

Т. П. АСАТЯН

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, СОДЕРЖАЩЕЙ АКТИВНОЕ
 СОПРОТИВЛЕНИЕ

С появлением полупроводниковых управляемых вентилях началось интенсивное развитие преобразовательной техники. Разрабатывается много схем управлений, преобразователей и т. п. [1]. Появление новых схем приводит к развитию методов их аналитического и экспериментального исследования. Существует множество работ, рассматривающих переходные процессы в преобразовательных цепях с тиристорами. В работах [2, 3] приводится расчет переходных процессов в цепи вентиля преобразователя, содержащей индуктивности и э. д. с. Расчет ведется методом разностных уравнений. При этом получено решение для дискретных значений токов. В [4] приведен расчет токов обратных зажиганиях в трехфазной однофазной преобразовательной схеме. Здесь также расчет ведется методом разностных уравнений.

Если преобразователь работает с постоянным углом зажигания (α_0) управляемых вентилях, то в нем процессы повторяются через равные промежутки времени [2, 3]. Внутри каждого промежутка имеются две зоны. В первой зоне одновременно работают два вентиля, а во второй — только один. Причем, ширина этих зон меняется в течение переходного процесса. При расчете переходного процесса необходимо учесть эту особенность. В работах [2, 3] удается обойти эту особенность ценой исключения из цепи нагрузки активного сопротивления. При наличии R решение методом разностных уравнений было бы весьма затруднительным.

В настоящей работе приводится расчет переходного процесса для усложненной цепи, где последовательно с нагрузкой подключено сопротивление R (рис. 1). Расчет ведется по методике, предложенной Ф. А. Григоряном [5]. Отметим, что эту задачу можно решить также методом принасовывания решений (метод кусочно-линейной аппроксимации). Однако такое решение весьма громоздко и не позволяет

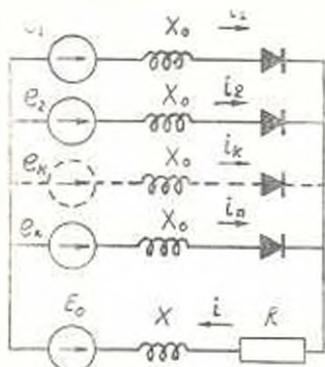


Рис. 1. Схема преобразователя.

получить аналитического выражения искомым токам в зависимости от времени.

Для общности решения примем, что на нагрузку $E_0; R; X$ работает симметричный n -фазный генератор с в. д. с. $e_1, e_2, e_3, \dots, e_k, \dots, e_n$, где

$$e_k = E_m \sin \left[\omega t - \frac{2\pi}{n} (k-1) \right].$$

На рис. 2 приведены кривые в. д. с. e_1, e_2, \dots, e_n и токов для $(k-1)$ -го и k -го фаз.

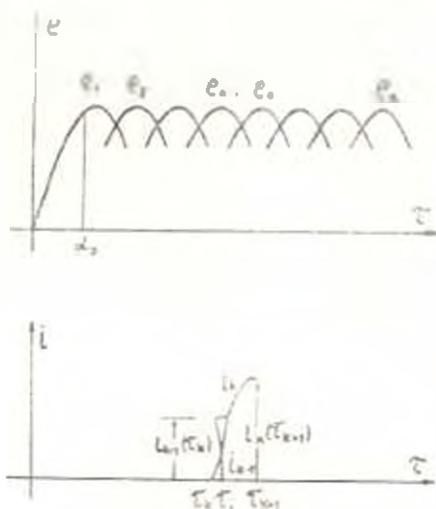


Рис. 2 Кривые в. д. с. и токов за k -ый полупериод.

Запишем уравнения цепи, когда одновременно работают $(k-1)$ -ый и k -ый пентилы, иными словами для промежутка $[\tau_k, \tau_1]$

$$\left. \begin{aligned} i &= i_{k-1} + i_k \\ e_{k-1} - E_0 - U_0 &= X_0 \frac{di_{k-1}}{d\tau} - Ri + X \frac{di}{d\tau} \\ e_k - E_0 - U_0 &= X_0 \frac{di_k}{d\tau} - Ri - X \frac{di}{d\tau} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При условии: $i_k = i_{k-1}(\tau_k)$; $i_1(\tau_0) = 0$, когда $\tau = \tau_k = \tau_0 + \frac{2\pi}{n}(k-1)$,

