, Cell Voltage Unbalance, Cell Shunting.

Повышение эффективности управления мощным высоковольтным электроприводом (ВЭП) является актуальной задачей и заключается в минимизации потерь преобразования электроэнергии (энергосбережение), повыше-

нии качества регулирования и надежности эксплуатации привода. В этих целях нами разработаны новый энергоэффективный алгоритм векторного формирования ШИМ каскадного преобразователя частоты [1] и методика поиска

оптимальной частоты модуляции [2], обеспечивающие минимум коммутационных потерь при допустимом уровне несинусоидальных искажений выходного напряжения.

На основе разработанной базовой структуры векторного алгоритма ШИМ в целях повышения эффективности управления ВЭП предлагаются вспомогательные функции адаптации, предусматривающие возможность настройки на текущие параметры структуры преобразователя в процессе работы (при шунтировании аварийных ячеек), а также компенсации рассогласования реальных напряжений в звене ячеек. Поддержка этих функций в дополнение к базовой расчетной части алгоритма векторной ШИМ определяет надежность эксплуатации и качество регулирования выходных процессов.

*Небалансом напряжений* многоуровневой каскадной топологии преобразователя называется отклонение напряжений на конденсаторах в звене ячеек  $U_{dxi}$ , составляющих выходное напряжение, от некоторого среднего значения. Векторный алгоритм ШИМ, выбирая вектора и определяя длительности их включения, изначально предполагает равенство напряжений всех ячеек и использует только общее среднее напряжение по всем ячейкам  $U_d$ . Поэтому рассогласование напряжений ячеек приводит к амплитудной и фазовой ошибке формирования выходного вектора напряжения.

Сложность компенсации небаланса для векторной стратегии ШИМ заключается в том, что все алгоритмы компенсации должны быть реализованы на стороне центрального контроллера (ЦК). Для повышения точности компенсации ЦК должен оперировать максимально достоверной информацией о напряжениях всех ячеек. Но даже если организовать передачу напряжений всех ячеек в каждом цикле расчета управления, на момент реализации выходного напряжения компенсация не будет соответствовать фактическим напряжениям ячеек.

Структурная схема цифровой реализации алгоритма векторного формирования ШИМ с модулем компенсации небаланса показана на рис. 1. Базовая структура векторного алгоритма ШИМ выполняет ограничение модуля напряжения задания по среднему напряжению  $U_d$ , вычисленному по показаниям датчиков напряжения в звене ячеек, определяет треугольник векторной диаграммы, которому соответствует вектор  $\vec{U}_z$ , вычисляет оптимальную последовательность коммутации образующих векторов напряжений и соответствующие им длительности включения на периоде ШИМ. Информация с датчиков напряжения в звене ячеек поступает в блок обработки сигналов и используется процедурой компенсации, реализованной в блоке компенсации небаланса напряжений ячеек. В каждом цикле расчета ЦК получает данные с датчиков напряжения ячеек и пересчитывает  $U_d$ .

Предлагаемый алгоритм компенсации небаланса заключается в «косвенной» коррекции эквивалентного вектора выходного напряжения преобразователя в целях минимизации искажений по амплитуде и угловому положению. Алгоритм компенсации на основе установленной последовательности коммутации векторов и полученной информации о напряжении в звене коммутируемых за период ШИМ ячеек определяет требуемое допустимое смещение моментов коммутации (моментов включения векторов) относительно рассчитанных базовым векторным алгоритмом ШИМ.

