

- разрабатывать простые алгоритмы синтеза в реальном масштабе времени микропроцессорными средствами законов управления позиционными электроприводами.
2. Составлен алгоритм перемещения рабочего органа с любой установившейся скорости без перерегулирования по положению при изменении задания во время переходного процесса.
  3. Отработка заданий выполняется с требуемой точностью и предельным быстродействием при строгом выполнении ограничений на рывок, ускорение и скорость.
  4. Изменение в широком диапазоне ограничений, заданий на перемещения, точности позиционирования и начальных скоростей электропривода не нарушает работоспособности алгоритмов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковенко П.Г. Методика последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 2. – С. 95–98.
2. Беллман Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. – М.: Мир, 1974. – 207 с.
3. Мясников В.А., Игнатъев М.Б., Покровский А.М. Программное управление оборудованием. – Л.: Машиностроение, 1974. – 243 с.
4. Яковенко П.Г. Оптимизация законов управления позиционными электроприводами при управлении от ЭВМ // Системы электропривода и промышленной автоматики с управлением от микропроцессоров и ЭВМ. – Л.: ЛДНТП, Ленингр. отделение, 1983. – С. 32–35.

Поступила 22.05.2012 г.

УДК 62–83: 621.314.632

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ВЕНТИЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В НОРМАЛЬНОМ И АВАРИЙНОМ РЕЖИМАХ

Ю.Н. Дементьев

Томский политехнический университет  
E-mail: dementiev@mail2000.ru

*Представлены аналитические выражения для определения основных величин электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем в основном и аварийном режимах его работы. Полученные аналитические выражения позволяют относительно просто и с достаточной точностью определить временные функции основных величин, величины первой и высших гармоник, добавочные потери и исходные данные для выбора силовых элементов вентильного преобразователя для основного и аварийного режимов.*

#### Ключевые слова:

*Электрический электропривод, переменный ток, вентильный преобразователь, математическое описание.*

#### Key words:

*Electric drive, alternating current, valve converter, mathematical description.*

Успехи в развитии силовой полупроводниковой техники позволяют решать задачи создания наиболее рациональных способов коммутирования тока в цепях электрических машин постоянного и переменного тока и получить регулируемые электромашино-вентильные системы. Одним из перспективных направлений в развитии машино-вентильных систем являются регулируемые приводы, сочетающие вентильные преобразователи и машины переменного тока, что дает возможность создавать высокоэффективные системы электропривода. Системы электропривода с вентильными регулировочными устройствами имеют сложное поведение из-за многократной нелинейности системы и большого числа инерционных звеньев.

В силу нелинейности элементов, входящих в состав вентильных регулировочных устройств, анализ и расчет электромагнитных процессов и ве-

личин в таких системах сопряжен со значительными трудностями [1–3]. Однако исследование таких систем актуально, так как из-за применения вентиляей изменяются их характеристики при работе в статических и динамических режимах. На рис. 1 приведена схема трехфазного мостового симметрично управляемого вентильного преобразователя, работающего с синхронной машиной (СМ) или асинхронной (АМ).

На схеме на зажимы  $a$ ,  $b$ ,  $c$  трехфазного мостового вентильного преобразователя присоединяется, в случае привода переменного тока на базе СМ с симметричным ротором – обмотка статора, а в асинхронном электроприводе, например, надсинхронном вентильном каскаде – обмотка ротора АМ.

За положительное направление токов, напряжений и потокосцеплений принято направление от нулевой точки к зажимам  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

