

К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В. М. РАЗИН, Л. А. ВОЛЫНСКАЯ

(Представлена научным семинаром кафедры вычислительной техники)

В качестве регуляторов напряжения переменного тока получили распространение устройства, представляющие собой повышающий автотрансформатор, между концом основной обмотки которого и общей шиной, соединяющей нагрузку с клеммой источника переменного на-

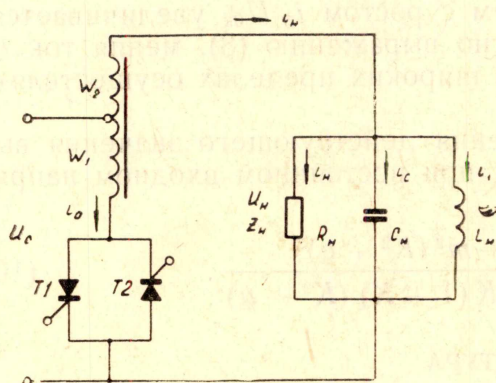


Рис. 1. Схема тиристорного регулятора напряжения переменного тока

пряжения, включен исполнительный орган, представляющий собой два включенных встречно-параллельно тиристора T_1, T_2 (рис. 1) [1, 2].

Особенностью рассматриваемых регуляторов напряжения переменного тока при $\frac{W_1}{W_2} > 1$

является то, что в псевдоустойчившемся режиме протекающий через исполнительный орган ток i_0 оказывается меньше номинального значения тока нагрузки i_n . Однако при сверхпереходных процессах величина тока i_0 может существенно превосходить номинальное значение тока нагрузки.

Это явление особенно сильно проявляется при работе регулятора на резонансную нагрузку с высокой добротностью.

В общем случае, если пренебречь потерями в автотрансформаторе, то, используя операторную форму записи, будем иметь для напряжения на нагрузке U_n и тока i_0 следующие выражения

$$U_n(p) = U_c(p) \frac{Z_n(p) [Z_0(p) + pL_2K(1+K)]}{Z_0(p) \cdot Z_n(p) + pL_2 [K^2Z_n(p) + Z_0(p)]}, \quad (1)$$

$$i_0(p) = U_c(p) \frac{[Z_n(p) + pL_2(1+K)]}{Z_0(p) \cdot Z_n(p) + pL_2 [K^2Z_n(p) + Z_0(p)]}. \quad (2)$$

В выражениях (1), (2)

$Z_n(p)$ — операторный импеданс цепи нагрузки;

$Z_0(p)$ — операторный импеданс цепи исполнительного органа;

L_2 — индуктивность последовательной обмотки автотрансформатора;

$$K = \frac{W_1}{W_2};$$

W_1 — число витков основной обмотки автотрансформатора;

W_2 — число витков последовательной обмотки автотрансформатора.

Если нагрузка представляет собой резонансный контур, образованный соединенными параллельно сопротивлением R_n , индуктивностью L_n и конденсатором C_n , то

$$Z_n(p) = \frac{p}{c_n \left(p^2 + \frac{p}{R_n c_n} + \frac{1}{L_n c_n} \right)}. \quad (3)$$

Как видно из выражения (1), в установившемся режиме максимальное значение напряжения U_n будет иметь место при $Z_0 \approx 0$. В этом случае

$$U_{n\max} = U_{mc} \frac{1+K}{K} \sin \omega t \quad (4)$$

Минимальное значение выходного напряжения регулятора соответствует случаю $Z_0 = 0$ и равно

$$U_{n\min} = \frac{U_{mc}}{\sqrt{1+m^2}} \sin(\omega t - \arctg m) \quad (5)$$

В выражении (5) $m = \frac{\omega L_2}{R_n}$

При этом ток, протекающий по катушке с индуктивностью L_n , будет равен

$$i_L = - \frac{U_{mc} \cdot Q}{R_n \cdot \sqrt{1+m^2}} \cdot \cos(\omega t - \arctg m) \quad (6)$$

где $Q = \omega C_n R_n = \frac{R_n}{\omega L_n}$ — добротность резонансного контура.