из системы (1) находим:

$$i_k - i_{k-1} = \frac{2E_m \sin \frac{\pi}{n}}{X_0} \left\{ \sin \left(\tau_0 + \frac{\pi}{n} \right) - \sin \left[\tau - \frac{2\pi}{n}(k-1) + \frac{\pi}{n} \right] \right\} - i_{k-1}(\tau_0); \quad (2)$$

$$i_k + i_{k-1} = \frac{2 E_m \cos \frac{\pi}{n}}{\sqrt{(X_0 + 2X)^2 + (2R)^2}} \left| \sin \left[\tau - \frac{2\pi}{n}(k-1) + \frac{\pi}{n} - \psi \right] - e^{-\frac{2R}{X_0 + 2X}(\tau - \tau_k)} \sin \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} - \psi \right) \right| - \frac{E_0 + U_d}{R} \left| 1 - e^{-\frac{2R}{X_0 + 2X}(\tau - \tau_k)} \right| + i_{k-1}(\tau_k) e^{-\frac{2R}{X_0 + 2X}(\tau - \tau_k)}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \psi = \frac{X_0 + 2X}{2R}$; $\alpha_0 > \frac{\pi(n-2)}{2n}$ — угол зажигания вентилей. Взяв разность уравнений (3) и (2), определим время коммутации $\Delta\tau_k = \tau_1 - \tau_2$.

При определении $\Delta\tau_k$ считаем, что за все время переходного процесса $\Delta\tau_k$ остается малым, чтобы можно было заменить $\sin \Delta\tau_k \approx \Delta\tau_k$, $\cos \Delta\tau_k \approx 1$ и $e^{-\frac{2R}{X_0 + 2X} \Delta\tau_k} \approx 1 + \frac{2R}{X_0 + 2X} \Delta\tau_k$. При таком допущении и при $\tau = \tau_1$ выражение для $\Delta\tau_k$ имеет вид:

$$\Delta\tau_k = \frac{X_0(X_0 + 2X)i_{k-1}(\tau_k)}{X_0(E_0 + U_d) - X_0 E_m \sin \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} \right) - 2X E_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right)}. \quad (4)$$

Складывая (2) и (3) и взяв $\tau = \tau_1$, находим значение i_2 в точке τ_1 :

$$i_k(\tau_1) = \frac{E_m \cos \frac{\pi}{n} \sin \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right)}{X_0 + 2X} \Delta\tau_k - \frac{E_0 + U_d}{X_0 + 2X} \Delta\tau_k - \frac{E_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right)}{X_0} \Delta\tau_k - \frac{2R}{X_0 + 2X} i_{k-1}(\tau_k) \Delta\tau_k. \quad (5)$$

В промежутке $[\tau_1, \tau_{k+1}]$ ток $i_{k-1} = 0$, а выражение для i_k имеет вид:

$$i_k(\tau) = \frac{E_m}{\sqrt{(X_0 + X)^2 + R^2}} \left| \sin \left[\tau - \frac{2\pi}{n}(k-1) - \varphi \right] - e^{-\frac{R}{X_0 + X}(\tau - \tau_1)} \times \right. \\ \left. \times \sin \left[\tau_1 - \frac{2\pi}{n}(k-1) - \varphi \right] - \frac{E_0 + U_d}{R} \left| 1 - e^{-\frac{R}{X_0 + X}(\tau - \tau_1)} \right| \right| + \\ + i_k(\tau_1) e^{-\frac{R}{X_0 + X}(\tau - \tau_1)}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_0 + X}{R}$.

Используя (4) и (5) и принимая $\tau = \tau_1$, выражение (6) примет вид:

$$\begin{aligned}
i_k(\tau_{k-1}) = & \frac{E_m}{V(X_0 - X)^2 + R^2} \left| \sin \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} - \varphi \right) - e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0 + X)}} \times \right. \\
& \times \sin(\alpha_0 - \varphi) \left. \right| - \frac{E_0 + U_0}{R} \left| 1 - e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0 + X)}} \right| - \\
& - e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0 + X)}} \left[\frac{E_m \sin \alpha_0 - E_0 - U_0}{X_0 + X} + \frac{E_0 + U_0}{X_0 + 2X} + \right. \\
& \left. + \frac{2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right) - X_0 E_m \sin \alpha_0}{X_0(X_0 + 2X)} \right] \times \\
& \times \frac{X_n(X_0 + 2X)}{X_n(E_0 + U_0) - X_0 E_m \sin \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} \right) - 2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right)} \times \\
& \times i_{k-1}(\tau_k) - e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0 + X)}} \left[\frac{R(E_0 + U_0) - RE_m \sin \alpha_0}{(X_0 + X)(X_0 + 2X)} \right. \\
& \left. + \frac{RE_m \cos(\alpha_0 - \varphi)}{(X_0 + X)V(X_0 + X)^2 + R^2} + \frac{2RXE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right)}{X_0(X_0 + X)(X_0 + 2X)} \right] \times \\
& \times \left[\frac{X_n(X_0 + 2X)}{X_0(E_0 - U_0) - X_0 E_m \sin \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} \right) - 2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 - \frac{\pi}{n} \right)} \right] \times \\
& \times i_{k-1}(\tau_k). \tag{7}
\end{aligned}$$

