

## К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ШЕСТИФАЗНОМ КОМПЕНСАЦИОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С УРАВНИТЕЛЬНЫМ РЕАКТОРОМ

А. И. ЗАЙЦЕВ, А. А. КУВШИНОВ

Работа компенсационного преобразователя сопровождается сложными электромагнитными процессами, протекание которых зависит от многих параметров схемы, содержащей нелинейные элементы (вентили) и магнитные

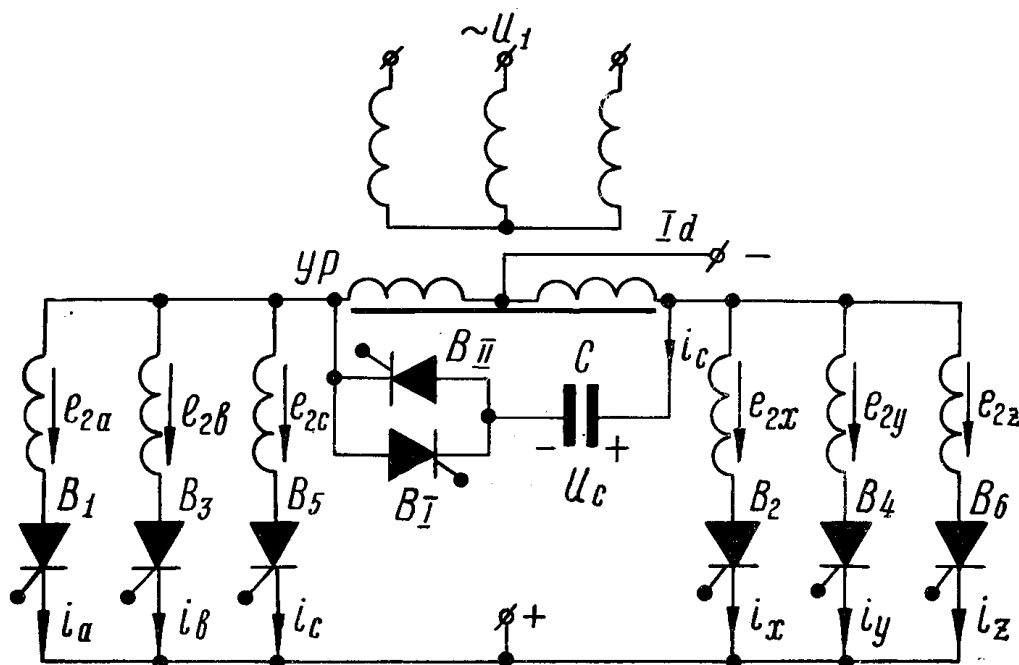


Рис. 1

связи. Токи, протекающие по обмоткам трансформатора, вентилям, коммутирующим конденсаторам, содержат широкий спектр высших гармонических. Напряжения, приложенные к отдельным элементам схемы, также несинусоидальны.

Определение токов преобразователя из-за перекрытия вентилях представляет нелинейную задачу, так как продолжительность перекрытия вследствие нелинейности вентилях зависит от режима нагрузки. В рассматриваемом шестифазном компенсационном преобразователе с уравнительным реактором (рис. 1) исследование электромагнитных процессов осложняется тем, что коммутация двухступенчатая и в узле искусственной коммутации имеются дополнительные нелинейные элементы — вентили. В результате

компенсационный преобразователь работает в разных режимах с различным числом и сочетанием включенных силовых и коммутирующих вентилях. Каждый из этих режимов имеет свои особенности в протекании электромагнитных процессов. По существу, установившийся режим работы компенсационного вентильного преобразователя представляет собой непрерывный ряд переходных процессов, возникающих при отпирании или запирании вентилях.

Существует достаточно большое количество методов анализа и расчета схем с нелинейными элементами. Однако аналитическое исследование электромагнитных процессов в таких схемах сопряжено со значительными трудностями. Уравнения, которые получают в результате такого исследования, оказываются весьма сложными и зачастую вообще неразрешимыми.

