Доповіді
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

8 • 2008

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.318.001.2

Член-корреспондент НАН Украины **А. Е. Божко**

Об особой формуле среднего значения тока в электроцепи с управляемыми диодами и индуктивной нагрузкой

A new formula for the mean value of current in the electric circuit with controlled diods and an inductive load is deduced with the use of a singular expansion of a jump-like function.

Во многих электротехнических цепях постоянного и переменного токов с индуктивной нагрузкой применяются управляемые диоды (тиристоры, симисторы) [1–3]. Включаются эти диоды устройствами управления по углу открывания диодов, закрывание осуществляется либо уменьшением тока в полуволне его протекания до нуля, либо изменением полярности напряжения цепи. Графическое изображение управляемого тока в цепи с тиристорами представлено на рис. 1, где *а* — напряжение на нагрузке в цепи переменного тока; *б* — напряжение на нагрузке в цепи постоянного тока с двухполупериодным выпрямлением; φ — угол открывания тиристора.

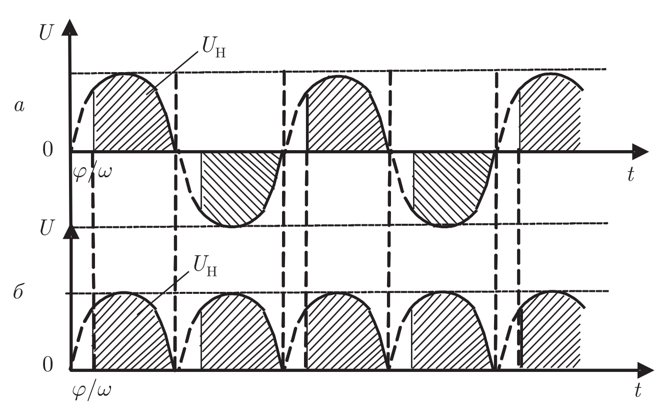

Рис. 1

Среднее значение тока, соответствующего формату тока, изображенного на рис. 1, при активном сопротивлении нагрузки R_H определяется выражением [4]

$$I_{\text{ср}\varphi} = \frac{2}{T}\int\limits_{\varphi/\omega}^{T/2} I_m \sin(\omega t \pm \varphi)dt = \frac{-2I_m}{T\omega}[\cos(\omega t \pm \varphi)]_{\varphi/\omega}^{T/2} =$$

$$= \frac{-2I_m}{T\omega}[\cos\omega t\cos(-\varphi) \mp \sin\omega t \sin(-\varphi)]_{-\varphi/\omega}^{T/2} = \frac{I_m}{\pi}(1+\cos\varphi), \qquad (1)$$

где I_m — амплитуда тока; ω — круговая частота ($\omega = 2\pi f$, f — частота, Гц; $T = 2\pi/\omega = 1/f$ — период изменения тока $i(t)$.

Как видно из рис. 1, ток $i(t)$ в цепи появляется в виде импульсов (это при активной нагрузке R_H резистора), при индуктивной нагрузке (L), особенно, если постоянная времени цепи $\tau = L/R$ мала. После каждого такого импульса в цепи происходит переходный процесс, и в этом случае мгновенное и среднее значения тока $i(t)$, $I_{\text{ср}}$ изменяются по сравнению с $i(t)$ при активной нагрузке (1). Следует отметить, что при открывании тиристоров к нагрузке цепи (z_H) прикладывается напряжение $U(t)$ такого же вида, как показано на рис. 1. Передний фронт каждого импульса напряжения есть скачкообразная функция $1(t)U_m(\pm\sin\varphi)$ — для цепи переменного тока и $1(t)U_m\sin\varphi$ — для цепи выпрямленного переменного тока. Согласно работам [5, 6], скачкообразные функции $1(t)$ могут быть представлены в виде особых (сингуларисных) разложений вида

$$E1(t) = E(1-\ell^{-\alpha t}) + \ell^{-\alpha t}E\sum_{k=1}^{n} U_{mk}\cos\omega_k t, \qquad (2)$$