Таким образом, базовая часть векторного алгоритма ШИМ рассчитывает относительные длительности включения трех образующих векторов  $d_0, d_1, d_2$ , принимая равными  $U_d$  напряжения всех ячеек, а алгоритм компенсации смещает моменты коммутации, компенсируя отклонения вектора выходного напряжения от заданного  $\vec{U}_z$  так, чтобы выполнялись следующие соотношения:

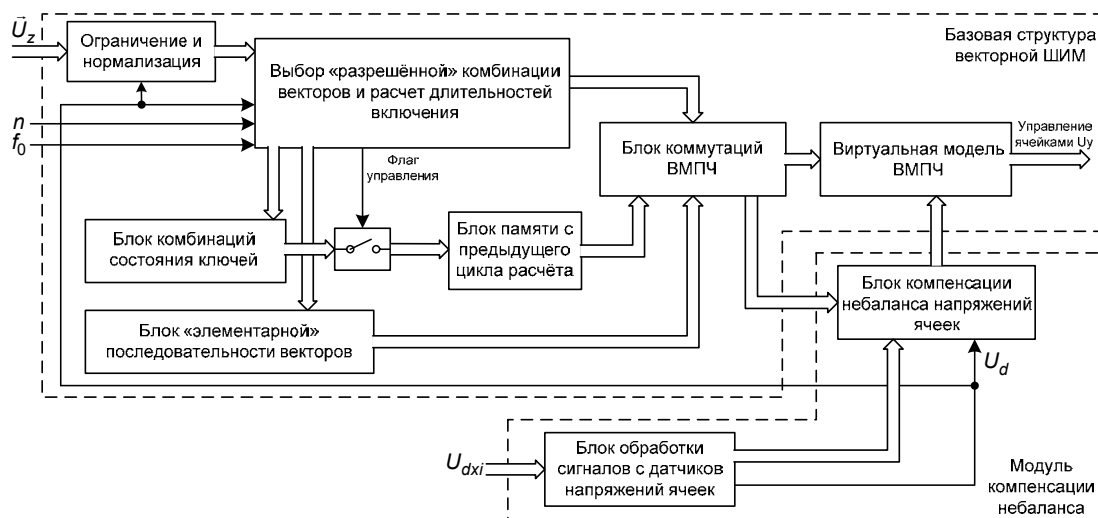


Рис. 1. Структурная схема модулятора с векторным алгоритмом ШИМ и модулем компенсации небаланса напряжений ячеек

$$\begin{aligned} d'_0 &= d_0 + \Delta d_0 \geq 0; \\ d'_1 &= d_1 + \Delta d_1 \geq 0; \\ d'_2 &= d_2 + \Delta d_2 \geq 0; \\ d'_0 + d'_1 + d'_2 &= 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta d_0, \Delta d_1, \Delta d_2$  – компенсационная составляющая относительных длительностей включения векторов;  $d'_0, d'_1, d'_2$  – относительные длительности включения векторов после компенсации.

На рис. 2 показан пример возможного смещения проекций векторов, составляющих «элементарную» прямую последовательность коммутаций  $\vec{V}_0 \rightarrow \vec{V}_1 \rightarrow \vec{V}_2 \rightarrow \vec{V}_0$ , где вектор  $I$  выбран псевдо-нулевым вектором (ПНВ) для треугольника  $I$  типа [1].

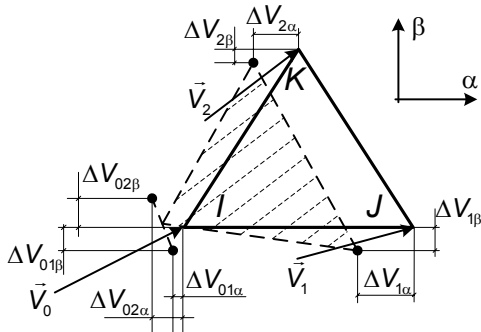


Рис. 2. Искажение формы на примере треугольника  $I$  типа векторной диаграммы ВПЧ при небалансе напряжений ячеек

Заштрихованная область на рис. 2 показывает возможное искажение формы равностороннего треугольника  $I$  типа векторной диаграммы, обусловленное отклонением проекций векторов, определяемых фактическими напряжениями ненулевых ячеек. Определим понятие *ненулевой ячейки* как ячейки, принимающей состояние  $+1$  или  $-1$ . Звено ячеек с состоянием  $0^+$  или  $0^-$  считается отключенным, т.е. исключено из цепи протекания фазного тока, и такую ячейку будем называть *нулевой ячейкой*.

