Доклады Академии Наук СССР
1949. Том LXVII, № 4

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Академик В. П. НИКИТИН и Н. П. КУНИЦКИЙ

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАЛИЧИИ ТОКОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПУСКОВОГО ТОКА

В системах электропривода с электромашинной автоматикой получение оптимального пускового тока достигается размагничивающими ампервитками стабилизирующей и токовой обмотки электромашинного возбудителя — усилителя и с поперечным полем. Все величины выражаем в относительных единицах относительно номинальных значений, соответствующих номинальному напряжению генератора. Пренебрегаем незначительной постоянной времени $T_к$ короткозамкнутого контура.

Примем эдс возбудителя в первый период разгона — период нарастания тока i двигателя до $i_{\text{макс}}$ — постоянной и равной

$$\varepsilon_{an} = \frac{\varepsilon_{a_1} + \varepsilon_{a\,нез}}{2},$$

где $\varepsilon_{a\,нез}$ — эдс возбудителя, создаваемая его независимыми ампервитками $aw_{но}$, ε_{a_1} — минимальная эдс возбудителя в момент достижения током величины $i_{\text{макс}}$.

При значительных ε_{an} можно считать, что эдс генератора

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{an}\tau_м}{\delta},$$

где $\tau_м = t/T_м$; t — время; $\delta = T_{вн}/T_м$; $T_м = GD^2 n_0 / 375\, M_н$ — электромеханическая постоянная; $T_{вн}$ — электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения генератора. Время первого периода

$$\tau_m = \rho \ln \frac{\psi_c \varepsilon_{an}}{\varepsilon_{an} - \delta\,(i_{\text{макс}} - i_c)}, \tag{1}$$

где $\tau_m = t_m / T^м$; ρ — относительное сопротивление главной цепи; i_c — статический ток; $\psi_c = e^{i_c \delta / \varepsilon_{an}}$.

Для создания тока $i_{\text{макс}}$ необходима эдс возбудителя

$$\varepsilon_{an} = \frac{\left(\frac{i_{\text{макс}}}{\xi} - i_c\right)\delta}{\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{\rho}{\delta-\rho}}} + i_c\rho, \tag{2}$$

где $\xi = 0{,}75 \div 0{,}85$.

Для второго периода разгона — периода поддерживания тока i примерно постоянным — этот ток меняется по уравнению

$$i = i_{\text{макс}} - \operatorname{tg}\alpha\, \tau_м.$$

Здесь время $\tau_м$ отсчитывается от начала второго периода.

Эдс возбудителя

$$\varepsilon_{a1} = \varepsilon_1 + \delta\,(i_{\text{макс}} - i_c) - \delta\rho\,\mathrm{tg}\alpha; \tag{3}$$

эдс генератора при $\tau_м = 0$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{an}\left\{1 - \left[\frac{\varepsilon_{an} - \delta\,(i_{\text{макс}} - i_c)}{\psi_c\varepsilon_{an}}\right]^{\rho/\delta}\right\}. \tag{4}$$

Время второго периода

$$\tau_n = \frac{i_{\text{макс}} - i_c - \rho\,\mathrm{tg}\alpha}{\mathrm{tg}\alpha} - \sqrt{\frac{(i_{\text{макс}} - i_c - \rho\,\mathrm{tg}\alpha)^2}{\mathrm{tg}^2\alpha} + \frac{2\,(\varepsilon_1 - 1)}{\mathrm{tg}\alpha}}; \tag{5}$$

$$\text{при } \mathrm{tg}\alpha = 0 \qquad \tau_n = \frac{1 - \varepsilon_1}{i_{\text{макс}} - i_c}, \tag{6}$$

где $\tau_n = t_n / T_м$.

Максимальная эдс возбудителя в конце разгона

$$\varepsilon_{\text{макс}} = (i_{\text{макс}} - i_c - \rho\,\mathrm{tg}\alpha - \delta\,\mathrm{tg}\alpha)\,\tau_n - \frac{\mathrm{tg}\alpha\,\tau_n^2}{2} + \varepsilon_1 + \delta(i_{\text{макс}} - i_c) - \delta\rho\,\mathrm{tg}\alpha; \tag{7}$$

$$\text{при } \mathrm{tg}\,\alpha = 0 \qquad \varepsilon_{a\ \text{макс}} = 1 + \delta\,(i_{\text{макс}} - i_c). \tag{8}$$

Определив для заданных $i_{\text{макс}}$, $\mathrm{tg}\alpha$, δ и ρ величины ε_{an}, ε_{a_1}, $\varepsilon_{a\ нез}$, $\varepsilon_{a\ \text{макс}}$, τ_m и τ_n, находим ампервитки возбудителя $aw_{но}$, aw_{a_1} и $aw_{a\ \text{макс}}$, соответствующие эдс $\varepsilon_{a\ нез}$, ε_{a_1} и $\varepsilon_{a\ \text{макс}}$.