$$U(t)1(t) = 1(t)U_m\sin(\omega t \pm \varphi) = U_m\ell^{-\alpha t}\sin(\pm\varphi) + U_m(1-\ell^{-\alpha t})\sin(\omega t \pm \varphi) +$$

$$+ |U_m|\ell^{-\alpha t}\sum_{k=1}^{n} U_{mk}\sin\omega_k t, \qquad (3)$$

где $\sum\limits_{k=1}^{n} U_{mk} = 1$; $U_{m1} = 1/\pi$; $U_{mk} = U_{m1}/k$; $k = \omega_k/\omega_1$; α — коэффициент затухания.

Разложение (2) относится к цепям с постоянным входным напряжением, а разложение (3) — к входным напряжениям цепей переменного тока при обязательном условии, что $|\pm\varphi| > 0$. При $\varphi = 0$ $U(t) = U_m\sin\omega t$ и указанное разложение (3) отсутствует.

Заметим, что в нашем случае как для цепи выпрямленного переменного тока, так и для цепи переменного тока, применимо разложение (3). Вследствие того, что при каждом импульсе напряжения на нагрузке (z_H) начинается переходный процесс в цепи, можно считать, что момент открывания тиристора (угол φ) является начальным для переходного процесса тока ($t = 0$). Тогда график одного импульса напряжения $U_{\text{нагр}}$ представим на рис. 2, откуда видно, что при $t = 0$ $U = U_m\sin\varphi$.

К таким импульсам напряжения на нагрузке в электроцепи переменного тока применимо сингуларисное разложение вида (3). Проверим правильность такого разложения. При $t = 0$ $U(0) = U_m\sin\varphi$, при $t = \infty$ $U(t) = U_m\sin(\omega t + \varphi)$, при $\alpha = \infty$ (исключение $1(t)$) $U(t) = U_m\sin(\omega t + \varphi)$. То есть представленное разложение при данных условиях соответствует классическому представлению $U(t) = U_m\sin(\omega t + \varphi)$. Для дальнейшего вывода

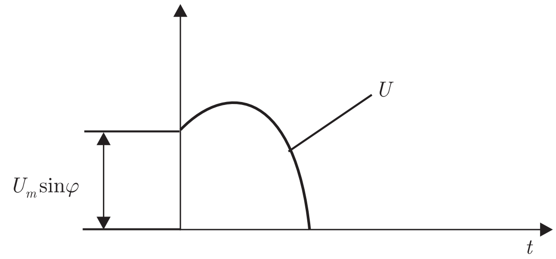

Рис. 2

формулы среднего значения тока $i(t)$ будем считать, что цепь с последовательным соединением резистора R и индуктивности L является линейной. Методика вывода формулы $I_{\text{ср}}$ следующая: вначале определяется $i(t)$ с учетом переходных процессов, а затем

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int\limits_{\varphi/\omega}^{T/2} i(t)\, dt. \tag{4}$$

Дифференциальное уравнение рассматриваемой электроцепи с учетом (3) имеет вид

$$U_m \ell^{-\alpha t} \sin\varphi + U_m(1 - \ell^{-\alpha t}) \sin(\omega t + \varphi) + |U_m| \ell^{-\alpha t} \sum_{k=1}^{n} U_{mk} \sin \omega_k t = Ri + L\frac{di}{dt}. \tag{5}$$

Применяя далее к линейной цепи RL принцип суперпозиции [4], получим выражение тока $i(t)$ в виде

$$i = i_0 + i_1 + \sum_{k=2}^{n} i_k. \tag{6}$$

В соответствии с (6) уравнение (5) представим суммой уравнений

$$U_m \ell^{-\alpha t} \sin\varphi = Ri_0 + L\frac{di_0}{dt}, \tag{7}$$

$$U_m(1 - \ell^{-\alpha t}) \sin(\omega t + \varphi) = Ri_1 + L\frac{di_1}{dt}, \tag{8}$$

$$|U_m| \ell^{-\alpha t} \sin\varphi \sum_{k=1}^{n} U_{mk} \sin \omega_k t = \sum_{k=2}^{n} \left(Ri_k + L\frac{di_k}{dt} \right). \tag{9}$$