Смещение положения образующих векторов напряжения  $\vec{V}_0, \vec{V}_1, \vec{V}_2$  в системе координат  $(\alpha, \beta)$  при небалансе напряжений ненулевых ячеек относительно идеального равностороннего треугольника рассчитывают по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \Delta V_\alpha &= \frac{2}{3} s_a (U_{dc}^A - U_d) - \frac{1}{3} s_b (U_{dc}^B - U_d) - \dots \\ &\dots - \frac{1}{3} s_c (U_{dc}^C - U_d); \\ \Delta V_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} s_b (U_{dc}^B - U_d) - \frac{1}{\sqrt{3}} s_c (U_{dc}^C - U_d), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_{dc}^A, U_{dc}^B, U_{dc}^C$  – средние напряжения всех ненулевых ячеек в фазах  $A, B, C$  соответственно;  $s_a, s_b, s_c$  – состояния ключей вектора напряжения, для которого вычисляют смещение.

Формулы вычисления среднего напряжения ненулевых ячеек имеют вид

$$\begin{aligned} U_{dc}^A &= \frac{\sum_{i=1}^p U_{dai} S_{Hai}}{s_a}, \quad U_{dc}^B = \frac{\sum_{i=1}^p U_{dbi} S_{Hbi}}{s_b}, \\ U_{dc}^C &= \frac{\sum_{i=1}^p U_{dci} S_{Hci}}{s_c}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_{Hai}, S_{Hbi}, S_{Hci}$  – состояние  $i$ -й ячейки в фазах  $A, B, C$  соответственно.

Анализ формул (2), (3) показывает, что искажение формы одного и того же треугольника векторной диаграммы зависит не только от величины рассогласования напряжений ячеек, выбираемых алгоритмом распределения коммутаций, но и от выбора ПНВ.

Найдем значения компенсационной составляющей относительных длительностей включения, удовлетворяющих условию (1). Запишем две системы уравнений: первая – для идеального случая, когда напряжения всех ячеек равны  $U_d$ ; вторая – учитывает реальный небаланс напряжений и наличие смещений проекций:

$$\begin{cases} V_{0\alpha} d_0 + V_{1\alpha} d_1 + V_{2\alpha} d_2 = V_{z\alpha}, \\ V_{0\beta} d_0 + V_{1\beta} d_1 + V_{2\beta} d_2 = V_{z\beta}, \\ d_0 + d_1 + d_2 = 1; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} (V_{0\alpha} + \Delta V_{01\alpha}) \frac{d'_0}{2} + (V_{1\alpha} + \Delta V_{1\alpha}) d'_1 + \dots \\ \dots + (V_{2\alpha} + \Delta V_{2\alpha}) d'_2 + (V_{0\alpha} + \Delta V_{02\alpha}) \frac{d'_0}{2} = V_{z\alpha}, \\ (V_{0\beta} + \Delta V_{01\beta}) \frac{d'_0}{2} + (V_{1\beta} + \Delta V_{1\beta}) d'_1 + \dots \\ \dots + (V_{2\beta} + \Delta V_{2\beta}) d'_2 + (V_{0\beta} + \Delta V_{02\beta}) \frac{d'_0}{2} = V_{z\beta}, \\ d'_0 + d'_1 + d'_2 = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где  $V_{z\alpha}, V_{z\beta}$  – проекции вектора заданного напряжения.

Совместное решение (4) и (5) с учетом условий (1) дает следующее упрощенное решение для величины компенсации относительной длительности включения:

$$\begin{aligned} \Delta d_1 &= \frac{\Delta V_{r\alpha} (V_{2\beta} - V_{0\beta}) - \Delta V_{r\beta} (V_{2\alpha} - V_{0\alpha})}{(V_{2\beta} - V_{0\beta})(V_{1\alpha} - V_{0\alpha}) - (V_{2\alpha} - V_{0\alpha})(V_{1\beta} - V_{0\beta})}; \\ \Delta d_2 &= \frac{\Delta V_{r\beta} (V_{1\alpha} - V_{0\alpha}) - \Delta V_{r\alpha} (V_{1\beta} - V_{0\beta})}{(V_{2\beta} - V_{0\beta})(V_{1\alpha} - V_{0\alpha}) - (V_{2\alpha} - V_{0\alpha})(V_{1\beta} - V_{0\beta})}; \\ \Delta d_0 &= -\Delta d_1 - \Delta d_2, \end{aligned}$$