Затем определяем необходимые для получения оптимального тока:

1) стабилизирующие ампервитки — максимальные $= aw_{сто\ \text{макс}} = aw_{но} - aw_{a_1} - k_m\rho\,(i_{\text{макс}} - i_n)$ и минимальные $aw_{сто\ \text{мин}} = aw_{но} - aw_{a\ \text{макс}} - k_m\rho\,(i_{\text{макс}} - \mathrm{tg}\alpha\,\tau_n - i_n)$, где $k_m\rho\,(i - i_n)$ — токовые ампервитки; k_m — интенсивность действия токовой обмотки возбудителя; i_n — ток, соответствующий противодействующему напряжению в цепи токовой обмотки (при токе двигателя i_n начинает протекать в токовой обмотке ток);

2) среднее значение тангенса угла наклона к оси абсцисс кривой стабилизирующих ампервитков $aw_{сто} = f(t)$ за второй период разгона

$$\mathrm{tg}\,\beta_{ср} = \frac{aw_{сто\ \text{макс}} - aw_{сто\ \text{мин}}}{i_n};$$

3) начальное значение $\mathrm{tg}\beta_н$ этого тангенса при $\tau_м = 0$, если найти эдс возбудителя ε_a и его ампервитки aw_a и $k_m\rho\,(i - i_n)$ для времени, несколько превышающего t_m.

Выведенные на базе уравнений цепей стабилизирующего трансформатора максимальные стабилизирующие ампервитки

$$aw_{сто\ \text{макс}} = \frac{b_{сто}\varepsilon_{an}}{\sigma_p T_1 T_2 p_2}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{p_1}{p_1 - p_2}} \tag{9}$$

имеют место в момент времени

$$t_m = \frac{1}{p_1 - p_2}\ln\frac{p_2}{p_1}, \tag{10}$$

соответствующий моменту достижения током величины $i_{\text{макс}}$ (при $T_к = 0$). В формуле (9) $b_{ста}$ — интенсивность действия стабилизирующей обмотки, σ_p — коэффициент рассеяния трансформатора, T_1 и T_2 — постоянные времени его цепей, p_1 и p_2 — корни уравнения

$$p^2 aw_{cmo} + \frac{1}{\sigma_p}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right) p aw_{cmo} + \frac{aw_{cmo}}{\sigma_p T_1 T_2} = -\frac{b_{cma} i_A}{\sigma_p T_1 T_2 T_м} + \frac{b_{cma} \operatorname{tg}\alpha\, t}{\sigma_p T_1 T_2 T_м^2}, \quad (11)$$

где $i_A = i_{макс} - i_c - \rho\operatorname{tg}\alpha - \delta\operatorname{tg}\alpha$, являющегося уравнением стабилизирующих ампервитков для второго периода. Разрешая уравнение (11), находим выражение для среднего значения тангенса угла наклона $\operatorname{tg}\beta_{cp}$ кривой $aw_{cmo} = f(t)$ за второй период, которое должно быть равно найденному выше значению $\operatorname{tg}\beta_{cp}$.

Это выражение будет

$$\operatorname{tg}\beta_{cp} t_n = \frac{aw_{cmo\,макс}\, t_m}{\varepsilon_a \ln\gamma} \left\{ \left[\frac{\ln\gamma\, \varepsilon_{an}}{t_m(\gamma-1)} - \frac{\gamma^{\frac{1}{\gamma-1}}}{T_м} (i_{макс} - i_c - \rho\operatorname{tg}\alpha - \delta\operatorname{tg}\alpha) - \right.\right.$$
$$\left. - \frac{t_m(\gamma-1)\gamma^{\frac{1}{\gamma-1}} \operatorname{tg}\alpha(\gamma+1)}{\ln\gamma T_м^2 \gamma} \right] \left[\gamma(\gamma)^{-\frac{t_n}{t_m(\gamma-1)}} - \gamma + 1 - (\gamma)^{-\frac{\gamma t_n}{t_m(\gamma-1)}} \right] +$$
$$+ \left[\frac{\operatorname{tg}\beta_н \varepsilon_{an}}{aw_{cmo\,макс}} + \frac{(\gamma-1)\gamma^{\frac{1}{\gamma-1}} \operatorname{tg}\alpha\, t_m}{\ln\gamma T_м^2} \right] \left[\gamma^{-\frac{t_n}{t_m(\gamma-1)}} - \gamma^{-\frac{\gamma t_n}{t_m(\gamma-1)}} \right] -$$
$$\left. - \frac{(\gamma-1)\gamma^{\frac{1}{\gamma-1}} \operatorname{tg}\alpha\, t_n}{T_м^2} \right\}. \quad (12)$$

Здесь $aw_{cmo\,макс} < 0$, а $\operatorname{tg}\beta_{cp} > 0$ и $\operatorname{tg}\beta_4 < 0$.