Уравнения (7)–(9) решаем операторным методом с помощью преобразований Карсона [7], т. е. точно так, как представлено в работе [6]. Отличием является формула для тока $i_1(t)$. Поэтому на основании [6] запишем здесь оригиналы токов $i_0(t)$, $i_k(t)$, $k = \overline{2, n}$, в виде

$$i_0(t) = \frac{U_m \sin\varphi}{L} \frac{(e^{-\delta t} - e^{-\alpha t})}{\alpha - \delta}, \tag{10}$$

где $\delta = R/L$ — коэффициент затухания RL цепи;

$$\underset{k=\overline{2,n}}{i_k(t)} = \frac{|U_m| U_{mk} \omega_k}{L[(\alpha - \delta)^2 + \omega_k^2]} \left\{ \ell^{-\delta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega_k} [(\delta - \alpha) \sin \omega_k t - \omega_k \cos \omega_k t] \right\}. \tag{11}$$

Заметим, что при $t = 0$ и $t = \infty$ $i_0 = i_k = 0$. При $\alpha = \infty$ $i_0 = i_k = 0$.

Уравнение (8) в изображениях Карсона имеет вид

$$U_m\left[\frac{p^2\sin\varphi + \omega_p\cos\varphi}{p^2+\omega^2} - \frac{p(p+\alpha)\sin\varphi + \omega_p\cos\varphi}{(p+\alpha)^2+\omega^2}\right] = i_1(p)L(\delta+p),$$

откуда

$$i_1(p) = \frac{U_m}{L}\left\{\frac{p^2\sin\varphi + \omega_p\cos\varphi}{(\delta+p)(p^2+\omega^2)} - \frac{p(p+\alpha)\sin\varphi + \omega_p\cos\varphi}{(\delta+p)[(p+\alpha)^2+\omega^2]}\right\}. \tag{12}$$

Из (12) видно, что $i_1(p)$ имеет четыре составляющих:

$$i_{11}(p) = \frac{U_m}{L}\left[\frac{p^2\sin\varphi}{(\delta+p)(p^2+\omega^2)}\right], \qquad i_{12}(p) = \frac{U_m}{L}\left[\frac{\omega_p\cos\varphi}{(\delta+p)(p^2+\omega^2)}\right],$$

$$i_{13}(p) = -\frac{U_m}{L}\left\{\frac{p(p+\alpha)\sin\varphi}{(\delta+p)[(p+\alpha)^2+\omega^2]}\right\}, \qquad i_{14}(p) = -\frac{U_m}{L}\left\{\frac{\omega_p\cos\varphi}{(\delta+p)[(p+\alpha)^2+\omega^2]}\right\}.$$

Определим оригиналы этих изображений по таблицам [7]

$$i_{11}(t) = \frac{U_m}{L}\sin\varphi\left[\frac{1}{\delta^2+\omega^2}(\delta\cos\omega t + \omega\sin\omega t - \delta\ell^{-\delta t})\right], \tag{13}$$

$$i_{12}(t) = \frac{U_m\omega\cos\varphi}{L}\left[\frac{1}{\delta^2+\omega^2}\left(\ell^{-\delta t} + \frac{\delta}{\omega}\sin\omega t - \cos\omega t\right)\right], \tag{14}$$

$$\begin{aligned} i_{13}(t) = -\frac{U_m\cos\varphi}{L}\Bigg\langle \frac{1}{(\alpha-\delta)^2+\omega^2}\left\{-\delta\ell^{-\delta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega}[\omega\delta\cos\omega t + (\omega^2+\alpha^2+\alpha\delta\sin\omega)]\right\} + \\ + \frac{\alpha}{(\alpha-\delta)^2\omega^2}\left\{\ell^{-\delta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega}[-\omega\cos\omega t + (\delta-\alpha)\sin\omega t]\right\}\Bigg\rangle, \end{aligned} \tag{15}$$

$$i_{14}(p) = -\frac{U_m\omega\cos\varphi}{L}\frac{1}{(\alpha-\delta)^2+\omega^2}\left\{\ell^{-\delta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega}[-\omega\cos\omega t + (\delta-\alpha)\sin\omega t]\right\}. \tag{16}$$