Наиболее целесообразным и весьма наглядным методом анализа электромагнитных процессов в преобразователях с двухступенчатой искусственной коммутацией, дающим возможность достаточно просто получить мгновенные и интегральные характеристики, является метод кусочно-линейной аппроксимации. Вольт-амперные характеристики вентилях заменяются отрезками прямых, в результате чего их можно считать линейными в пределах определенных интервалов времени. Если весь период работы компенсационного преобразователя разделить на ряд интервалов, в пределах которых все элементы схемы линейны, то рассмотрение электромагнитных процессов в нелинейной схеме сводится к решению линейной задачи. Однако процесс в целом остается нелинейным, так как моменты перехода процесса в нелинейном элементе с одного участка его характеристики на другой зависят от токов и напряжений в цепи [1].

Применение данного метода оправдывается еще и тем, что вольт-амперные характеристики выпускаемых в настоящее время полупроводниковых вентилях очень хорошо аппроксимируются малым количеством прямолинейных отрезков, что существенно влияет на упрощение решения задачи.

При исследовании электромагнитных процессов в компенсационном преобразователе принимаем следующие допущения:

1. Намагничивающие токи трансформатора и уравнительного реактора не учитываются при рассмотрении процессов в схеме.

2. Активные сопротивления обмоток трансформаторов и уравнительного реактора и собственные емкости элементов схемы малы и не учитываются при рассмотрении процессов в схеме.

3. Падением напряжения на вентилях во включенном состоянии пренебрегаем; сопротивления вентилях в выключенном состоянии бесконечно большие.

4. Параметры силового трансформатора и ток нагрузки постоянны.

Принятые допущения являются обычными и широко распространенными при исследовании электромагнитных процессов в вентильных преобразователях трехфазного тока [2]. Величина получаемой погрешности зависит от мощности исследуемого преобразователя и формы характеристик вентилях. С ростом мощности преобразователя и приближением характеристик вентилях к идеальным величина получаемой погрешности уменьшается.

Особенности работы шестифазного компенсационного преобразователя с уравнительным реактором были рассмотрены в [3]. При нормальных нагрузках в данном преобразователе включены поочередно либо один, либо два силовых вентиля. При увеличении тока нагрузки сверх определенного предела, который зависит от параметров узла искусственной коммутации, происходит срыв искусственной коммутации. Это — аварийный режим, при котором нужно либо отключить преобразователь, либо перевести его в режим работы с естественной коммутацией. Эти функции должна выполнять схема управления.

Поэтому для исследования электромагнитных процессов в компенсационном преобразователе с двухступенчатой искусственной коммутацией

достаточно рассмотреть подробно два режима: режим при двух одновременно включенных силовых вентилях и режим при одном включенном силовом вентиле.

### Режим при двух одновременно включенных силовых вентилях

Найдем уравнения для токов и напряжений в промежутке  $0 < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \vartheta_{\text{п}}$ , когда включены силовые вентили 1 и 2. Этот промежуток (1) можно разбить на три участка (рис. 2):