где

$$\Delta V_{r\alpha} = \left( -\frac{d_0}{2} (\Delta V_{01\alpha} + \Delta V_{02\alpha}) - \Delta V_{1\alpha} d_1 - \Delta V_{2\alpha} d_2 \right) \frac{3}{2U_d};$$

$$\Delta V_{r\beta} = \left( -\frac{d_0}{2} (\Delta V_{01\beta} + \Delta V_{02\beta}) - \Delta V_{1\beta} d_1 - \Delta V_{2\beta} d_2 \right) \frac{3}{2U_d}.$$

Подстановка проекций образующих векторов  $\vec{V}_0, \vec{V}_1, \vec{V}_2$  в первом секторе векторной диаграммы определяет расчетные формулы компенсации относительной длительности векторов **I, J, K** треугольников I и II типов. В секторах II–VI расчетные формулы аналогичны, а их соответствие формулам в I секторе представлено в таблице.

**Формулы компенсации относительной длительности включения**

Сектор	Формулы для треугольника I типа	Формулы для треугольника II типа
I	$\Delta d_I^I = -V_{r\alpha} - \frac{V_{r\beta}}{\sqrt{3}}$ $\Delta d_J^I = V_{r\alpha} - \frac{V_{r\beta}}{\sqrt{3}}$ $\Delta d_K^I = \frac{2V_{r\beta}}{\sqrt{3}}$	$\Delta d_I^{II} = V_{r\alpha} + \frac{V_{r\beta}}{\sqrt{3}}$ $\Delta d_J^{II} = -V_{r\alpha} + \frac{V_{r\beta}}{\sqrt{3}}$ $\Delta d_K^{II} = -\frac{2V_{r\beta}}{\sqrt{3}}$
II	$\Delta d_I = \Delta d_K^{II}$ $\Delta d_J = \Delta d_I^{II}$ $\Delta d_K = \Delta d_J^{II}$	$\Delta d_I = \Delta d_K^I$ $\Delta d_J = \Delta d_J^I$ $\Delta d_K = \Delta d_J^I$
III	$\Delta d_I = \Delta d_J^I$ $\Delta d_J = \Delta d_K^I$ $\Delta d_K = \Delta d_I^I$	$\Delta d_I = \Delta d_I^{II}$ $\Delta d_J = \Delta d_K^{II}$ $\Delta d_K = \Delta d_I^{II}$
IV	$\Delta d_I = \Delta d_I^{II}$ $\Delta d_J = \Delta d_J^{II}$ $\Delta d_K = \Delta d_K^{II}$	$\Delta d_I = \Delta d_I^I$ $\Delta d_J = \Delta d_J^I$ $\Delta d_K = \Delta d_K^I$
V	$\Delta d_I = \Delta d_K^I$ $\Delta d_J = \Delta d_J^I$ $\Delta d_K = \Delta d_J^I$	$\Delta d_I = \Delta d_K^{II}$ $\Delta d_J = \Delta d_I^{II}$ $\Delta d_K = \Delta d_J^{II}$
VI	$\Delta d_I = \Delta d_J^{II}$ $\Delta d_J = \Delta d_K^{II}$ $\Delta d_K = \Delta d_I^{II}$	$\Delta d_I = \Delta d_I^I$ $\Delta d_J = \Delta d_J^I$ $\Delta d_K = \Delta d_K^I$

Функция компенсации небаланса напряжений ячеек включает:

1) обработку и сохранение текущих показаний датчиков напряжений в звене ячеек; расчет средних напряжений  $U_d$  и  $U_{dc}^A, U_{dc}^B, U_{dc}^C$ ;

2) определение смещений для векторов последовательности коммутации за цикл ШИМ по формулам (2);

3) расчет величины смещения моментов коммутаций  $\Delta d_I, \Delta d_J, \Delta d_K$  в заданном секторе по таблице и значениям проекций  $\Delta V_{r\alpha}, \Delta V_{r\beta}$ ;

4) определение относительных длительностей  $d_0', d_1', d_2'$  и проверка выполнения условий (1).