Итак,

$$i_1(t) = (13) + (14) + (15) + (16). \tag{17}$$

При $t = 0$ $i_{11} = i_{12} = i_{13} = i_{14} = 0$, при $\alpha = \infty$ $i_{13} = i_{14} = 0$, при $t = \infty$ $i_1(t) = I_a\sin(\omega t + \Psi)$, где $I_a = (U_m/(L(\delta^2+\omega^2)))\sqrt{A^2+B^2}$, $A = \omega\sin\varphi + \delta\cos\varphi$, $B = \omega\cos\varphi - \delta\sin\varphi$, $\Psi = \operatorname{arctg} B/A$ [8].

Перейдем к определению средних значений токов i_0, i_1, $\sum\limits_{k=2}^{n} i_k$ по формуле (4) с учетом (10), (11), (17)

$$I_{\text{ср}0} = \frac{2}{T}\int\limits_{\varphi/\omega}^{T/2} i_0(t)dt = \frac{U_m\omega\sin\varphi}{\pi}\left[\frac{1}{\delta}(\ell^{-\delta\varphi/\omega} - \ell^{-\delta\pi/\omega}) + \frac{1}{\alpha}(\ell^{-\alpha\varphi/\omega} - \ell^{-\alpha\pi/\omega})\right], \tag{18}$$

$$I_{\text{ср}11} = \frac{2}{T}\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2} \frac{U_m \sin\varphi}{L}\left[\frac{1}{\delta^2+\omega^2}(\delta\cos\omega t + \omega\sin\omega t - \delta\ell^{-\delta t})\right]dt =$$

$$= \frac{U_m \omega s \sin\varphi}{\pi L(\delta^2+\omega^2)}\left(1 - \frac{\delta}{\omega}\sin\frac{\varphi}{\omega} + \cos\frac{\varphi}{\omega} + \ell^{-\delta\pi/\omega} - \ell^{-\delta\varphi/\omega}\right), \tag{19}$$

$$I_{\text{ср}12} = \frac{2}{T}\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2} \frac{U_m \omega \sin\varphi}{L(\delta^2+\omega^2)}\left(\ell^{-\delta t} + \frac{\delta}{\omega}\sin\omega t - \cos\omega t\right)dt =$$

$$= \frac{U_m \omega s^2 \sin\varphi}{\pi L(\delta^2+\omega^2)}\left\{\delta\left[\ell^{-\delta\varphi/\omega} - \ell^{-\delta\pi/\omega} + \frac{1}{\omega^2}\left(1+\cos\frac{\varphi}{\omega}\right) - \frac{1}{\omega}\sin\frac{\varphi}{\omega}\right]\right\}, \tag{20}$$

$$I_{\text{ср}13} = -\frac{2U_m\sin\varphi}{TL[(\alpha-\delta)^2+\omega^2]}\left[(\alpha-\delta)\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\delta t}dt - \omega\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\sin\omega t dt + \right.$$

$$\left. + (\alpha-\delta)\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\cos\omega t dt\right]. \tag{21}$$

Для сокращения записи (21) представим в виде

$$I_{\text{ср}13} = a\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\delta t}dt + b\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\sin\omega t dt + c\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\cos\omega t dt, \tag{22}$$