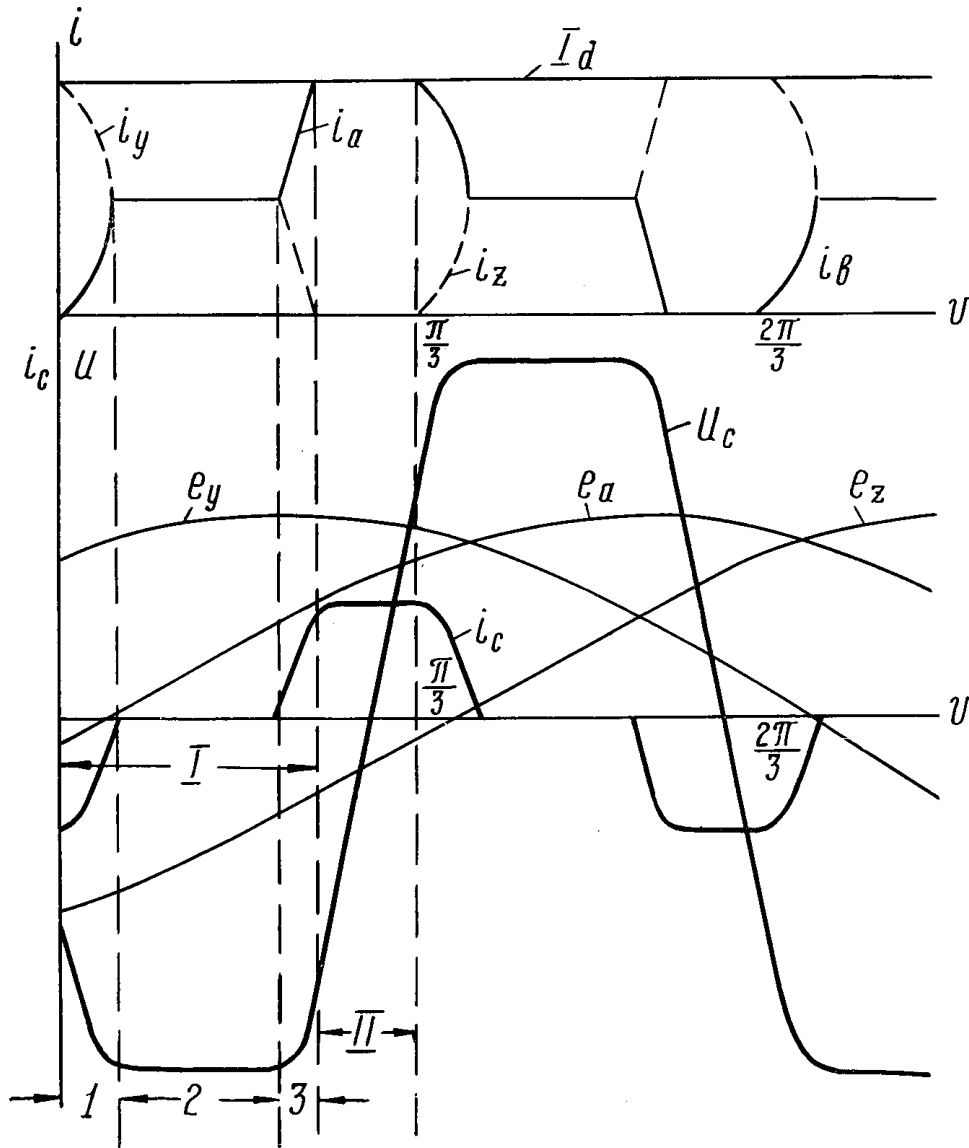


Рис. 2.

- 1) включение вентиля 1,  $0 < \vartheta < \vartheta_{\text{к2}}$ ;
  - 2) работа при включенном узле искусственной коммутации,  $\vartheta_{\text{к2}} < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \vartheta_{\text{п}} - \vartheta_{\text{к1}}$ ;
  - 3) выключение вентиля 2,  $\frac{\pi}{3} - \vartheta_{\text{п}} - \vartheta_{\text{к1}} < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \vartheta_{\text{п}}$ .
- Здесь  $\vartheta_{\text{к1}}$  — длительность первой коммутации;

$\vartheta_{\pi}$  — длительность протекания по конденсатору постоянного тока;  
 $\vartheta_{\kappa 2}$  — длительность второй коммутации.

Во время работы преобразователя с выключенным узлом коммутации, ток коммутирующего конденсатора  $i_c$  равен нулю, напряжение на нем равно постоянной величине  $-I_{c0}$ , анодные токи равны между собой и составляют половину тока нагрузки  $I_d$ .