Режим ограничения компенсации возникает, когда относительные времена включения образующих векторов  $d_0', d_1', d_2'$  после компенсации принимают недопустимые значения, т.е.

заданный вектор напряжения, лежащий в определенном треугольнике векторной диаграммы, выходит за грани этого треугольника при его «деформации» по причине небаланса напряжений ячеек. Коррекция в режиме ограничения компенсации предполагает введение оптимальной поправки в положение вектора заданного напряжения  $\vec{U}_z$  так, чтобы обеспечить его реализацию в заданной области векторной диаграммы.

Геометрическая интерпретация предлагаемого решения заключается в опускании перпендикуляра из вершины вектора  $\vec{U}_z$  на ближайшую грань треугольника. Точка пересечения с этой гранью и является вершиной скорректированного реализуемого вектора  $\vec{U}_z'$ . Принцип работы алгоритма в режиме ограничения компенсации поясняет рис. 3.

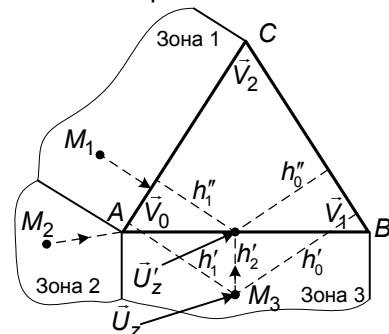


Рис. 3. Коррекция положения заданного вектора для треугольника I типа

На рис. 3 на примере треугольника I типа с псевдо-нулевым вектором  $\vec{V}_0$  после компенсации длительностей включения образующих векторов выделены характерные зоны расположения вектора  $\vec{U}_z$  вне области реализуемых напряжений  $\Delta ABC$ . Коррекция вектора определяется его положением в одной из выделенных зон. Формулы коррекции имеют следующий вид:

- в зоне 3 (точка  $M_3$ )

$$d_2'' = 0,$$

$$d_0'' = d_0' - 0,5d_2',$$

$$d_1'' = 1 - d_0''; \tag{6}$$

- в зоне 1 (точка  $M_1$ )

$$d_1'' = 0,$$

$$d_0'' = d_0' - 0,5d_1',$$

$$d_2'' = 1 - d_0''; \tag{7}$$

- в зоне 2 (точка  $M_2$ )

$$d_1'' = 0,$$

$$d_2'' = 0,$$

$$d_0'' = 1, \tag{8}$$

где  $d_0'', d_1'', d_2''$  – относительные длительности включения после коррекции.

Поддерживаемая алгоритмом управления функция *шунтирования ячеек* обеспечивает

возможность вывода неисправной ячейки из работы без отключения преобразователя и прерывания технологического процесса. Алгоритм ШИМ в рабочем режиме должен успевать воспринимать информацию отключения какой-либо ячейки, пересчитывать необходимые параметры и перестраиваться в новой конфигурации системы.

Согласно известному алгоритму шунтирования ячеек [3] синусоидальной ШИМ, отключение, например, одной ячейки в одной из фаз преобразователя приводит к дополнительному отключению по одной ячейке в двух других фазах и снижению предельного выходного напряжения с коэффициентом  $\frac{n_1 - 1}{n - 1}$  (при постоянном напряжении  $U_d$ ), где  $n_1$  – число уровней преобразователя в новой конфигурации с учетом шунтированных ячеек. Таким образом, отключение по одной ячейке в каждой фазе ( $n_1 = 15$ ) 17-уровневого каскадного преобразователя снижает предельное выходное напряжение на 12,5 %. Шунтирование двух ячеек ( $n_1 = 13$ ) в каждой фазе – на 25 % и т.д.