где a, b, c — соответственно коэффициенты при интегралах в (21),

$$I_{\text{ср}13} = a\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\delta t}dt = -\frac{a}{\delta}\ell^{-\delta t}\Big|_{+\varphi/\omega}^{T/2} = \frac{a}{\delta}(\ell^{-\varphi\delta/\omega} - \ell^{-\delta T/2}). \tag{23}$$

В (22) второй и третий интегралы вычислим методом по частям [8]. В результате получаем

$$b\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\delta t}\sin\omega t dt = \frac{b\omega}{\alpha^2+\omega^2}\left[\ell^{-\alpha\pi/\omega} - \ell^{-\alpha\varphi/\omega}\left(\cos\frac{\varphi}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega^2}\sin\frac{\varphi}{\omega}\right)\right], \tag{24}$$

$$c\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\delta\alpha t}\cos\omega t dt = \frac{c\omega}{\omega^2+\alpha^2}\left[\ell^{-\alpha\varphi/\omega}\sin\frac{\varphi}{\omega} + \alpha\left(\ell^{-\alpha\pi/\omega} + \ell^{-\alpha\varphi/\omega}\cos\frac{\varphi}{\omega}\right)\right]. \tag{25}$$

Таким образом, $I_{\text{ср}13}$, выраженное через (23) с учетом (23)–(25), запишем в виде

$$-I_{\text{ср}13} = \frac{a}{\delta}(\ell^{-\varphi\delta/\omega} + \ell^{-\delta\pi/\omega}) + \frac{b\omega}{\alpha^2+\omega^2}\left\{\ell^{-\alpha\pi/\omega} + \ell^{-\alpha\varphi/\omega}\left(\cos\frac{\varphi}{\omega} + \frac{\alpha}{\omega^2}\sin\frac{\varphi}{\omega}\right) + \right.$$

$$+ \frac{c\omega}{\alpha^2+\omega^2}\left[-\ell^{-\alpha\varphi/\omega}\sin\frac{\varphi}{\omega} + \alpha\left(\ell^{-\alpha\pi/\omega} + \ell^{-\alpha\varphi/\omega}\cos\frac{\varphi}{\omega}\right)\right] =$$

$$= \frac{a}{\delta}(\ell^{-\varphi\delta/\omega} + \ell^{-\delta\pi/\omega}) + \frac{\omega\ell^{-\alpha\pi/\omega}}{\alpha^2+\omega^2}(b+c\alpha) + \frac{\omega}{\alpha^2+\omega^2}\ell^{-\alpha\varphi/\omega}(b+c\alpha) -$$

$$\left. - \frac{\omega}{\alpha^2+\omega^2}\ell^{-\alpha\varphi/\omega}\left(\sin\frac{\varphi}{\omega}\right)(c-b\alpha)\right\}. \qquad (26)$$

$$I_{\text{ср}14} = -\frac{2U_m\omega\cos\varphi}{TL}\frac{1}{[(\alpha-\delta)^2+\omega^2]}\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\left\{\ell^{-\delta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega}[-\omega\cos\omega t + (\delta-\alpha)\sin\omega t]dt\right\} =$$

$$= -\frac{2U_m\omega\cos\varphi}{TL}\frac{1}{[(\alpha-\delta)^2+\omega^2]}\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\delta t}dt + \frac{2U_m\omega\cos\varphi}{TL}\frac{1}{[(\alpha-\delta)^2+\omega^2]} \times$$

$$\times \int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\cos\omega t dt - \frac{2U_m\cos\varphi(\delta-\alpha)}{T\alpha[(\alpha-\delta)^2+\omega^2]}\int\limits_{+\varphi/\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\sin\omega t dt =$$

$$= d\int\limits_{+\varphi\omega}^{T/2}\ell^{-\delta t}dt + g\int\limits_{+\varphi\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\cos\omega t dt + f\int\limits_{+\varphi\omega}^{T/2}\ell^{-\alpha t}\sin\omega t dt, \qquad (27)$$