При включении вентиля 1 и выключении вентиля 2 контур коммутации один и тот же (вторичные обмотки трансформатора  $a$  и  $y$  и коммутирующий конденсатор  $C$ ), поэтому электромагнитные процессы, происходящие в схеме при включении вентиля 1 и выключении вентиля 2, опишутся одинаковыми уравнениями:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{I_d}{2} + i_c, & i_y &= \frac{I_d}{2} - i_c, \\ i_c &= C \frac{du_c}{dt}, & I_d &= i_a + i_y. \end{aligned} \quad (1)$$

Составляя уравнение э. д. с. в контуре коммутации и учитывая (1), получаем

$$2LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c = -I_m \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 + \vartheta \right), \quad (2)$$

где

$i_a, i_y$  — анодные токи;

$C$  — емкость коммутирующего конденсатора;

$L$  — индуктивность одной фазы трансформатора;

$I_m$  — амплитуда вторичного напряжения трансформатора;

$I_c$  — напряжение коммутирующего конденсатора;

$$\psi_0 = \frac{\pi}{6} - \vartheta_r + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_{\pi},$$

$\vartheta_r$  — угол гашения, отсчитываемый влево от точки естественного зажигания вентиля.

Граничные условия для уравнения (2) будут различными для периодов первой и второй коммутаций.

Для второй коммутации:

$$(u_c)_{\vartheta=0} = -U_m \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right), \quad (i_c)_{\vartheta=0} = -\frac{I_d}{2}.$$

Для первой коммутации:

$$(u_c)_{\vartheta=\frac{\pi}{3}-\vartheta_{\pi}-\vartheta_{\kappa 1}} = -U_{c0}, \quad (i_c)_{\vartheta=\frac{\pi}{3}-\vartheta_{\pi}-\vartheta_{\kappa 1}} = 0.$$

Тогда решение уравнения (2) для периода второй коммутации запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{U_m}{\varepsilon^2 - 1} \left[ \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right) \cos \varepsilon \vartheta - \varepsilon \sin \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right) \sin \varepsilon \vartheta - \varepsilon^2 \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \vartheta \right) \right] - I_d \omega L \varepsilon \sin \varepsilon \vartheta, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_c &= \frac{\omega C \varepsilon U_m}{\varepsilon^2 - 1} \left[ \varepsilon \sin \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 + \vartheta \right) - \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right) \sin \varepsilon \vartheta - \right. \\ &\quad \left. - \varepsilon \sin \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right) \cos \varepsilon \vartheta \right] - \frac{I_d}{2} \cos \varepsilon \vartheta, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \varepsilon = \frac{1}{\omega \sqrt{2LC}}.$$

Решение уравнения (2) для периода первой коммутации имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_c &= - \left[ U_{c0} - \frac{\varepsilon^2 U_m}{\varepsilon^2 - 1} \cos \left( \frac{2\pi}{3} - \vartheta_r \right) \right] \cos \varepsilon \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_{\pi} \right) - \\ &- \frac{\varepsilon U_m}{\varepsilon^2 - 1} \sin \left( \frac{2\pi}{3} - \vartheta_r \right) \sin \varepsilon \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_{\pi} \right) + \varepsilon \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 + \vartheta \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$i_c = \omega C \varepsilon \left\{ \left[ U_{co} - \frac{\varepsilon^2 U_m}{\varepsilon^2 - 1} \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \vartheta_r\right) \right] \sin \varepsilon \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_{\pi} \right) - \right. \\ \left. - \frac{\varepsilon U_m}{\varepsilon^2 - 1} \left[ \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \vartheta_r\right) \cos \varepsilon \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_{\pi} \right) - \sin\left(\frac{\pi}{6} + \psi_0 + \vartheta\right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Значения анодных токов получим, подставив (4) и (6) в (1).

### **Режим при одном включенном силовом вентиле (перезаряд коммутирующего конденсатора постоянным током)**

Так как ток нагрузки есть величина постоянная, то по коммутирующему конденсатору в промежутке  $\frac{\pi}{3} - \vartheta_{\pi} < \vartheta < \frac{\pi}{3}$  протекает постоянный ток, равный половине тока нагрузки (участок II, рис. 2). Напряжение на коммутирующем конденсаторе изменяется в это время по линейному закону:

$$u_c = \frac{I_d}{2\omega C} \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} \right) + (u_c)_{\vartheta = \frac{\pi}{3}}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) значение  $(u_c)_{\vartheta = \frac{\pi}{3}} = (-u_c)_{\vartheta = 0}$ , получаем

$$u_c = \frac{I_d}{2\omega C} \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} \right) + U_m \cos\left(\frac{\pi}{6} + \psi_0\right). \quad (8)$$

Анодный ток в этом промежутке равен току нагрузки  $I_d$ .