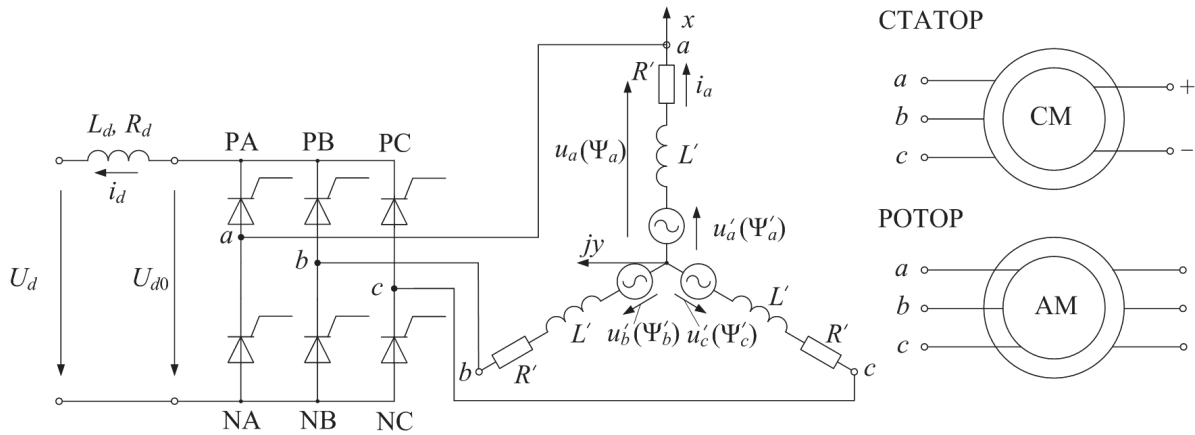


Рис. 1. Схема трехфазного мостового симметрично управляемого вентильного преобразователя, работающего с СМ или АМ

Упрощающие допущения:

1. В цепи постоянного тока величина индуктивности  $L_d \rightarrow \infty, i_d = I_d = \text{const}$ .
2. Напряжения  $u'_a, u'_b, u'_c$  за коммутирующей индуктивностью  $L'$  образуют симметричную трехфазную систему, и полученный из них обобщенный вектор напряжения

$$\vec{u}' = u'_x + ju'_y = \bar{U}' e^{j\omega t} \quad (1)$$

вращается с частотой основной гармоники  $\omega = 2\pi f$ .

3. Вектор напряжения в момент времени  $t=0$  имеет только действительную часть, т. е.  $\bar{U}' = U'$ .

Как известно, поведение вышеупомянутых электроприводов переменного тока с естественной коммутацией вентильного преобразователя в основном определяется первыми гармониками. Поэтому в данной статье представлены математические выражения для определения основных величин (напряжение, ток, потокосцепление) электроприводов переменного тока с симметрично управляемым вентильным преобразователем в основном и аварийном режимах без учета активного коммутационного сопротивления  $R'$  фазы машины переменного тока и использованием при математическом описании обобщенного вектора (Парк-вектора) [1–3].

#### Коммутационная цепь без учета активного сопротивления

Коммутация в этом случае обусловлена только индуктивностью  $L'$ . Коммутирующая индуктивность  $L'$  для СМ – это переходная индуктивность статора, приведенная к статорной обмотке при замыкании накоротко обмотки ротора, а для АМ – это переходная индуктивность ротора, приведенная к роторной обмотке при замыкании накоротко обмотки статора. Уравнение равновесия напряжений в этом случае запишется следующим образом

$$\vec{u} = L' \frac{d\vec{i}}{dt} + \vec{u}' \quad (2)$$

Для нормального первого режима с углом коммутации  $\delta < 60^\circ$  ниже приведены только оконча-

тельные аналитические выражения (3) соответственно для выпрямленного тока  $I_d$ , напряжения  $U_d$ , относительного выпрямленного напряжения  $U'_d$  и векторов первых гармоник напряжения  $\bar{U}'_1$  и тока  $\bar{I}'_1$  при  $R'=0$  и  $\text{ctg}\varphi=0$ , вывод которых с учетом полного сопротивления коммутационной цепи приведен в [3]. Таким образом,

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз}} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \delta)],$$

$$U_d = U_{d0} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi} \omega \Psi' [\cos \alpha + \cos(\alpha + \delta)],$$

$$U'_d = \frac{3}{\pi} (\sqrt{3} \cdot \cos \alpha - I'_d), \quad \bar{U}'_1 = \bar{U}'_{10},$$

$$\bar{U}'_{10} = \frac{3}{2\pi} U' \left[ \frac{2\pi}{3} - \delta + \sin \delta e^{-j(2\alpha + \delta)} \right]$$

$$\bar{\Psi}'_1 = \bar{U}'_1 / (j\omega), \quad I_1 = \frac{3}{2\pi} j \cdot I_{\text{кз}} [\delta - (\sin \delta) \cdot e^{-j(2\alpha + \delta)}], \quad (3)$$

где  $U'_d = U_d / U', I'_d = I_d / I_{\text{кз}}$ .

Годографы обобщенных векторов потокосцеплений, тока, напряжений электрических машин переменного тока для нормального инверторного первого режима при  $\delta < 60^\circ$  вентильного преобразователя приведены на рис. 2.

