

НАГРЕВ И ПРЕДЕЛЫ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО С НАИМЕНЬШИМИ ГОДОВЫМИ ПРИВЕДЕННЫМИ ЗАТРАТАМИ

Е. В. КОНОНЕНКО, Ю. Г. МЕЩЕРЯКОВ

При регулировании частоты и напряжения на зажимах асинхронного двигателя имеется возможность обеспечить его работу в режиме, обладающем наилучшими экономическими показателями. Это осуществляется экономически обоснованным выбором рабочего режима.

В результате исследований, проводимых в Томском политехническом институте, установлено, что наиболее экономичному режиму работы асинхронного двигателя соответствует следующий закон изменения абсолютного скольжения, полученный из условия обеспечения минимума годовых приведенных затрат (см. приложение):

$$\beta = \sqrt{\frac{k_n(a_3 + a_4 k_{ca} \alpha) + k_k[\alpha c_2 - (a_3 + a_4 k_{ca} \alpha) \operatorname{tg} \varphi_0]}{k_n(1 + a_1 + a_2 k_{ca} \alpha) + k_k[\alpha c_1 - (a_1 + a_2 k_{ca} \alpha) \operatorname{tg} \varphi_0]}} \quad (1)$$

где

$$\beta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_{1H}}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad \text{— синхронная скорость вращения магнитного поля;}$$

ω_2 — скорость вращения ротора;

$\alpha = \frac{\omega_1}{\omega_{1H}}$ — относительная частота тока статора;

$$a_1 = \frac{(r_0^2 + x_{02}^2)k_r}{r_2' z_0^2}; \quad a_2 = \frac{x_2'^2}{c_E^2 f_{1H} m_1 r_2'}; \quad a_3 = \frac{r_2' k_r}{z_0^2};$$

$$a_4 = \frac{r_2'}{c_E^2 f_{1H} m_1}; \quad k_r = r_1 + \frac{k_0}{m_1}; \quad k_{ca} = k_r + k_b f_{1H} \alpha;$$

$$c_1 = \frac{x_2'}{r_2'} \left[\frac{x_0 x_2'}{z_0^2} + \frac{(r_0^2 + x_{02}^2)x_1}{z_0^2 x_2'} + 1 \right]; \quad c_2 = \frac{r_2'(x_0 + x_1)}{z_0^2};$$

$x_1, x_2', x_0, r_0, r_1, r_2'$ — параметры T-образной схемы замещения асинхронного двигателя;

$z_0^2 = x_0^2 + r_0^2; x_{02} = x_0 + x_2'; m_1$ — число фаз;

k — коэффициент добавочных потерь;

k_{Γ} и $k_{\text{в}}$ — коэффициенты потерь в стали на гистерезис и вихревые токи;

$s_{\text{Е}}$ — постоянная, включающая число витков и обмоточный коэффициент;

$k_{\text{п}}$ и $k_{\text{к}}$ — величины, равные годовым приведенным затратам на 1 кВт потерь мощности, руб/год кВт и на компенсацию 1 квар реактивной мощности, руб/год квар.

$$k_{\text{п}} = s_{\text{э}} t; \quad k_{\text{к}} = s_{\text{к}} t = (E_{\text{к}} + E_{\text{н}}) k_{\text{ук}} + p_{\text{ук}} s_{\text{э}} t;$$

$s_{\text{э}}$ — удельные затраты на покрытие потерь энергии, руб/квт-час;
 t — время работы двигателя в год, час/год;

$s_{\text{к}}$ — удельные затраты на компенсацию реактивной энергии, руб/квар час;

$E_{\text{к}}$ — годовая норма амортизации для компенсирующего устройства, 1/год;

$E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент экономической эффективности, 1/год;

$k_{\text{ук}}$ — удельные капитальные вложения в компенсирующие устройства, руб/квар;

$p_{\text{ук}}$ — удельные активные потери на компенсацию, кВт/квар.

Для осуществления возможности использования режима (1) необходимо иметь представление о тепловом состоянии двигателя, соответственно которому устанавливаются пределы регулирования и выбирается его мощность. Данная задача решается для закрытых обдуваемых двигателей серии АО2.

Согласно [1], превышение температуры обмотки статора

$$\theta = \frac{P_{\Gamma}}{S_0 W}, \quad (2)$$

где

P_{Γ} — потери, вызывающие нагревание двигателя;

$S_0 = \pi D_j l + \frac{1}{2} \pi D_j^2$ — площадь поверхности активной части;

D_j и l — наружный диаметр и длина статора;

W — условный коэффициент теплоотдачи, равный плотности теплового потока через единицу поверхности S_0 , отнесенной к одному градусу среднего перегрева обмотки статора.