Предлагаемый векторный алгоритм ШИМ с возможностью шунтирования ячеек реализован так, что без принудительного отключения рабочих ячеек максимальное напряжение ограничивается предельным вектором вписанной окружности диаграммы напряжений. Алгоритм шунтирования ячеек рассмотрим на примере следующих вариантов:

- а) шунтирование одной ячейки в фазе А;
- б) шунтирование по одной ячейке в фазах А и В;
- в) шунтирование двух ячеек в фазе А и одной в фазе В;
- г) шунтирование по две ячейки в фазах А и В.

В каждом варианте шунтирования отключаются только аварийные ячейки, т.е. количество ячеек готовых к работе –  $p_a, p_b, p_c$ , в общем случае, различается по фазам и составляет:

- а)  $p_a = 7, p_b = 8, p_c = 8$  при шунтировании одной ячейки в фазе А;
- б)  $p_a = 7, p_b = 7, p_c = 8$  при шунтировании по одной ячейке в фазах А и В;
- в)  $p_a = 6, p_b = 7, p_c = 8$  при шунтировании двух ячеек в фазе А и одной в фазе В;
- г)  $p_a = 6, p_b = 6, p_c = 8$  при шунтировании по две ячейки в фазах А и В.

Блок-схема алгоритма векторной ШИМ с блоком шунтирования ячеек и блоком обработки сигналов с датчиков напряжения показана на рис. 4. Блок базовой структуры векторного алгоритма ШИМ, формирующий сигналы управления ячейками по заданному вектору напряжения  $\vec{U}_z$ , представлен на рис. 1. Флаги срабатывания защит ячеек, устанавливаемые контроллерами ячеек, поступают в блок шунтирования, который подсчитывает количество отключенных ячеек в каждой фазе и соответ-

ствующее новой конфигурации число уровней  $n^*$  по формуле

$$n^* = p_{\min} + p_{\text{mid}} + 1, \quad (9)$$

где  $p_{\min}, p_{\text{mid}}, p_{\max}$  – минимальное, среднее и максимальное количество готовых к работе ячеек в фазах преобразователя, причем  $p_{\min} \leq p_{\text{mid}} \leq p_{\max}$ .

Блок шунтирования ячеек определяет и передает состояния флагов шунтирования и число уровней новой конфигурации в блок базовой структуры векторной ШИМ. Параметр  $n^*$  (вместо параметра  $n$ ) введен для унификации ШИМ алгоритма – задания переменного в рабочем режиме числа уровней.

Для рассматриваемых вариантов шунтирования ячеек 17-уровневого преобразователя рассчитаем значения числа уровней  $n^*$  по формуле (9):

- а)  $p_{\min} = 7, p_{\text{mid}} = 8, p_{\max} = 8$ , число уровней  $n^* = 16$ ;
- б)  $p_{\min} = 7, p_{\text{mid}} = 7, p_{\max} = 8$ , число уровней  $n^* = 15$ ;
- в)  $p_{\min} = 6, p_{\text{mid}} = 7, p_{\max} = 8$ , число уровней  $n^* = 14$ ;
- г)  $p_{\min} = 6, p_{\text{mid}} = 6, p_{\max} = 8$ , число уровней  $n^* = 13$ .

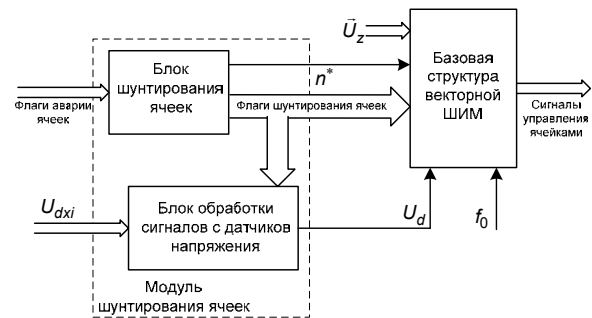


Рис. 4. Структурная схема модулятора с векторным алгоритмом ШИМ и модулем шунтирования ячеек

Значение числа уровней  $n^*$  в блоке базовой структуры векторной ШИМ используется для расчета длительностей включения векторов и выбора соответствующих комбинаций состояния ключей. Флаги шунтирования ячеек управляют конфигурацией виртуальной модели преобразователя, устанавливая состояние шунтирования ячейки. Блок виртуальной модели в структуре базового алгоритма векторной ШИМ распределяет коммутации в фазе преобразователя равномерно по всем готовым к работе ячейкам (шунтированные ячейки игнорируются).