Для определения характера изменения во времени напряжения на нагрузке U_n и тока исполнительного органа i_o при мгновенном изменении сопротивления исполнительного органа от максимального значения ($Z_0 \approx \infty$) до минимального ($Z_0 = r_0$) необходимо решить при начальных условиях

$$U_n(0) = - \frac{U_{mc} \cdot m}{1+m^2} \cdot \cos \alpha_k \left(1 - \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k \right) \quad (7)$$

$$i_L(0) = - \frac{U_{mc} \cdot Q}{R_n (1+m^2)} \cdot \cos \alpha_k (1 + m \operatorname{tg} \alpha_k) \quad (8)$$

Уравнения (1), (2) и уравнение (9)

$$i_L(p) = U_c(p) \frac{Z_0(p) + pL_2K(1+K)}{Z_0(p)pL_n \left(1 + \frac{pL_2}{R_n} \right) + pL_2 [K^2pL_n + Z_0(p)(1+p^2L_nC_n)]} \quad (9)$$

Здесь α_k — момент коммутации тиристора исполнительного органа;

r_0 — минимальное сопротивление тиристорного исполнительного органа.

После мгновенного срабатывания тиристорного исполнительного органа в момент времени $\omega t_k = \alpha_k$ напряжение на выходе регулятора изменяется в соответствии с выражением

$$\begin{aligned}
 U_H = U_{mc} & \sqrt{\frac{1 + \frac{m^2 K^2 (1+K)^2}{a_0^2}}{1 + \frac{m^2 (K^2 + a_0^2)}{a_0^2}}} \sin \left[\omega t + \alpha_k + \right. \\
 & \left. + \operatorname{arctg} \frac{ma_0(1-a_0)}{a_0^2 + m^2 K^2 (K^2 + a_0^2) (1+K)} \right] + \frac{U_{mc} \cdot e^{-\frac{\omega t}{2Qa_0} (a_0 + K^2)}}{\sqrt{A}} \times \\
 & \times \left\{ \frac{\cos \alpha_k (1 + m \operatorname{tg} \alpha_k)}{1 + m^2} \sqrt{1 + \frac{1}{mQ}} \cdot \sqrt{A + \left[1 + m \frac{2Q \cdot a_0}{a_0 + K^2} \right.} \right. \\
 & \times \left. \left. \frac{1 - \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k}{1 + m \operatorname{tg} \alpha_k} \right]^2} \right\} \times \sin \left[\frac{\omega t}{2Qa_0} (a_0 + K^2) \sqrt{A} - \operatorname{arctg} \times \right. \\
 & \times \left. \frac{\sqrt{A}}{1 + \frac{2Qa_0}{m(a_0 + K^2)} \left(1 + \frac{1}{Qm} \right) \frac{1 + m \operatorname{tg} \alpha_k}{1 - \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k}} \right] + \\
 & + \frac{\sin \alpha_k \left[1 + \frac{m}{a_0} K (1+K) \operatorname{ctg} \alpha_k \right]}{\sqrt{1 + \frac{m^2}{a_0^2} (a_0^2 + K^2)^2}} \times \\
 & \times \sqrt{A + \left[1 - \frac{a_0}{mK(1+K)} \cdot \frac{1 - \frac{m}{a_0} K(1+K) \operatorname{tg} \alpha_k}{1 + \frac{a_0}{mK} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_k}{1+K}} \right]^2} \times \\
 & \times \sin \left[\frac{\omega t}{2Qa_0} (a_0 + K^2) \cdot \sqrt{A} + \operatorname{arctg} \times \right. \\
 & \times \left. \frac{\sqrt{A}}{\frac{2Qa_0}{(a_0 + K^2)} \cdot \frac{\left[1 - \frac{m}{a_0} K(1+K) \cdot \operatorname{tg} \alpha_k \right]}{mK(1+K) \left[1 + \frac{a_0}{mK} (1+K) \operatorname{tg} \alpha_k \right]} - 1} \right] + \\
 & + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{A}}{1 - \frac{2Qa_0}{(a_0 + K^2)^2 m}}. \tag{10}
 \end{aligned}$$