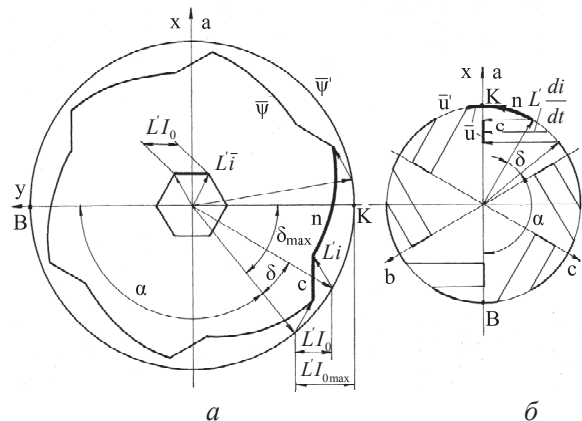


Рис. 2. Годографы обобщенных векторов: а) потокосцеплений и токов; б) напряжений

Как следует из рис. 2, годографы обобщенных векторов напряжения, тока, потокосцепления  $\bar{\Psi}$ , в соответствии с симметричным управлением вентилями преобразователя, обладают шестисторонней симметрией, поэтому векторы содержат высшие гармоники только порядка  $v=1+6K$ , где  $K=\pm 1, \pm 2, \dots$ , т. е.  $v=1, -5, 7, -11, 13, \dots$

На рис. 3 приведены кривые вектора тока  $\bar{I}'_1 = \bar{I}_1 / I_{кз}$  при различных значениях  $\delta$ ,  $\alpha$  и  $\text{ctg}\varphi=0$ .

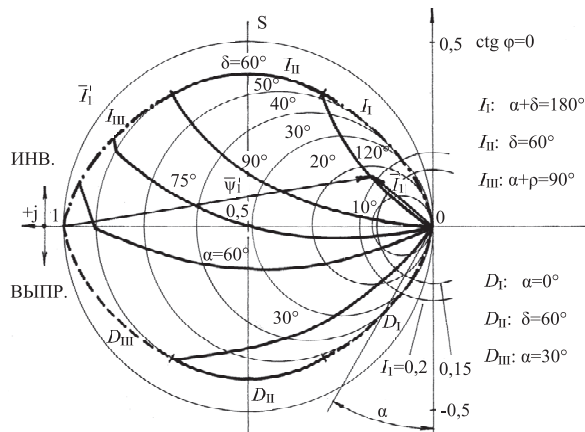


Рис. 3. Диаграммы изменения первой гармоники тока при различных значениях угла коммутации  $\delta$ , управления  $\alpha$  и суммарного угла управления  $\alpha+\delta$

Как видно из рис. 3, при изменении угла  $\delta$  для определенных значений угла управления  $\alpha$  токи основной гармоники имеет форму окружности с радиусом  $I'_1 = I_n L' / \Psi'$  центры которых лежат на комплексной положительной оси  $+j$ , а при изменении  $\alpha$  и  $\alpha+\delta$  – форму циклоиды. При этом следует заметить, что при потокосцеплении  $\Psi=1$  ток  $I_1$  равен индуктивности  $L'$  в относительных единицах. Так как для асинхронных и синхронных машин переходная индуктивность  $L'$  равна 0,15...0,20, то ток  $I_1$  будет соответственно равен  $I_1=0,15$  или  $I_1=0,2$ .

Как видно из рис. 3, вектор напряжения  $\bar{U}'$  имеет только действительную часть, а вектор  $\bar{\Psi}'$  располагается по направлению мнимой отрицательной оси комплексной координатной плоскости.

Выражение для расчета первой гармоники напряжения можно также получить из (2), т. е.

$$\bar{U}_1 = \bar{U}' + j\omega L' \bar{I}'_1, \bar{U}'_1 = \bar{U}'_1 / U' = 1 + j \bar{I}'_1.$$

#### Определение режима работы вентильного преобразователя

Из выражения для выпрямленного напряжения  $U_d$  следует, что при изменении угла открывания  $\alpha$  в интервале напряжение  $U_d < 0$  и, таким образом, возможен только инверторный режим. На границе инверторного и выпрямительного режимов напряжение  $U_d$  должно быть равно нулю, т. к. только так можно обеспечить равенство нулю средневыврямленного значения мощности преобразователя. Граничные характеристики двух режимов зависимости  $\alpha=f(\delta)$  показаны на рис. 4, где сплошной линией

изображены граничные характеристики  $D_I, D_{II}, D_{III}$  выпрямительного режима и  $I_I, I_{II}, I_{III}$  – инверторного режимов работы вентильного преобразователя без учета активного коммутирующего сопротивления.