### **Определение длительности коммутации и начального напряжения на коммутирующем конденсаторе**

Подлежат определению длительности первой и второй коммутаций  $\vartheta_{\kappa 1}$  и  $\vartheta_{\kappa 2}$ , длительность работы одного силового вентиля  $\vartheta_{\pi}$  и начальное напряжение на коммутирующем конденсаторе  $I_{co}$ . Для их определения имеем следующие четыре условия:

- 1) при  $\vartheta = \vartheta_{\kappa 2}$  ток  $i_c$ , определяемый выражением (4), равен нулю;
- 2) при  $\vartheta = \vartheta_{\kappa 2}$  напряжение  $u_c$ , определяемое выражением (3), равно  $-I_{co}$ ;
- 3) при  $\vartheta = \frac{\pi}{3} - \vartheta_{\pi}$  ток  $i_c$ , определенный из формулы (6), равен  $\frac{I_d}{2}$ ;
- 4) при  $\vartheta = \frac{\pi}{3} - \vartheta_{\pi}$  напряжение  $u_c$ , определяемое из выражения (5), равно напряжению  $u$ , определенному из выражения (8).

Условия 1 и 2 вытекают из самого принципа действия узла искусственной коммутации. Условия 3 и 4 вытекают из требований правильного сопряжения режимов на границах последовательных интервалов времени, в которые включены различные сочетания силовых и коммутирующих вентилей.

В итоге получим четыре трансцендентных уравнения, которые в общем виде неразрешимы.

### **Упрощение решения. Пренебрежение изменением фазных Э. Д. С. в интервалах работы узла искусственной коммутации**

Вышеприведенные уравнения значительно упрощаются, если при исследовании электромагнитных процессов, происходящих в контуре коммутации, принять допущение о постоянстве фазных э. д. с. трансформатора преобразователя в интервалах работы узла искусственной коммутации (первая коммутация, период работы одного силового вентиля, вторая коммутация)

Учитывая вышесказанное, получаем следующие упрощенные уравнения:

Вторая коммутация:

$$u_c = -I_d \omega L \varepsilon \sin \varepsilon \vartheta - U_m \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right), \quad (9)$$

$$i_c = -\frac{I_d}{2} \cos \varepsilon \vartheta. \quad (10)$$

Учитывая условия 1 и 2, получаем из (9) и (10):

$$\vartheta_{\kappa 2} = \frac{\pi}{2\varepsilon}; \quad (11)$$

$$U_{co} = I_d \omega L \varepsilon + U_m \cos \left( \frac{\pi}{6} + \psi_0 \right). \quad (12)$$

Первая коммутация:

$$u_c = - \left[ 2U_m \cos \left( \vartheta_r - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) \sin \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) + \right. \\ \left. + I_d \omega L \varepsilon \right] \cos \varepsilon \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n \right) - U_m \cos \left( \frac{2\pi}{3} - \vartheta_r \right), \quad (13)$$

$$i_c = \omega C \varepsilon \left[ 2U_m \cos \left( \vartheta_r - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) \sin \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) + \right. \\ \left. + I_d \omega L \varepsilon \right] \sin \varepsilon \left( \vartheta - \frac{\pi}{3} + \vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n \right). \quad (14)$$

### Перезаряд коммутирующего конденсатора постоянным током

Уравнение для напряжения коммутирующего конденсатора  $u_c$  имеет тот же вид (8), что и прежде.