Исследование функций компенсации небаланса и шунтирования ячеек, интегрированных в структуру разработанного алгоритма векторного формирования ШИМ, выполнено на компьютерной модели высоковольтного привода, составленной в среде программирования Delphi7 и включающей в себя:

– модель структуры 17-уровневого каскадного преобразователя с высоковольтным асинхронным двигателем (АД) типа АОД-1000-6ДУ1 номинальной мощностью 1МВт;

– систему частотного управления по закону  $u/f = \text{const}$  и модулятор векторной ШИМ с разработанными алгоритмами компенсации небаланса и шунтирования ячеек.

Зависимости на рис. 5, 6 показывают, что алгоритм компенсации небаланса дает эффект снижения действующих значений отклонения модуля и углового положения вектора выходного напряжения на 70–80 % в диапазоне основной гармоники 10–100 Гц.

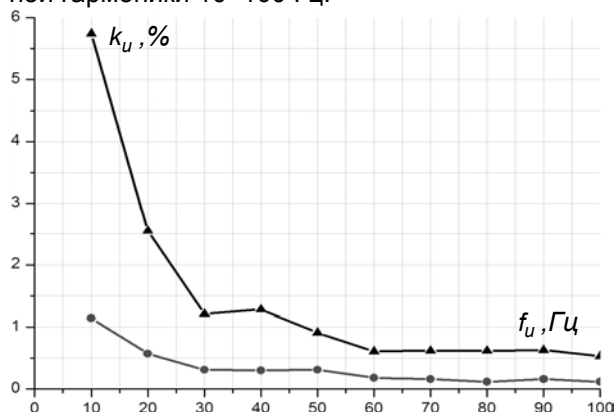


Рис. 5. Зависимость коэффициента искажения выходного напряжения по модулю от частоты основной гармоники

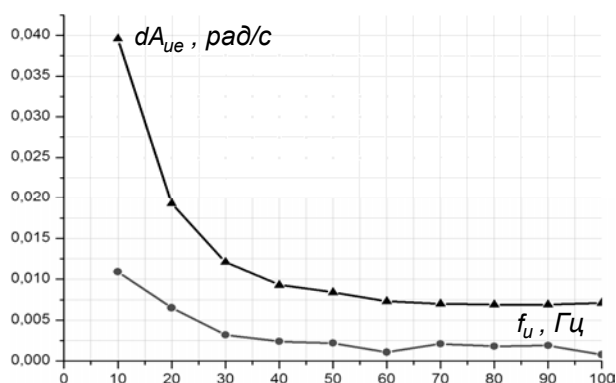


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичной ошибки углового положения выходного напряжения от частоты основной гармоники

В случае шунтирования одной ячейки в фазе А (комбинация а), выходное напряжение в этой фазе (рис. 7) ограничено уровнями +7 (положительная полуволна) и -7 (отрицательная полуволна), т.е.  $s_a = -7...+7$ . Такое ограничение обусловлено количеством включенных (не шунтированных) ячеек в фазе А. В фазах В и С – все ячейки в состоянии готовности к работе, т.е.:  $s_b = -8...+8$  и  $s_c = -8...+8$ .

В случае шунтирования по одной ячейке в фазах А и В (комбинация б) на рис. 8), выходное напряжение во всех трех фазах ограничивается следующими уровнями:

$$s_{a,b,c} = -7...+7.$$

Такая комбинация эквивалентна шунтированию по одной ячейке во всех трех фазах с тем отличием, что коммутации в фазе С распределяются равномерно по всем 8 ячейкам, находящимся в состоянии готовности к работе.