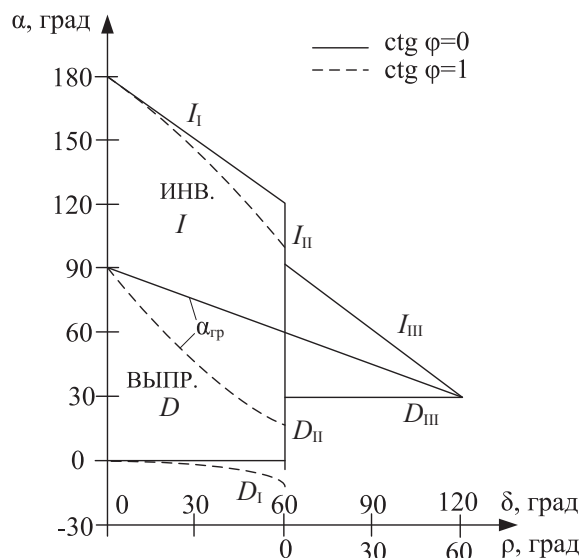


Рис. 4. Режимы работы вентильного преобразователя и граничные характеристики

Из выражений для расчета выпрямленного напряжения  $U_d$  и вектора тока  $\bar{I}'_1$  следует, что на границе выпрямительного и инверторного режимов действительно следующее равенство:

$$2\alpha_{тр} + \delta_{тр} = 180^\circ. \quad (4)$$

Угол управления вентилями преобразователя в инверторном режиме можно найти по следующей формуле:

$$\alpha_n = 180^\circ - (\alpha_v + \delta),$$

где  $\alpha_n$  – угол управления в выпрямительном режиме.

Из выражений (3) с учетом уравнения (4) получаем, что при одинаковых  $\delta$  справедливы следующие тождества:

$$I_{дв} = I_{дн}, U_{дв} = U_{дн}, \bar{U}_{дв} = \hat{U}_{дн}, \bar{\Psi}_{дв} = \hat{\Psi}_{дн}, \bar{I}_{дв} = \hat{I}_{дн}.$$

Эффективное значение обобщенного вектора тока

$$I_{эфф}^2 = I_{кз}^2 \left\{ (1-H)(1-\cos\delta) + \frac{3}{\pi} [1+H+\cos\delta] \frac{\delta}{2} - \left(1 + \frac{H}{2}\right) \sin\delta \right\},$$

где  $H = \cos(2\alpha + \delta)$ .

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента потерь от высших гармоник в функции угла коммутации  $\delta$ :

$$K_v = P_v / P_{v1} = (I_{эфф}^2 / I_1^2) - 1.$$

Как видно из рис. 2 и 5, при равенстве амплитуды первой гармоники тока номинальному значению  $I_1 = I_n$ , а вектора тока  $\bar{I}'_1 = 0,15 \dots 0,20$  коэффициент потерь  $K_v < 0,075$ , т. е. потери в обмотках СМ или АМ от высших гармоник незначительны.

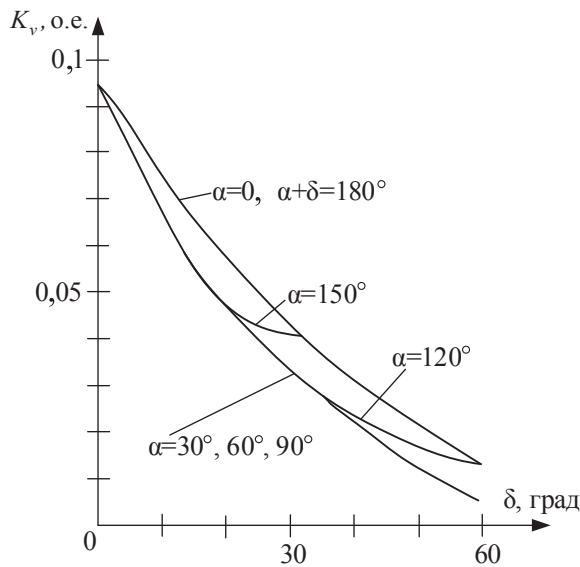


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь от угла коммутации при различных углах управления

