

**РАСЧЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ  
ПО ИНТЕГРАЛЬНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

Ю. Г. МЕЩЕРЯКОВ, Е. В. КОНОНЕНКО

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей  
электротехники

При разработке двигателей, предназначенных для работы при переменной частоте, возникает задача оптимизации их параметров. Здесь рассматривается метод расчета оптимальных параметров асинхронного двигателя при геометрических размерах, типе обмоток, качестве материалов и условиях охлаждения, соответствующих двигателям серии А02. Оптимальным считается вариант, соответствующий минимуму годовых приведенных затрат [1]. В качестве искомым величин целесообразно принять функциональные параметры — электромагнитный момент  $M$  и абсолютное скольжение  $\beta$ , а также число витков в фазе обмотки статора  $W_1$ . С целью сокращения числа переменных можно исключить из их состава число витков  $W_1$ , рассчитывая его после нахождения оптимальных величин  $M$  и  $\beta$ , исходя из заданного значения напряжения на зажимах двигателя. В этом случае требуется определить оптимальные значения параметров  $M$  и  $\beta$ , минимизирующие интегральную величину удельных годовых приведенных затрат [2], которая выражается через параметры схемы замещения двигателя в соответствии с [3] с учетом насыщения магнитной цепи по [4] следующим образом:

$$I_1 = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \varepsilon(M, \beta, \alpha) d\alpha, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon(M, \beta, \alpha) &= \frac{C + E_H K}{M\omega} = \frac{b_1 \left( \frac{k_{\Pi}' r_1}{\alpha} + b_3 \right)}{\frac{H\beta}{b_2} - M} + \\ &+ \beta \left( \frac{b_4}{\alpha} + b_5 \right) + \frac{b_6}{\beta} (k_r + k_B f_H \alpha) + \left( \frac{k'}{\omega_{1H} \alpha} + b_7 \alpha \right) \frac{1}{M} - b_8; \\ b_1 &= \frac{m_1 G k_I}{\omega_{1H}}; \quad b_2 = \frac{m_1 r_2'}{c_M^2 \omega_{1H}}; \quad b_3 = k_K' \left( \frac{x_{0H}}{k_I} + x_1 \right); \\ b_4 &= k_{\Pi}' \left( \frac{r_1 k_I}{r_2'} + 1 \right); \quad b_5 = \frac{k_K'}{r_2'} (x_1 k_I + x_2'); \\ b_6 &= \frac{k_{\Pi}' b_2 f_H}{\omega_{1H}}; \quad b_7 = \frac{k_{\Pi}' k_M}{\omega_{1H}}; \quad b_8 = k_K' \operatorname{tg} \varphi_0. \end{aligned}$$

$C$  — годовые эксплуатационные расходы;  $E_n$  — нормативный коэффициент экономической эффективности;  $K$  — единовременные капитальные вложения;  $M$  — электромагнитный момент;  $\omega$  — скорость вращения ротора;  $m_1$  — число фаз;  $\omega_{1n}$  — номинальная синхронная скорость вращения магнитного поля;  $f_n$  — номинальная частота;  $k_I = 1,09$ ;  $G$  и  $H$  — коэффициенты, полученные при аппроксимировании кривой намагничивания:  $G = 1,68 I_{он}^2$ ;  $H = 2,51 \Phi_n^2$ ;  $I_{он}$  и  $\Phi_n$  — номинальные значения намагничивающего тока и магнитного потока;  $\text{tg } \varphi_0 = 0,484$ ;  $k_M$  — коэффициент механических потерь;  $k_r$  и  $k_B$  — коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов;  $\alpha = \frac{f}{f_n}$  — частота тока;

$$C_M = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 k_{w1} W_1; \quad p — \text{число пар полюсов};$$

$k_{п}' = s_3 t - k_k' \text{tg } \varphi_0$ ;  $s_3$  — удельные затраты на покрытие потерь электроэнергии;  $t$  — время работы двигателя в течение года;

$$k'_{к} = (E_{к} + E_{н}) k_{у\kappa};$$

$E_{к}$  — годовая норма амортизации для компенсирующего устройства;  $k_{у\kappa}$  — удельные капитальные вложения в компенсирующее устройство; через  $r$  и  $x$  обозначены параметры схемы замещения двигателя в соответствии с [3]. Задача решается при условии  $M = \text{const}$ ,  $\beta = \text{const}$ .

Минимум функции (1) при отсутствии ограничений и заданном допустимом перегреве обмоток статора находится путем решения задачи на условный экстремум:

$$\frac{\partial H_1}{\partial \beta} = 0; \quad \frac{\partial H_1}{\partial M} = 0; \quad \Theta = \Theta_d, \quad (2)$$

$$\text{где } H_1 = I_1 + \lambda_1 (\Theta_d - \Theta),$$

$\lambda_1$  — множитель Лагранжа;  $\Theta_d$  — допустимая величина перегрева обмотки статора;  $\Theta$  — перегрев обмотки статора, выраженный в функции  $M$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  для двигателей серии А02 по упрощенной формуле:

$$\Theta = \frac{P_r}{S_o (W_o + k_o \sqrt{\alpha})};$$

$$P_r = \frac{m_1 r_1 k_1 G}{\frac{H\beta}{b_2 M} - 1} + \left[ \left( \frac{r_1 k_1}{r_2'} + 1 \right) \omega_{1n} \beta + k_{с\alpha} f_n b_2 \frac{\alpha}{\beta} \right] M + k_M \alpha^2,$$

$P_r$  — потери, вызывающие нагревание двигателя;  $S_o$  — площадь поверхности активной части [5];  $\omega_o$  — коэффициент теплоотдачи в неподвижный воздух;  $k_o$  — коэффициент интенсивности обдувания [6]. Перегрев  $\Theta$  достаточно вычислять для значений  $\alpha = \alpha_1$  и  $\alpha = \alpha_2$ , где  $\alpha_2$  и  $\alpha_1$  — максимальная и минимальная частоты в заданном диапазоне.