Для расчета W используется упрощенная формула, полученная на основании [1, 2] с экспериментальной проверкой в диапазоне скоростей

$$\nu = \frac{n}{n_{\text{н}}} = 0 \div 2:$$

$$W = W_0 + k_{\theta} \sqrt{\nu}. \quad (3)$$

Здесь W_0 — коэффициент теплоотдачи в неподвижный воздух [3]. Величина k_{θ} рассчитывается из условия равенства W и коэффициента теплоотдачи двигателя по [1] α_0 в диапазоне $\nu = 0,7 \div 2$ для нескольких значений скорости ν_i .

$$k_{\theta} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_0 - W_0}{\sqrt{\nu_i}}.$$

Необходимые данные по расчету принимаются из [1, 2].

Непосредственное использование методик [1, 2] для расчета перегрева дает точные результаты в области $\nu = 0,7 \div 2$, но заметное сниже-

ние точности расчета для малых скоростей вращения и сложность математической записи θ приводят к необходимости получения упрощенной и действительной во всем диапазоне $v=0 \div 2$ формулы. Использование формулы (3) позволяет с удовлетворительным приближением определить перегрев и вычислить пределы регулирования скорости без применения специальных вычислительных средств.

Потери P_r принимаются равными

$$P_r = P_{\varepsilon 1H} i_1^2 + P_{\varepsilon 2H} i_2'^2 + P_{гн} \alpha \varphi^2 + P_{вн} \alpha^2 \varphi^2 + P_{дн} i_1^2 + P_{мн} v^2, \quad (4)$$

где

$P_{\varepsilon 1H}$, $P_{\varepsilon 2H}$ — номинальные потери в обмотках статора и ротора;
 $P_{гн}$ и $P_{вн}$ — номинальные потери в стали на гистерезис и вихревые токи;

$P_{дн}$ и $P_{мн}$ — номинальные добавочные и механические потери;

$i_1 = \frac{I_1}{I_{1H}}$; $i_2' = \frac{I_2'}{I_{2H}}$; $\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_H}$ — кратности токов в обмотках статора и ротора и магнитного потока.

Токи и магнитный поток записываются через момент на валу $\mu \frac{M}{M_H}$ абсолютное скольжение β и параметры схемы замещения:

$$i_1^2 = \mu k_{1H} \left(\frac{x_{0H}}{x_0} \right)^2 \left(\frac{r_2'^2}{\beta} + x_{02}^2 \beta \right); \quad (5)$$

$$k_{1H} = \frac{1}{\frac{r_2'^2}{\beta_H} + (x_{0H} + x_2')^2 \beta_H};$$

$$i_2'^2 = \frac{\mu \beta}{\beta_H}; \quad (6)$$

$$\varphi^2 = \mu k_{сн} \left(\frac{r_2'^2}{\beta} + x_2'^2 \beta \right); \quad (7)$$

$$k_{сн} = \frac{1}{\frac{r_2'^2}{\beta_H} + x_2'^2 \beta_H},$$

β_H — номинальное скольжение;

x_{0H} — номинальное сопротивление взаимной индукции.

Формула перегрева (2) с учетом (3) ÷ (7) записывается в виде

$$\theta = \frac{\mu k_{1H} \left(\frac{x_{0H}}{x_0} \right)^2 (P_{\varepsilon 1H} + P_{дн}) \left(\frac{r_2'^2}{\beta} + x_{02}^2 \beta \right) + P_{\varepsilon 2H} \frac{\mu \beta}{\beta_H} + \rightarrow}{S_0 (W_0 + k_\theta \sqrt{v})} \rightarrow + k_{сн} (P_{гн} + P_{вн} \alpha) \alpha \mu \left(\frac{r_2'^2}{\beta} + x_2'^2 \beta \right) + P_{мн} v^2. \quad (8)$$

По формуле (8) может быть рассчитан перегрев для любого режима работы двигателя. Для этого достаточно подставить вместо β значение, соответствующее принятому закону управления. Подстановка функции (1) в (8) даст формулу перегрева в режиме с минимальными затратами.

Расчет с помощью формул (1) и (8) для малых скоростей вращения сопровождается погрешностью, возрастающей с уменьшением скорости. Для допустимого по нагреву диапазона скоростей проанализировано состояние параметров двигателей серии АО2 третьего и четвертого габаритов, работающих в режиме с минимальными затратами. Основной причиной, влияющей на точность расчета, является насыщение магнитной цепи двигателя по пути потока взаимной индукции, возрастающее по мере уменьшения скорости.

Насыщение учитывается нелинейной зависимостью намагничивающего тока $i_0 = \frac{I_0}{I_{0н}}$ от магнитного потока $\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_n}$ в соответствии с кривой намагничивания асинхронной машины

$$i_0^2 = \frac{g_k}{\frac{h_k}{\varphi^2} - 1} \quad (9)$$

Коэффициенты g_k и h_k составляют 1,68 и 2,51 для указанных выше двигателей.