где d, g, f — соответственно коэффициенты при интегралах (27). Эти интегралы равны интегралам в (23), (24), (25). При этом в (27) вместо a из (23) необходимо подставить d, вместо b из (25) — g и вместо c из (25) — f. Тогда

$$I_{\text{ср}14} = \frac{d}{\delta}(\ell^{-\delta\varphi/\omega} - \ell^{-\delta\pi/\omega}) + \frac{\varphi\omega}{\alpha^2+\omega^2}\left[\ell^{-\alpha\pi/\omega} + \ell^{-\alpha\varphi/\omega}\left(\cos\frac{\varphi}{\omega} + \frac{\alpha}{\omega^2}\sin\frac{\varphi}{\omega}\right)\right] +$$

$$+ \frac{f\omega}{\alpha^2+\omega^2}\left[-\ell^{-\alpha\varphi/\omega}\sin\frac{\varphi}{\omega} + \alpha\left(\ell^{-\alpha\pi/\omega} + \ell^{-\alpha\varphi/\omega}\cos\frac{\varphi}{\omega}\right)\right]. \qquad (28)$$

Далее найдем среднее значение суммы затухающих токов $i_k(t)$, $k = \overline{2,n}$. Пределы интегрирования возьмем $0 \div T_k/2$. Тогда

$$I_{\text{ср}k} = \frac{2|U_m|}{m_k T_k L}\int\limits_0^{m_k T_k/2} U_{mk}\omega_k\left\{\ell^{-\delta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega_k}[(\delta-\alpha)\sin\omega_k t - \omega_k\cos\omega_k t]\right\} =$$

$$= \frac{2|U_m|U_{mk}\omega_k}{m_k T_k L[(\alpha-\delta)^2+\omega_k^2]}\int\limits_0^{m_k T_k/2}\ell^{-\delta t}dt + \frac{2|U_m|U_{mk(\delta-\alpha)}}{m_k T_k L[(\alpha-\delta)^2+\omega_k^2]}\int\limits_0^{m_k T_k/2}\ell^{-\alpha t}\sin\omega_k t dt -$$

$$- \frac{2|U_m|U_{mk}\omega_k}{m_k T_k L[(\alpha-\delta)^2+\omega_k^2]} \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\alpha t}\cos\omega_k t dt =$$

$$= h \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\delta t} dt + n \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\alpha t}\sin\omega_k t dt + r \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\alpha t}\cos\omega_k t dt, \qquad m_k = \frac{T}{T_k}, \tag{29}$$

где h, n, r — соответственно коэффициенты при интегралах в (29),

$$h \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\delta t} dt = \frac{h}{\delta}(1 - \ell^{-\delta\pi/\omega_k}), \tag{30}$$

$$n \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\alpha t}\sin\omega_k t dt = \frac{n\omega_k}{(\alpha^2+\omega_k^2)}(1 + \ell^{-\alpha\pi m_k/\omega_k}), \tag{31}$$

$$r \int\limits_0^{m_k T_k/2} \ell^{-\alpha t}\cos\omega_k t dt = \frac{r\alpha}{(\alpha^2+\omega_k^2)}(1 + \ell^{-\alpha\pi m_k/\omega_k}). \tag{32}$$

Итак,

$$I_{\text{ср}k} = \sum_{k=2}^{n}(30)+(31)+(32) =$$

$$= \sum_{k=2}^{n} \frac{h}{\delta}(1 - \ell^{-\delta\pi m_k/\omega_k}) + (n\omega_k + r\alpha)\frac{1}{\alpha^2+\omega_k^2}(1 + \ell^{-\alpha\pi m_k/\omega_k}), \tag{33}$$

а среднее значение $\sum\limits_{k=2}^{n} I_{\text{ср}k}$ с учетом (30)–(33) определяется так:

$$\sum_{k=2}^{n} I_{\text{ср}k} = \sum_{k=2}^{n} \frac{h}{\delta}(1 - \ell^{-\delta\pi m_k/\omega_k}) + (n\omega_k + r\alpha)\frac{1}{\alpha^2+\omega_k^2}(1 + \ell^{-\alpha\pi m_k/\omega_k}). \tag{34}$$