Из условий 3 и 4 получим два трансцендентных уравнения:

$$I_d (1 \sin \varepsilon \vartheta_{\kappa 1}) = 4\varepsilon \omega C U_m \cos \left( \vartheta_r - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) \sin \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) \sin \varepsilon \vartheta_{\kappa 1}, \quad (15)$$

$$I_d (\varepsilon \vartheta_n \operatorname{tg} \varepsilon \vartheta_{\kappa 1} - 1) = 4\varepsilon \omega C U_m \sin \left( \vartheta_r - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) \cos \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\vartheta_{\kappa 1} + \vartheta_n}{2} \right) \operatorname{tg} \varepsilon \vartheta_{\kappa 1}. \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) дают возможность при данных  $\vartheta_r$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $I_d$  определить, задаваясь рядом значений угла  $\vartheta_n$ , две кривые

$$\vartheta_{\kappa 1} = f_1(\vartheta_n) \quad \text{и} \quad \vartheta_{\pi 1} = f_2(\vartheta_n).$$

Точка пересечения этих кривых определяет значения  $\vartheta_{\kappa 1}$  и  $\vartheta_n$ , соответствующие данным параметрам преобразователя.

Чтобы оценить погрешность, вносимую в расчеты допущением постоянства фазных э. д. с. в периоды коммутации, на ЭЦВМ по формулам (3) — (8) были рассчитаны основные величины, характеризующие электромагнитные процессы компенсационного преобразователя для различных  $L$ ,  $C$ ,  $\vartheta_2$ . Для этих же параметров был проведен расчет по упрощенным формулам (9) — (16). Результаты расчетов для всех углов гашения  $\vartheta_2$  отличались не больше, чем на 15%.

На рис. 2 построены расчетные кривые анодных токов  $i_a$ ,  $i_y$ ,  $i_z$ ,  $i_b$ , тока  $i_c$  и напряжения  $u_c$  коммутирующего конденсатора для случая, когда  $L = 0,157 \cdot 10^{-3}$  гн,  $C = 350 \cdot 10^{-6}$  ф.,  $\vartheta_2 = \frac{\pi}{3}$ ,  $I_d = 500$  а,  $U_m = 278$  в.

Построение кривой тока  $i_a$  выполненным следующим образом. В интервалах  $0 < \vartheta < \vartheta_{\kappa 2}$  и  $\frac{\pi}{3} - \vartheta_n - \vartheta_{\kappa 1} < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \vartheta_n$  по уравнениям (1), (10) и (14) построены участки кривых  $i_a$  и  $i_y$ . В интервале  $\vartheta_{\kappa 2} < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \vartheta_n - \vartheta_{\kappa 1}$ , когда узел искусственной коммутации не работает, анодные токи  $i_a$  и  $i_y$  равны половине тока нагрузки  $I_d$ . В интервале работы одного

силового вентиля  $\frac{\pi}{3} - \vartheta_n < \vartheta < \frac{\pi}{3}$  анодный ток  $i_a$  равен току нагрузки  $I_d$ . Затем путем смещения участка кривой  $i_y$ , построенного в интервале  $0 < \vartheta < \frac{\pi}{3} - \vartheta_n$ , на угол  $\frac{\pi}{3}$  вправо была получена вся кривая анодного тока  $i_a$ .

По выражениям (9), (13) и (8) строится один полупериод кривой напряжения на коммутирующем конденсаторе  $u_c$ . Второй полупериод строится как зеркальное отображение первого, смещенное на угол  $\frac{\pi}{3}$  вправо.

Зная величины и формы кривых анодных токов и напряжения на коммутирующем конденсаторе, можно определить все другие интересующие нас величины (первичный ток и напряжение на вторичных обмотках трансформатора, напряжение на уравнительном реакторе, напряжение на силовых вентилях и т. д.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Р. Г л и н т е р н и к. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. Изд. «Наука», Л., 1968.
  2. М. П. К о с т е н к о, Л. Р. Н е й м а н, Г. Н. Б л а в д з е в и ч. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Изд. АН СССР, М.—Л., 1946.
  3. А. И. З а й ц е в, Ю. М. А ч к а с о в, М. А. Б о р о в и к о в, В. Н. М и ш и н, А. А. К у в ш и н о в, В. П. О б р у с н и к, В. Н. Ч и р ь е в. Узел искусственной коммутации на тиристорах для шестифазного преобразователя с уравнительным реактором. Известия ТПИ, т. 161, 1967.
-