С учетом (9) получено следующее выражение закона изменения скольжения, удовлетворяющее условию работы двигателя с минимальными годовыми приведенными затратами:

$$\beta = e_1 + k_{\partial 1} \mu + (e_2 - k_{\partial 1} \mu) \sqrt{\frac{\nu}{2}}; \quad (10)$$

$$e_1 = \sqrt{\frac{g_k k_{сн} r_2'^2 I_{0н}^2}{\frac{h_k}{\beta_n} \left(I_{2н}^2 + \frac{P_{\partial 2н} I_{1н}^2}{P_{\partial 1н} + P_{лн}} \right)}};$$

$$k_{\partial 1} = \frac{k_{сн} r_2'^2}{h_k}; \quad k' = k_r + 2 k_{\partial 1};$$

$$e_2 = \sqrt{\frac{k_n(a_3 + 2 a_4 k') + k_k[2 c_2 - (a_3 + 2 a_4 k') \operatorname{tg} \varphi_n]}{k_n(1 + a_1 + 2 a_2 k') + k_k[2 c_1 - (a_1 + 2 a_2 k') \operatorname{tg} \varphi_n]}} e_1.$$

Оптимальная величина абсолютного скольжения насыщенного двигателя (10) зависит от момента на валу скорости вращения ротора, конструктивных параметров двигателя и экономических факторов (затрат на компенсацию реактивной энергии и на потери энергии, времени работы в году, оптимального $\operatorname{tg} \varphi_n$ и др.).

Перегрев обмотки статора в режиме с минимальными затратами рассчитывается при подстановке формулы (10) в (8). В формуле (8) учитывается изменение x_0 при помощи вытекающей из (9) формулы

$$x_0 = \frac{c_E f_{1н} \Phi_n}{I_{0н}} \sqrt{\frac{h_k - \varphi^2}{g_k}}.$$

График зависимости перегрева обмотки статора от скорости вращения ротора для двигателя АО2-42-4 с номинальным моментом на валу, рассчитанный по формулам (8) и (10), дан на рис. 1.

Учет изменения x_0 чрезмерно усложняет формулу для расчета пределов регулирования скорости в режиме с минимальными затратами. При величинах скольжения, соответствующих (10), можно допустить

в (8) $x_0 = \text{const}$. На основании этого получена из (8) с учетом (10) приближенная формула для вычисления предельных значений скорости для заданного θ и $\mu = \text{const}$ при регулировании с минимальными затратами:

$$v_n = (d_1 \pm \sqrt{d_1^2 - d_2})^2, \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{\frac{1}{2} \theta S_0 (W_0 c_{13} + k_\theta c_{03}) - \mu c_{03} c_{13} a'}{\mu c_{13}^2 a' + \mu r_2'^2 P_{\text{сн}} k_{\text{сн}} + P_{\text{мн}} (c_{03} + c_{13}) - \theta S_0 k_\theta c_{13}};$$

$$d_2 = \frac{\mu r_2'^2 (P_{\text{э1н}} + P_{\text{лн}}) k_{1н} + \mu c_{03}^2 a' - \theta S_0 W_0 c_{03}}{\mu c_{13}^2 a' + \mu r_2'^2 P_{\text{сн}} k_{\text{сн}} + P_{\text{мн}} (c_{03} + c_{13}) - \theta S_0 k_\theta c_{13}};$$

$$c_{03} = e_1 + k_{\text{э1}} \mu; \quad c_{13} = \frac{e_2 - k_{\text{э1}} \mu}{\sqrt{2}};$$

$$a' = x_{02}^2 (P_{\text{э1н}} + P_{\text{лн}}) k_{1н} + \frac{P_{\text{э2н}}}{\beta_n}.$$

Нижний предел регулирования соответствует меньшему значению v_n в (11). Верхнее предельное значение скорости получается больше синхронной скорости двухполюсной машины, поэтому можно обходиться без его вычисления.

Формула (11) дает уменьшенные на 15÷25% значения скорости при вычислении нижнего предела регулирования. Более точно v_n может быть определено расчетом перегрева для скоростей, близких к вычисленным по (11).

Для сравнения закона (10) с наиболее распространенными на практике законами частотного управления сделан расчет перегрева и предельных значений скорости для режима $\beta = \text{const}$, совпадающего при $\mu = \text{const}$ с режимом $\varphi = \text{const}$. Перегрев рассчитан по формуле (8) при $\beta = \beta_n$, $\mu = 1$, и график $\theta(v)$ для двигателя АО2-42-4 приведен на рис. 1.