Выражение для расчета эффективного значения вектора напряжения  $\vec{u}$ , с помощью которого определяют потери от вихревых токов, можно представить следующим образом:

$$U_{\text{эфф}} = \frac{3}{2\pi} \cdot U'^2 \left( \frac{2\pi}{3} - \delta + H \cdot \sin \delta \right).$$

#### Определение нагрузочной способности вентиля преобразователя по напряжению

Для удобства определения нагрузочной способности вентиля преобразователя преобразуем схему рис. 1 к схеме, представленной на рис. 6. Из мгновенных значений напряжений вентиля, присоединенных к положительной Р и отрицательной N шинам вентильного преобразователя, составим векторы напряжений  $\vec{u}_P$  и  $\vec{u}_N$ .

Естественно, что в этом случае должны быть учтены нулевые составляющие  $u_{0P}$  и  $u_{0N}$  такой величины, чтобы напряжение на проводящих вентилях было равно нулю. Обобщенные векторы не содержат нулевых составляющих, поэтому вектор напряжения на вентиле должен быть равен обобщенному вектору напряжения на зажимах  $\vec{u} = \vec{u}_P = \vec{u}_N$ .

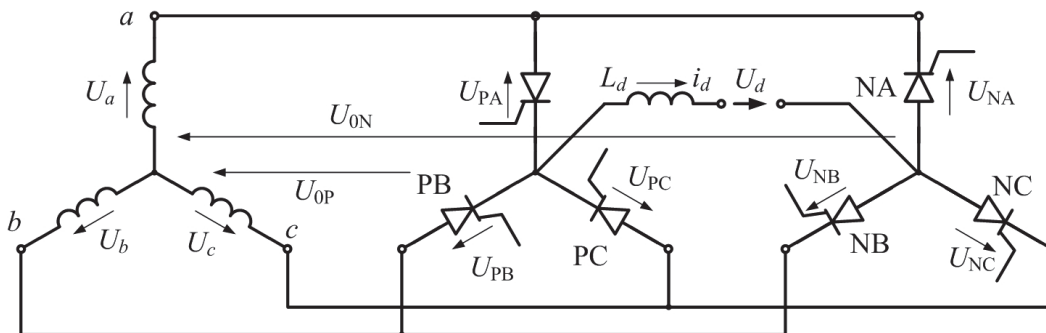


Рис. 6. Схема вентильного преобразователя, работающего с СМ или АМ для определения нагрузочной способности вентиля по напряжению

Так как вентили РА и NC для рассматриваемого в статье интервала времени весь период находятся в открытом состоянии, то для мгновенных значений напряжений вентиля, присоединенных к положительной Р и отрицательной N шинам вентильного преобразователя, можно записать:

$$\begin{aligned} u_{PA} &= u_a + u_{0P} = 0, & u_{PB} &= u_b + u_{0P} = u_b - u_a = -u_{ab}, \\ u_{PC} &= u_c + u_{0P} = u_c - u_a = u_{ca}, \\ u_{NC} &= 0, & u_{NA} &= -u_{ca}, & u_{NB} &= -u_{bc}. \end{aligned} \quad (5)$$

Вышеприведенные мгновенные значения линейных напряжений можно получить проектированием вектора напряжения ( $\sqrt{3} \cdot \vec{u}$ ) на соответствующие оси.

Максимальная нагрузка вентиля по напряжению приходится на внекоммутационное В-состояние, когда проводят ток два вентиля. В этом случае, используя зависимости (5) и вектора напряжения на зажимах [2, 3], можно определить напряжение вентиля в точке, условно обозначенной  $P_u$  (рис. 7).

Начальная точка внекоммутационного В-состояния, которая определяется углом  $60^\circ - \delta$ , находится на годографе вектора напряжения  $\vec{u}'$  с углом  $\pi + \alpha + \delta$ . Максимальное напряжение возникает на тиристоре РВ, если точка  $P_i$  попадает еще в В-состояние (это возможно в инверторном режиме при  $\alpha \geq 90^\circ$  для  $\alpha + \delta \leq 150^\circ$ ).

Напряжения на вентилях можно определить по рис. 7 с учетом  $R' = 0$ , тогда в точке  $P_o$ ,  $u_{PC} = \sqrt{3} U'$  и  $u_{PA} = -\sqrt{3} U'$  (к обоим вентилям прилагается запирающее напряжение), в точке  $P_{oi}$ ,  $u_{PB} = -\sqrt{3} U'$  и в точке  $P_i$ ,  $u_{PB} = -\sqrt{3} U'$ , таким образом, имеются моменты времени, когда максимальное напряжение на вентиле  $U_{\text{max}} = \sqrt{3} U = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot \Psi'$  равно максимальному значению линейного напряжения.