Прирост тока в цепи за k -ый полупериод будет:

$$\Delta i_{k-1} = i_k(\tau_{k-1}) - i_{k-1}(\tau_k). \tag{8}$$

Подставляя в (8) значение тока $i_k(\tau_{k-1})$ из (7), получим:

$$\Delta i_{k-1} = A - Bi_{k-1} - Ci_{k-1}^2 \dots \tag{9}$$

Разделив обе части уравнения (9) на $2\pi/n$ и опуская индекс $k-1$, получим:

$$\frac{\Delta i}{2\pi/n} = a - bi - ci^2, \tag{10}$$

где

$$\begin{aligned}
a = & \frac{nE_m}{2\pi V(X_0 + X)^2 + R^2} \left[\sin \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} - \varphi \right) - e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0 + X)}} \sin(\alpha_0 - \varphi) \right] - \\
& - \frac{n(E_0 + U_0)}{2\pi R} \left| 1 - e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0 + X)}} \right|;
\end{aligned}$$

$$b = \frac{nX_0 e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0+X)}}}{2\pi \left[X_0(E_0 + U_0) - X_0 E_m \sin\left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n}\right) - 2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n}\right) \right]} \times$$

$$\times \left| \frac{(X_0 + 2X) E_m \sin \alpha_0 - X(E_0 - U_0)}{(X_0 + X)} + \frac{2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n}\right) - X_0 E_m \sin \alpha_0}{X_0} \right| + \frac{n}{2\pi}$$

$$c = \frac{nX_0(X_0 + 2X)^2 e^{-\frac{2\pi R}{n(X_0+X)}}}{2\pi(X_0+X) \left[E_0 + U_0 - E_m \sin\left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n}\right) - \frac{2X}{X_0} E_m \sin \frac{\pi}{n} \cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n}\right) \right]} \times$$

$$\times \left[\frac{R(E_m \sin \alpha_0 + E_0 + U_0)}{X_0 + 2X} - \frac{2KXE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n}\right)}{X_0(X_0 + 2X)} + \frac{RE_m \cos(\alpha_0 - \frac{\pi}{n})}{V(X_0 + X)^2 + R^2} \right]$$

ДЛ-13101

Так как время переходного процесса значительно превышает время полупериода $2\pi/n$, то левую часть уравнения (10) можно заменить производной

$$\frac{di}{dt} = a - bi - ci^2 \tag{11}$$

Решение нелинейного уравнения (11) с учетом начальных условий $i = i_0$ при $t = 0$ имеет вид:

$$i = \frac{[\sqrt{b^2 - 4ac} - b][\sqrt{b^2 + 4ac} + 2ci_0 + b] e^{-1/b^2 - 4a^2 t}}{2c[\sqrt{b^2 + 4ac} - 2ci_0 - b] + (\sqrt{b^2 - 4ac} + 2ci_0 + b) e^{-1/b^2 - 4a^2 t}}$$

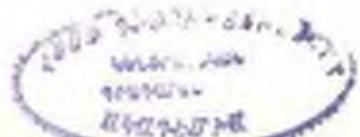
$$- \frac{[\sqrt{b^2 + 4ac} + b][\sqrt{b^2 - 4ac} - 2ci_0 - b]}{2c[\sqrt{b^2 + 4ac} - 2ci_0 - b] - (\sqrt{b^2 - 4ac} + 2ci_0 + b) e^{-1/b^2 - 4a^2 t}} \tag{12}$$

Из уравнения (12) можно найти установившееся значение тока:

$$i_{уст.} = \frac{[\sqrt{b^2 + 4ac} - b]}{2c} \tag{13}$$

Уравнение (12) описывает огибающую дискретных значений тока в коммутационных точках.

При отсутствии в цепи нагрузки активного сопротивления формула (11) превращается в



$$\frac{di}{d\tau} = a' - b'i, \quad (14)$$

где

$$a' = \frac{nE_m}{2\pi(X_0 + X)} \left[\cos \alpha_0 - \cos \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} \right) \right] - \frac{E_0 + U_0}{X_0 + X};$$

$$b' = \frac{nX_0}{2\pi \left[X_0(E_0 + U_0) - X_0E_m \sin \left(\alpha_0 + \frac{2\pi}{n} \right) - 2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right) \right]} \times$$

$$\times \frac{(X_0 + 2X)E_m \sin \alpha_0 - X(E_0 + U_0)}{(X_0 + X)} +$$

$$+ \frac{2XE_m \sin \frac{\pi}{n} \cos \left(\alpha_0 + \frac{\pi}{n} \right) - X_0E_m \sin \alpha_0}{X_0} \left] + \frac{n}{2\pi}.$$

Решение уравнения (14) с учетом начальных условий $i = i_0$ при $\tau = 0$ имеет вид:

$$i = \frac{a'}{b'} [1 - e^{-b'\tau}] + i_0 e^{-b'\tau}. \quad (15)$$

Из (15) находим установившееся значение тока:

$$i_{ст} = a'/b'. \quad (16)$$

Рассмотрим численный пример при следующих значениях параметров: $n = 3$; $E_m = 220$ в; $E_0 = 135$ в; $U_0 = 5$ в; $X_0 = 4$ ом; $X = 8$ ом; $R = 2$ ом; $\alpha_0 = 45^\circ$; $i_0 = 0$.