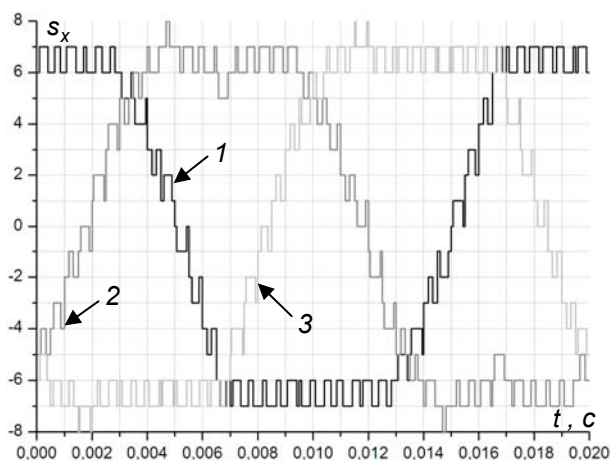


Рис. 7. Уровни напряжения на частоте основной гармоники 50 Гц для комбинации шунтирования одной ячейки в фазе: 1 – в фазе А; 2 – в фазе В; 3 – в фазе С

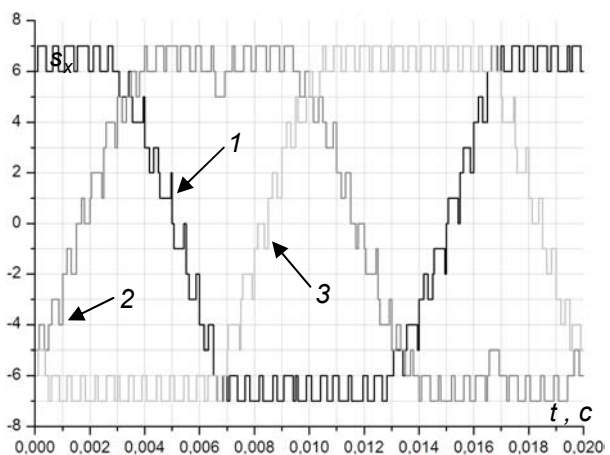


Рис. 8. Уровни напряжения на частоте основной гармоники 50 Гц для комбинации шунтирования по одной ячейке в фазе: 1 – в фазе А; 2 – в фазе В; 3 – в фазе С

#### Список литературы

1. Коротков А.А., Виноградов А.Б. Новый алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 64–69.
2. Коротков А.А., Виноградов А.Б. Анализ энергоэффективности алгоритмов управления преобразователем высоковольтного частотно-регулируемого привода // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 47–52.
3. Пат. 2397579 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/458. Способ аварийного управления силовой ячейкой высоковольтного преобразователя частоты / Д.В. Краснов, А.А. Рязанцев, О.В. Губанов, Г.Б. Лазарев. № 2009112544/09; заяв. 06.04.2009; опубл. 20.08.2010, Бюл. №23. – 7 с.

#### References

1. Korotkov, A.A., Vinogradov, A.B. Novyy algoritm vektornogo formirovaniya ShIM vysokovol'tnogo preobrazovatelya s minimizatsiyey kommutatsionnykh poter' [A New Space Vector PWM Algorithm for High Voltage Converter with Switching Loss Minimization]. Vestnik IGEU, 2013, issue 4, pp. 64–69.

2. Korotkov, A.A., Vinogradov, A.B. Analiz energoefektivnosti algoritmov upravleniya preobrazovatelem vysokovol'nogo chastotno-reguliruemogo privoda [Energy Efficiency Analysis of Variable-Frequency Drive Medium Voltage Source Converter Control Strategies]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 47–52.

*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

3. Krasnov, D.V., Ryazantsev, A.A., Gubanov, O.V., Lazarev, G.B. Sposob avariynogo upravleniya silovoy yacheykoy vysokovol'nogo preobrazovatelya chastoty [Emergency control method of power cell of high-voltage frequency converters], Patent RF, no. 2009112544, 2009.