#### Определение нагрузочной способности вентиля преобразователя по току

Если проводящий вентиль заменить источником напряжения  $U_i$ , равным 1...2 В, и сопротивлением  $R_i$ , тогда в периодическом режиме средние потери, обусловленные падением напряжения при протекании прямого тока:

$$P_i = U_i \cdot I_{ik} + R_i \cdot I_{i \text{ эфф}}^2 = U_i \cdot I_{ik} + R_i \cdot I_{ik}^2 \cdot k^2,$$

где  $I_{ik}$  и  $I_{\text{эфф}}$  – среднее и эффективное значения тока вентиля;  $k_t$  – коэффициент, характеризующий форму тока;  $k_t = I_{\text{эфф}}/I_{ik}$ .

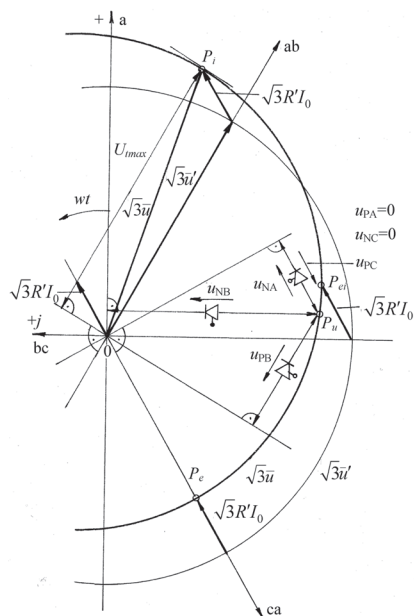


Рис. 7. Диаграмма, поясняющая определение максимального напряжения на вентилях преобразователя

В номинальном режиме:

$$I_{ik} = I_{\text{н}}, I_{\text{эфф}} = (\pi/2)I_{\text{н}}, k_t = k_{\text{н}} = \pi/2, P_i = P_{\text{н}}.$$

где  $I_{\text{н}}$  – среднее значение полу синусоиды тока.

В трехфазной мостовой схеме  $I_{ik} = I_d/3$ ,  $I_{\text{эфф}} = I_{\text{Кэфф}}/\sqrt{2}$ ,  $k_t = (3/\sqrt{2})(I_{\text{Кэфф}}/I_d)$ , где  $I_{\text{Кэфф}}$  – эффективное значение тока фазы, которое получается делением эффективного значения тока  $I_{\text{эфф}}$  на  $\sqrt{2}$ .

Вентиль выбран по току правильно, если  $P_{\text{max}} \leq P_{\text{н}}$ , т. е. при  $k_t \approx k_{\text{н}}$  в режиме с частотой, близкой к 50 Гц, выбор вентиля можно производить по максимальному среднему току.

**Нормальный, второй режим работы вентильного преобразователя ( $\delta=60^\circ$ )**

Данный режим наступает, как только интервал, в течение которого одновременно пропускают ток два вентиля, становится равным нулю, и в преобразователе одновременно пропускают ток три вентиля. В выпрямительном режиме при дальнейшем возрастании тока нагрузки  $I_d$  угол открывания увеличивается до  $30^\circ$ , а угол коммутации продолжает оставаться неизменным, равным  $60^\circ$ . Это объясняется тем, что при увеличении тока нагрузки в преобразователе по-прежнему одновременно пропускают ток только три вентиля, т. к. для четвертого вентиля не будет условий, при которых он сможет начать пропускать ток.

Во втором режиме угол управления с ростом тока нагрузки автоматически увеличивается, а угол коммутации  $\delta=60^\circ$  [4]. В инверторном режиме при  $\delta=60^\circ$  и изменении угла  $\alpha$  в диапазоне  $90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$  может возникнуть режим короткого замыкания преобразователя, что определяет границу опрокидывания инвертора  $I_{\text{л}}$ .

Аналитические выражения для расчета основных величин, приведенные в предыдущей части статьи, применимы и для второго режима работы преобразователя ( $\delta=60^\circ$ ).