Значения токов в цепи нагрузки в коммутационных точках, вычисленные по формуле (12), приведены в табл. 1.

Таблица 1

τ в рад	0	2,878	4,971	7,064	9,157	11,250	∞
$i(\tau)$ в а	0	5,090	6,390	6,840	7,008	7,062	7,090

Значения токов в коммутационных точках при отсутствии в цепи нагрузки R , вычисленные по формуле (15) настоящей работы и по формуле (12 а) работы [3], приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

τ в рад	0	2,878	4,971	7,064	9,157	11,250	∞
$i(\tau)$ в а	0	6,590	9,677	11,837	13,259	14,341	16,486

Таблица 3

n	0	1	2	3	4	5	∞
$i(n)$ в а	0	5,547	9,245	11,650	13,306	14,445	16,642

Кривые переходных токов, построенные по данным таблиц 1 и 2, приведены на рис. 3. Там же нанесены точки по данным табл. 3. Как видно из рис. 3, полученные результаты дают хорошую сходимость.

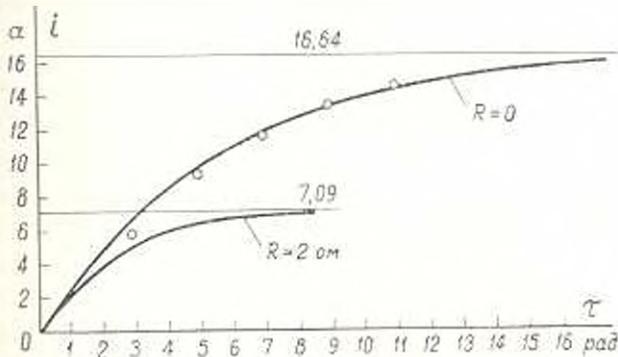


Рис. 3. Кривые переходного процесса к численному примеру.

В ы в о д ы

1. Предлагаемый метод расчета позволяет представить решение в непрерывной форме, что удобно при анализе, а также сравнительно легко получить формулу переходного процесса при наличии в цепи нагрузки активного сопротивления.

2. Полученная связь между шириной зоны коммутации и током в цепи указывает на увеличение коммутационного времени с ростом тока.

3. Введенное активное сопротивление в цепи нагрузки приводит к быстрому установлению тока.

Арм НИИЭ

Поступило 29.XII.1969.

Ք. Պ. ՍՈՍՆԻՍՅԱՆ

ԱՆՅՈՒՄԱՅԻՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ԶԱՇՎԱՐԿՈՒՄԸ ԱԿՏԻՎ ԳԻՄԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ԿԵՐՊԱԳՈՆԵԶԻ ՇՂԹԱՅՈՒՄ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հոդվածում քննարկվում է կերպարտիսիշի շղթայում անցումային պրոցեսի հաշվարկման հարցը, երբ շղթան պարունակում է նաև ակտիվ դիմադրություն: Ենթադրելով, որ անցումային պրոցեսի ժամանակամիջոցի համեմա-

առթիւնը կոմպոսիցիալի ժամանակամիջոցը չնչին մեծութուն է խնդիրը բերված է բառակապակցին բնութագիր ունեցող հասանքի ոչ-դժարին դիֆերենցիալ հաշիւաւորման ինտեգրումներ, որն ունի ճշգրիտ չափում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Толстая Ю. Г. Полупроводниковые преобразователи в энергетике. „Известия АН СССР. Энергетика и транспорт“, № 5, 1964.
2. Поссе А. В. Расчет переходных процессов в системе „выпрямитель-реактор-встречная э. д. с.“. Известия АН СССР, Энергетика и транспорт“, № 1, 1964.
3. Нейман Р. А., Поссе А. В., Слоним М. А. Метод расчета переходных процессов в цепях, содержащих пентильные преобразователи, индуктивности и э. д. с.“. „Электричество“, № 12, 1966.
4. Слоним М. А. Применение метода разностных уравнений для расчета обратных сжиганий в преобразовательных установках. „Известия АН СССР. Энергетика и транспорт“, № 5, 1964.
5. Григорян Ф. А. Параметрон на индуктивностях со ступенчатыми зависимостями тока. „Известия ВУЗ. Радиотехника“, т. X, № 3, 1967.