Отсюда графически находим величину $\gamma = p_2/p_1$.

Затем определяем

$$p_1 = -\frac{\ln\gamma}{t_m(\gamma-1)}, \qquad p_2 = \gamma p_1,$$
$$b_{cma} = -\frac{aw_{cmo\,макс} t_m (\gamma-1)\gamma^{\frac{1}{\gamma-1}}}{\varepsilon_{an}\ln\gamma}. \quad (13)$$

Наконец, постоянные T_1 и T_2 определяются из уравнений

$$T_1 = -\frac{1}{2}\left(\frac{p_1+p_2}{p_1 p_2}\right) \pm \sqrt{\frac{(p_1+p_2)^2}{4p_1^2 p_2^2} - \frac{1}{\sigma_p p_1 p_2}} \quad (14)$$

и

$$T_2 = \frac{1}{\sigma_p p_1 p_2 T_1} \quad (15)$$

если задаться σ_p.

При критическом $\sigma_{pк} = \frac{4p_1p_2}{(p_1+p_2)^2}$ $T_1 = T_2 = -\frac{p_1+p_2}{2p_1p_2}$.

Если $\sigma_p < \sigma_{pк}$, то величины T_1 и T_2 — мнимые, и получить заданный оптимальный ток нельзя. При $\sigma_p > \sigma_{pк}$ T_1 и T_2 различные.

Для электропривода с данными $i_{макс} = 1{,}5$; $\delta = 1$; $\rho = 0{,}1$; $T_м = 1$; $k_m = 5$; $i_n = 0$; $\operatorname{tg}\alpha = 0$ и $i_c = 0$ имеем: $\varepsilon_{an} = 2{,}58$; $\varepsilon_{a1} = 1{,}72$; $\varepsilon_{a\,макс} =$

$= 2{,}5$; $\varepsilon_{a\,нез} = aw_{но} = 3{,}45$; $t_m = 0{,}087$; $t_n = 0{,}523$; полное время разгона $t_m + t_n = 0{,}61$; $\alpha w_{сто\,макс} = -0{,}984$; $aw_{сто\,мин} = -0{,}199$; $\mathrm{tg}\beta_{ср} = \mathrm{tg}\beta_н = 1{,}5$; $\gamma = 3{,}05$; $p_1 = -6{,}26$; $p_2 = -19{,}08$; $b_{ста} = 0{,}105$. При $\sigma_{рк} = 0{,}74$ $T_1 = T_2 = 0{,}106$.

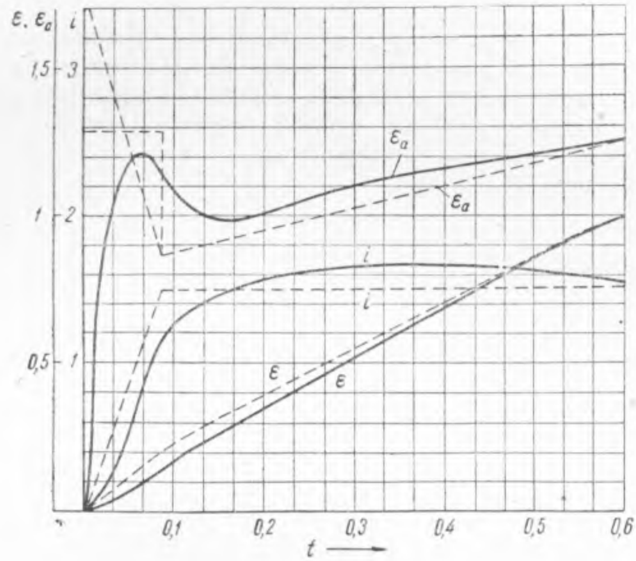

Рис. 1

На рис. 1 построены для этого электропривода кривые $\varepsilon_a = f(t)$, $\varepsilon = f(t)$ и $i = f(t)$: сплошными линиями — по точному графо-аналитическому (с учетом $T_к$) методу и пунктиром — по предлагаемому приближенному методу.

Поступило
4 VI 1949