**Аварийный, третий режим работы вентильного преобразователя ( $\delta>60^\circ$ )**

Дальнейшее увеличение тока  $I_d$  при изменении угла  $\alpha$  в диапазоне  $30^\circ \leq \alpha < 90^\circ$  приводит к возникновению третьего режима преобразователя, характеризующегося величиной  $\delta > 60^\circ$ . Из рис. 1 можно видеть, что этот режим является режимом короткого замыкания сторон переменного и постоянного тока. Временные диаграммы и обобщенные векторы напряжения и тока для данного режима представлены на рис. 8.

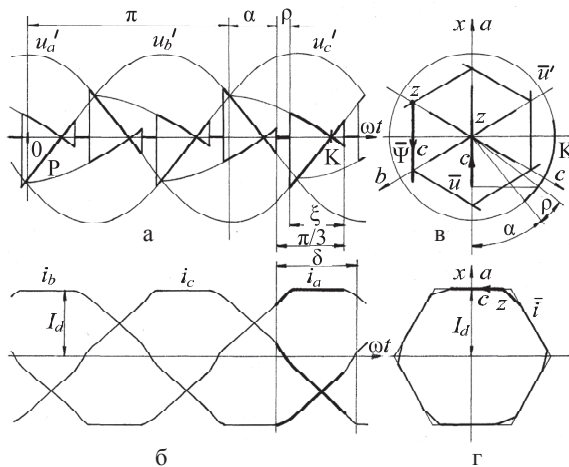


Рис. 8. Диаграммы напряжений и токов вентильного преобразователя в аварийном режиме, работающего с СМ или АМ: а, б) фазных напряжений и токов; в, г) обобщенных векторов фазных напряжений и токов

Этот режим характеризуется углом коммутации, который вычисляется по формуле:

$$\delta = 60^\circ + \rho,$$

где  $\tau = \rho/\omega$ .

В аварийном режиме (состояние короткого замыкания – Z) проводят ток четыре вентиля в интервале времени от состояния коммутации (К) до вне коммутации (В):  $t_k \leq t \leq t_b = (\pi + \alpha + \rho)/\omega$ , тогда

$$\bar{u} = 0, \bar{\Psi} = \int \bar{u} dt + \bar{C}_{K-Z} = \bar{C}_{K-Z},$$

$$\bar{i} = \left( \bar{\Psi} - \bar{\Psi}' \right) / L' = (\bar{C}_{K-Z} / L') + \bar{i}_{\text{к.з.}},$$

где  $\bar{i}_{\text{к.з.}} = -\bar{\Psi}' / L' = jI_{\text{к.з.}} e^{j\omega t}$ .

В нормальном режиме (состояние коммутации – К), когда проводят ток три вентиля в интервале времени  $t_b \leq t \leq t_k + \tau$ , аналитические выражения для векторов напряжения, потокосцепления и тока запишутся следующим образом:

$$\bar{u} = U' \cdot \cos \omega t, \bar{\Psi} = \Psi' \cdot \sin \omega t + \bar{C}_{K-K},$$

$$\bar{i} = I_{\text{кз}} \cdot \sin \omega t + \bar{C}_{K-K} / L' + \bar{i}_{\text{к.з.}} = jI_{\text{к.з.}} \cos \omega t + \bar{C}_{K-K} / L'. \tag{6}$$

Из условия симметрии определяются постоянные интегрирования  $C_{K-Z}$  и  $C_{K-K}$  (индексы Z и K указывают на состояние схемы преобразователя):

$$\bar{C}_{K-Z} = \Psi' \cdot [\sin \beta - \sin(\alpha + \rho)] \cdot e^{j(\pi/3)}, \quad \beta = \alpha + \pi/3,$$

$$\bar{C}_{K-K} = \bar{C}_{K-K} + \bar{\Psi}' \cdot \sin(\alpha + \rho).$$

Из (6) можно определить основные величины стороны постоянного тока:

$$I_d = \operatorname{Re}\{\bar{i}_c\} = \frac{1}{2} I_{K3} \cdot [\sin \beta - \sin(\alpha + \rho)],$$

$$U_d = \frac{1}{\tau} \int_{t_{\text{зап.}}}^{t_{\text{откр.}} + \tau} \frac{3}{2} U' \cdot \cos \omega t \, dt =$$

$$= \frac{3}{\pi} \cdot \frac{3}{2} \cdot U' [\sin \beta - \sin(\alpha + \rho)],$$

$$U'_d = \frac{9}{\pi} [\sin(\alpha + \pi/3) - I'_d],$$

выражения для первых гармоник на стороне переменного тока запишутся следующим образом:

$$\bar{U}_1 = \frac{3}{2\pi} U' [\varepsilon + (\sin \varepsilon) \cdot e^{-j(2\beta - \varepsilon)}],$$

$$\bar{I}_1 = \frac{3}{2\pi} \cdot j \cdot I_{K3} \left[ \frac{2}{3} - \varepsilon - (\sin \varepsilon) \cdot e^{-j(2\beta - \varepsilon)} \right],$$

где  $\varepsilon = (\pi/3) - \delta$ .