Величина v_n для $\beta = \text{const}$, $\mu = \text{const}$ рассчитывается по формуле

$$v_n = (b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - b_2})^2;$$

$$b_1 = \frac{\frac{1}{2} \theta S_0 k_\theta}{\mu r_2'^2 P_{\text{сн}} k_{\text{сн}} \frac{1}{\beta} + P_{\text{мн}}};$$

$$b_2 = \frac{\mu r_2'^2 k_{1н} (P_{\text{э1н}} + P_{\text{лн}}) \frac{1}{\beta} + \mu \beta a' - \theta S_0 W_0}{\mu r_2'^2 P_{\text{сн}} k_{\text{сн}} \frac{1}{\beta} + P_{\text{мн}}}.$$

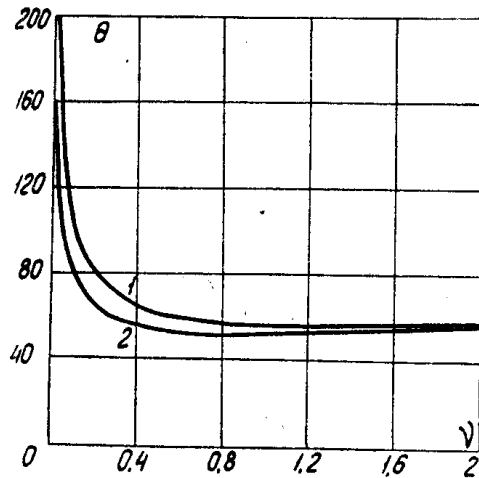


Рис. 1. Перегрев в функции скорости вращения в режимах с номинальным скольжением (кривая 1) и с минимальными затратами (кривая 2)

Согласно рис. 1 режим с минимальными затратами характеризуется меньшим перегревом, чем режим $\beta = \beta_{н}$, и более широкими пределами регулирования скорости. Для двигателя АО2-42-4 при $\mu = 1$ предельные значения $v_{п}$ для максимально допустимого перегрева $\Theta = 80^\circ$ составляют 0,24 в режиме $\beta = \beta_{н}$ и 0,11 в режиме с минимальными затратами. Разница между указанными значениями $v_{п}$ возникает за счет меньшей величины потерь в режиме (10). Верхний предел скорости в обоих режимах практически не ограничивается.

Данное сравнение подтверждает технико-экономические преимущества режима (10), особенно для случая глубокого регулирования скорости вниз от номинальной, когда применение режима (10) не только сокращает общие затраты, но и дает возможность уменьшить установленную мощность двигателя.

Вывод

Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования режима (10) для асинхронного двигателя с регулируемой частотой. Применение указанного режима позволит улучшить экономические показатели работы двигателя при одновременном расширении пределов регулирования скорости.

Приложение

Экономичность двигателя определяется величиной годовых приведенных затрат [4, 5]

$$Z = C + E_{н}K, \quad (12)$$

где

Z — годовые приведенные затраты, руб/год;

C — годовые эксплуатационные расходы;

K — единовременные капитальные вложения;

$E_{н}$ — нормативный коэффициент экономической эффективности.

Для асинхронного двигателя формула годовых приведенных затрат (12) принимает вид:

$$Z = S_{э}t(\Sigma P + p_{ук}Q_{к}) + (E_{к} + E_{н})K_{к}, \quad (13)$$

где

$K_{к} = K_{ук} Q_{к}$ — капитальные затраты на компенсирующее устройство;

$Q_{к} = Q_1 - P_1 \operatorname{tg} \varphi_{д}$ — мощность компенсирующего устройства;

Q_1 и P_1 — потребляемые двигателем реактивная и активная мощности;

ΣP — потери мощности в двигателе; остальные обозначения соответствуют данным к формуле (1).

Исследование на минимум функции (12), выраженной через скольжение β , момент μ и частоту α , приводит к получению формулы (1).

При управлении двигателем в соответствии с (1), затраты (13) уменьшаются за счет сохранения во всем диапазоне регулирования оптимального соотношения между значениями потерь и потребляемой двигателем реактивной мощности. Благодаря этому достигается заметное

снижение затрат по сравнению с известными законами частотного управления, такими как $\gamma = \alpha \sqrt{\mu}$; $\beta = \beta_n$; $\Phi = \Phi_n$; $\Sigma P = \Sigma P_{\min}$; $I_1 = I_{\min}$ и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. И. Санников, В. А. Жадап. Расчет перегрева обмотки статора при проектировании оптимального асинхронного двигателя. Известия ТПИ, т. 212, 1971.
2. В. А. Жадап, Ю. В. Копылов, Д. И. Санников. Методика теплового расчета закрытых асинхронных двигателей малой мощности. Известия ТПИ, т. 212, 1971.
3. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. ГЭИ, 1958.
4. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. «Электричество», 1959, № 10.
5. А. Я. Бергер. Вопросы экономики при проектировании электрических машин. М., «Высшая школа», 1967.