Оптимальные значения  $M$  и  $\beta$  определяются в результате решения системы уравнений (2) и рассчитываются при помощи следующих формул:

$$\frac{\left( a_1 - \frac{a_2}{\beta^2} - \frac{a_3}{\varphi_1} \right) \left[ \frac{g_1}{\varphi_1} - \frac{g_4}{(\varphi_2 - \sqrt{\varphi_2^2 - \varphi_3})^2} \right] (\varphi_2 - \sqrt{\varphi_2^2 - \varphi_3})}{\left[ \left( \frac{a_3}{\varphi_1} + a_1 \right) \beta + \frac{a_2}{\beta} \right] \left( g_2 - \frac{g_3}{\beta^2} - \frac{g_5}{\varphi_1} \right)} = 1; \quad (3)$$

$$M = \varphi_2 - \sqrt{\varphi_2^2 - \varphi_3}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \omega_{1H} \left( \frac{r_1 k_1}{r_2'} + 1 \right); \quad a_2 = k_{ca} f_H b_2 \alpha; \\
 a_3 &= m_1 r_1 k_1 G \frac{H}{b_2}; \quad a_4 = \frac{a_1 H}{b_2}; \\
 a_5 &= k_M \alpha^2 - \frac{a_2 H}{b_2} - \frac{a_3 b_2}{H} - \Theta_\partial S_0 (W_0 + k_0 \sqrt{\alpha}); \\
 a_6 &= \frac{H}{b_2} \left[ \Theta_\partial S_0 (W_0 + k_0 \sqrt{\alpha} - k_M \alpha^2) \right]; \\
 \varphi_1 &= \left( \frac{H\beta}{b_2} - \varphi_2 + \sqrt{\varphi_2^2 - \varphi_3} \right)^2; \quad \varphi_2 = \frac{(a_4 \beta^2 - a_5) \beta}{2(a_1 \beta^2 + a_2)}; \\
 \varphi_3 &= \frac{a_6 \beta^2}{a_1 \beta^2 + a_2}; \quad g_1 = b_1 \left[ \frac{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{(\alpha_2 - \alpha_1)} k_{п'} r_1 + b_3 \right]; \\
 g_2 &= b_5 + \frac{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{(\alpha_2 - \alpha_1)} b_4; \quad g_5 = \frac{g_1 H}{b_2}; \\
 g_3 &= b_6 \left[ \frac{(\alpha_2^2 - \alpha_1^2)}{2(\alpha_2 - \alpha_1)} k_B f_H + k_\Gamma \right]; \\
 g_4 &= \frac{k' \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\omega_{1H} (\alpha_2 - \alpha_1)} + \frac{b_7 (\alpha_2^2 - \alpha_1^2)}{2(\alpha_2 - \alpha_1)}.
 \end{aligned}$$

Оптимальная величина скольжения  $\beta$  находится из уравнения (3). Оптимальная величина момента  $M$  вычисляется по формуле (4). Для двигателя А02-42-4 в диапазоне частот 5—50 гц при  $M = \text{const}$  и  $\beta = \text{const}$  получаются следующие оптимальные величины:  $M = 26 \text{ нм}$ ;  $\beta = 0,021$ . Если неизвестно, какая из частот  $\alpha_1$  или  $\alpha_2$  является критической по нагреву, то расчет (3), (4) следует вести для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и выбирать оптимальный вариант с меньшим значением момента, что необходимо для обеспечения допустимого перегрева. По найденным значениям момента и абсолютного скольжения можно известным образом [1, 3, 4, 5] определить все технико-экономические показатели двигателя: мощность, токи, перегрузочную способность, перегрев, к.п.д. и другие величины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Н. Чарахчян, А. П. Воскресенский. Методика технико-экономической оценки и выбора оптимальных асинхронных электродвигателей общего применения. Труды ВНИИЭМ, т. 7, М., ЦИТИ, 1959.
2. Ю. Г. Мещеряков. Принципы оптимизации параметров и режимов регулирования электродвигателей при переменной частоте тока. Настоящий сборник.
3. А. А. Булгаков. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М., «Наука», 1955.
4. Е. В. Кононенко, Ю. Г. Мещеряков. Законы экономического частотного регулирования для асинхронного двигателя с насыщающейся магнитной цепью. Электротехническая промышленность, серия «Электрические машины», вып. 9(31), М., 1973.
5. Д. И. Санников, В. А. Жадан. Расчет перегрева обмотки статора при проектировании оптимального асинхронного двигателя. Известия ТПИ, т. 212, Томск, изд. ТГУ, 1971.
6. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. Л., ГЭИ, 1958.