Таким образом, в результате проведенного исследования получена формула среднего значения тока в электроцепи с управляемыми диодами и с индуктивной нагрузкой. Для краткости запишем эту формулу в виде

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{ср}0} + \sum_{l=1}^{4} I_{\text{ср}1l} + \sum_{k=2}^{n} I_{\text{ср}k} = (18)+(19)+(20)+(26)+(28)+(34). \tag{35}$$

Формула (35), несмотря на свою громоздкость, более точно отражает процессы, происходящие в электроцепи. Заметим, что при каждом импульсе напряжения на индуктивной нагрузке ток $i(t)$ в начальном участке изменяется медленно из-за наличия гармоник $i_k(t)$, $k = \overline{2,n}$, обусловливающих эффект автоматической реструктуризации цепи [9]. В связи

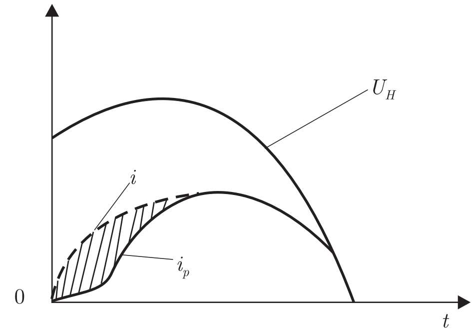

Рис. 3

с затуханием этих гармоник в каждом переходном процессе $I_{\text{ср}}$ цепи уменьшается по сравнению с (1). Пояснением к этому может быть график переходных процессов, изображенных на рис. 3, где U_H — импульс напряжения на индуктивной нагрузке; i — ток в цепи, рассчитанный обычным методом [4, 7]; i_p — ток, рассчитанный с учетом сингуларисного разложения (3) напряжения U_H.

Как видно из рис. 3, ток $i(t)$ нарастает в начальном участке быстрее тока $i_p(t)$. В последнем, как было отмечено, из-за наличия гармоник $|U_m|\ell^{-\alpha t}\sin\varphi\sum\limits_{k=2}^{n}U_{mk}\sin\omega_k t$ в напряжении $U_H(t)$ при использовании разложения (3) и автоматической реструктуризации RL цепи [9] происходит медленное нарастание тока i_p. Разница между $i(t)$ и $i_p(t)$ обозначена на рис. 3 заштрихованным участком. Эта разница обусловливает уменьшение $I_{\text{ср}}(t, i_p)$ по сравнению с $I_{\text{ср}}(t, i)$, что необходимо учитывать в расчетах на практике.

1. *Брухман С. С., Трофимов Н. А.* Тиристорные переключатели переменного тока. – Москва: Энергия, 1969. – 64 с.
2. *Евсеев Ю. А., Крылов С. С.* Симисторы и их применение в бытовой электроаппаратуре. – Москва: Энергоатомиздат, 1999. – 120 с.
3. *Энергетическая* электроника: Справочное пособие / Под ред. В. А. Лабунцова. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 461 с.
4. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. – Москва: Высш. шк., 1978. – 528 с.
5. *Божко А. Е.* Новая интерпретация переходных процессов в электрических цепях // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – С. 83–87.
6. *Божко А. Е.* О новой трактовке переходных процессов в электрических цепях переменного тока // Там само. – 2005. – № 4. – С. 81–86.
7. *Гинзбург С. Г.* Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – Москва: Сов. радио, 1959. – 404 с.
8. *Бронштейн И. Н, Семендяев К. А.* Справочник по математике. – Москва: ГИТТЛ, 1956. – 608 с.
9. *Божко А. Е.* Об автоматической реструктуризации электрических цепей с реактивными элементами при полигармонических входных сигналах // Доп. НАН України. – 2002. – № 11. – С. 101–103.

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

Поступило в редакцию 20.07.2007