Здесь

$$A = \frac{4Q^2 a_0^2}{(a_0^2 + K^2)^2} \left(1 - \frac{1}{mQ} \right), \quad a_0 = \frac{r_0}{R_H}$$

При сверхпереходном процессе для тока i_0 имеем

$$\begin{aligned}
 i_0 = & \frac{U_{mc}}{r_0} \sqrt{\frac{1+m^2(1+K)^2}{1+\frac{m^2}{a_0^2}(K^2+a_0)^2}} \sin \left[\omega t + \alpha_k + \right. \\
 & \left. + \operatorname{arctg} \frac{mK(a_0+K)}{a_0+m^2(1+K)(K^2+a_0)} \right] + \frac{U_{mc} e^{-\frac{\omega t}{2Qa_0}(a_0+K^2)}}{\sqrt{A}} \times \\
 & \times \left\{ \frac{\sin [\alpha_k + \operatorname{arctg} m(1+K)]}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{1+m^2(1+K)^2}{1+\frac{m^2}{a_0^2}(K^2+a_0)^2}} \times \right. \\
 & \times \sqrt{A + \left\{ 1 - \frac{2Qa_0}{a_0+K^2} \operatorname{ctg} [\alpha_k + \operatorname{arctg} m(1+K)] \right\}^2} \times \\
 & \times \sin \left[\frac{\omega t}{2Qa_0} (a_0+K^2) \sqrt{A} + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{A}}{a_0+K^2} \operatorname{ctg} [\alpha_k + \operatorname{arctg} m(1+K)] - 1 \right. \\
 & \left. + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{A}}{1 - \frac{2Qa_0^2}{m(a_0+K^2)^2}} \right] - \frac{(a_0+K^2) \cdot K^2}{R_H \cdot 2Qa_0(1+m^2)} \cos \alpha_k \cdot (1+m \operatorname{tg} \alpha_k) \times \\
 & \times \sqrt{A + \left[1 + \frac{2Qa_0 m}{a_0+K^2} \cdot \frac{1 - \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k}{1 + \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k} \right]^2} \times \\
 & \times \sqrt{A + \left[1 - \frac{2Qa_0^2}{m(a_0+K^2)^2} \right]^2} \times \cos \left[\frac{\omega t}{2Qa_0} (a_0+K^2) \sqrt{A} - \operatorname{arctg} \times \right. \\
 & \times \left. \frac{1 + \frac{2Qa_0 m}{a_0+K^2} \cdot \frac{1 - \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k}{1 + \frac{1}{m} \operatorname{tg} \alpha_k}}{\sqrt{A}} - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{A}}{1 - \frac{2Qa_0^2}{m(a_0+K^2)^2}} \right] \left. \right\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

Как видно из выражения (11), при $Q \gg 1$ и $a_0 \ll 1$ непосредственно после момента коммутации ток через исполнительный орган определяется главным образом свободной составляющей тока $i_{0\text{св1}}$, обусловленной энергией, запасенной резонансным контуром до момента коммутации

$$\begin{aligned}
 i_{0\text{св1}} \simeq & - \frac{U_{mc} K^2 \cos \alpha_k (1+m \operatorname{tg} \alpha_k)}{a_0 R_H (1+m^2)} \sqrt{\frac{4Q^2 a_0^2}{K^4} - 1} \times \\
 & \times \sqrt{\frac{4Q^2 a_0^2}{K^4} - 1 + \left[1 + \frac{2Qa_0 \cdot (m - \operatorname{tg} \alpha_k)}{K^2 \cdot (1 - m \operatorname{tg} \alpha_k)} \right]^2} \cdot e^{-\frac{\omega K^2 t}{2Qa_0}} \times
 \end{aligned}$$

$$\times \cos \left[\frac{\omega t K^2}{2Qa_0} \sqrt{\frac{4Q^2 a_0^2}{K^4} - 1} - \arctg \frac{1 + \frac{2Qa_0 \cdot m - \operatorname{tg} \alpha_K}{K^2}}{\sqrt{\frac{4Q^2 a_0^2}{K^4} - 1}} - \arctg \sqrt{\frac{4Q^2 a_0^2}{K^4} - 1} \right] \quad (12)$$