На границе выпрямительного и инверторного режимов для аварийного третьего режима работы вентильного преобразователя  $2\alpha_{zp} + \rho_{zp} = 120^\circ$ ,  $2\alpha_{fp} + \rho_{fp} = 180^\circ$ , т. е. то же самое, что и в нормальном режиме с  $\delta < 60^\circ$ .

#### Определение границ открывания и закрывания вентилей

Из рис. 2, б, следует, что для граничных точек открывания В и закрывания К  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha + \delta = 180^\circ$ .

Тогда точки с  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha + \delta = 180^\circ$  при угле коммутации  $\delta < 60^\circ$  определяют граничную характеристику  $D_I$  выпрямительного режима и граничную характеристику  $I_I$  инверторного режима в нормальном первом режиме работы вентильного преобразователя (рис. 3).

Во время работы вентильного преобразователя в выпрямительном режиме с углом  $\alpha = 30^\circ$  границей открывания  $D_{III}$  третьего аварийного режима является кривая, вдоль которой можно изменять  $\rho$  в пределах  $0^\circ < \rho < 60^\circ$ . Граница инверторного режима определяется выражениями  $\alpha + \rho = 90^\circ$  и  $\alpha + \delta = 150^\circ$ . Поскольку, как следует из рис. 8, если при  $\alpha + \rho = 90^\circ$  не закончится режим короткого замыкания до точ-

ки  $K$  (т. е. ток в фазе  $i_a$  не достигнет выпрямленного тока  $I_d$ ), то данный режим уже не прерывается, так как напряжение  $u_a' = -L \cdot di_a/dt$  в этой точке меняет знак. Исследования граничных характеристик аварийного третьего выпрямительного  $D_{III}$  и инверторного  $I_{III}$  режимов работы вентильного преобразователя показывают, что эти характеристики являются зеркальным отображением по прямой  $S$  (рис. 3) характеристик нормального первого выпрямительного  $D_I$  и инверторного  $I_I$  режимов вентильного преобразователя. В точках, где реальные части векторов основных величин равны, также равны значения  $\varepsilon$  и  $\delta$ . Третий режим работы вентильных преобразователей является аварийным и поэтому имеет теоретическое значение.

#### Заключение

1. Математическое описание электроприводов переменного тока с симметрично управляемым вентильным преобразователем в нормальном и аварийном режимах его работы с использованием обобщенного вектора (Парк-вектора) позволяет получить компактную запись уравнений и построить высокоэффективные системы управления электроприводами переменного тока, базирующиеся на векторных понятиях.
2. Аналитические выражения для расчета основных величин электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем без учета активного коммутационного сопротивления фазы машины переменного тока в нормальном и аварийном режимах работы значительно упрощаются и не приводят к значительным погрешностям при расчетах.
3. Установлено, что расчет основных величин без учета активного коммутационного сопротивления фазы машины переменного тока при работе вентильного преобразователя при переменной частоте питающей сети, особенно на низких частотах, может привести к значительным погрешностям.
4. Аналитические выражения, представленные в статье, дают возможность относительно просто и с достаточной точностью провести анализ временных зависимостей напряжения, тока и потокосцепления, первых и высших гармоник, определить добавочные потери и максимальные значения напряжения и тока для выбора силовых элементов вентильного преобразователя.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Halász S., Csörgits F., Hunyár M., Kádár I., Lázár J. Automatizált villamos hajtások. – Budapest: Tankönyvkiadó, 1989. – 286 о.
2. Dementyev Yu.N. Felvezetos szinkron feletti aszinkron motoros kaszkad hajtás statikus es dinamikus vizsgálata: Kandidatusi ertekezés. – Budapest, 1984. – 177 о.

3. Дементьев Ю.Н. Математическое описание электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями в установившемся режиме // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 36–42.
4. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1974. – 430 с.

*Поступила 16.10.2012 г.*