Согласно выражению (12), при $\frac{2Qa_0}{K^2} > 1$ переходный процесс для тока $i_{\text{осв1}}$ колебательно-затухающий. При $\frac{2Qa_0}{K^2} = 1$

$$i_{\text{осв1}} = - \frac{U_{mc} \cdot K^2}{a_0 R_H (1 + m^2)} \cdot [m \cos \alpha_K - \sin \alpha_K] \cdot e^{-\frac{\omega K^2}{2Qa_0} t} \quad (13)$$

Для случая $\frac{2Qa_0}{K^2} < 1$ процесс затухания тока $i_{\text{осв1}}$ аperiodический и протекает без выбросов.

При добротности резонансного контура $60 \div 80$ обычно имеем, что $\frac{2Qa_0}{K^2} \geq 1$, а длительность сверхпереходного процесса для тока $i_{\text{осв1}}$

при частоте питающего напряжения 50 гц не превышает нескольких миллисекунд, т. е. к следующему моменту срабатывания тиристоров сверхпереходный процесс заканчивается.

Анализ выражения (12) показывает, что амплитудное значение свободной составляющей тока $i_{\text{осв1}}$ зависит от величины коэффициента a_0 , угла поджига тиристора исполнительного органа α_K . Зависимости $\frac{I_{\text{мосв1}}}{I_{\text{мн}}} = f(\alpha_K)$ при различных значениях a_0 , m и $K=1,4$

приведены на рис. 2. Амплитудное значение тока нагрузки регулятора $I_{\text{мн}}$ определено как отношение $\frac{U_{mc}}{R_H} \cdot \frac{1+K}{K}$.

Кривая 1 рассчитана для случая $m=2$, $a_0=0,01$, кривая 2 — для $m=5$, $a_0=0,01$, кривая 3 — $m=2$, $a_0=0,05$, кривая 4 — $m=5$, $a_0=0,05$. При $\alpha_K = \arctg m$ свободная составляющая тока $i_{\text{осв1}}$ равна нулю. С уменьшением величины коэффициента a_0 ток $i_{\text{осв1}}$ увеличивается.

Хотя при $a_0=0,01$ амплитудное значение тока $i_{\text{осв1}}$ в момент коммутации в десятки раз превосходит вынужденную составляющую тока $i_{\text{осв}}$, однако при $Q=60 \div 80$ мгновенное значение тока $i_{\text{осв}}$ уменьшается в десять раз уже через $0,002 \div 0,003 \text{ сек}$.

Полученное выражение (12) позволяет оценить кратковременные перегрузки, возникающие при первоначальном срабатывании исполнительного органа регулятора, работающего на резонансную нагрузку, и

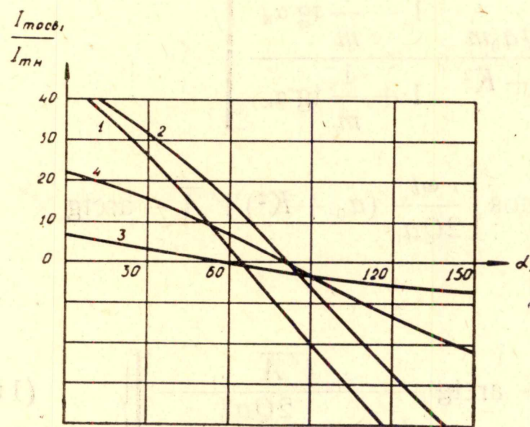


Рис. 2. Зависимость амплитуды тока $i_{\text{осв1}}$ от угла поджига тиристоров

выбрать тип тиристоров исполнительного органа, способных выдерживать эти перегрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Якушев. Применение тиристоров для стабилизации напряжения вспомогательных цепей электропоездов переменного тока типа ЭР-9. Труды ЛИИЖТа, вып. 277, 45, Л., 1968.

2. В. И. Некрасов, А. Я. Якушев. Особенности расчета ферро-тиристорного стабилизатора напряжения. Труды ЛИИЖТа, вып. 293, 85, Л.