

9.11. ПОТЕРИ И КПД

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические, вентиляционные, механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = sf_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны [6].

В пусковых режимах f_2 близка к f_1 и потери в стали ротора соответственно возрастают, однако при расчете пусковых характеристик потери находят только для определения нагрева ротора за время пуска. Наибольшими потерями в пусковых режимах являются электрические потери в обмотках. Они во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит сколько-нибудь заметной погрешности в расчет.

Основные потери в стали статоров асинхронных машин определяют в соответствии с (6.4) по следующей формуле:

$$P_{\text{ст.осп}} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{\text{зсп}}^2 m_{\text{з1}}), \quad (9.187)$$

где $p_{1,0/50}$ — удельные потери (табл. 9.28) при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц; β — показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания; для большинства электротехнических сталей $\beta = 1,3 \dots 1,5$; $k_{\text{да}}$ и $k_{\text{дз}}$ — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приблизительно можно принять $k_{\text{да}} = 1,6$ и $k_{\text{дз}} = 1,8$; для машин большей мощности $k_{\text{да}} = 1,4$ и $k_{\text{дз}} = 1,7$; B_a и $B_{\text{з1сп}}$ — индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл; m_a , $m_{\text{з1}}$ — масса стали ярма и зубцов статора, кг:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}} \gamma_{\text{с}}; \quad (9.188)$$

$$m_{\text{з1}} = h_{\text{з1}} b_{\text{з1сп}} Z_1 l_{\text{ст1}} k_{\text{с1}} \gamma_{\text{с}}; \quad (9.189)$$

h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = 0,5(D_a - D) - h_{\text{п1}};$$

$h_{\text{з1}}$ — расчетная высота зубца статора, м; $b_{\text{з1сп}}$ — средняя ширина зубца статора, м:

$$b_{\text{з1сп}} = (b_{\text{з1max}} + b_{\text{з1min}})/2;$$

$\gamma_{\text{с}}$ — удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_{\text{с}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Т а б л и ц а 9.28. Удельные потери в стали, Вт/кг, толщиной 0,5 мм при индукции $B = 1$ Тл и частоте перемагничивания $f = 50$ Гц

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг	Марка стали	Удельные потери, Вт/кг
2013	2,5	2312	1,75
2212	2,2	2412	1,3
2214	2		

Добавочные потери в стали (добавочные потери холостого хода) подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора (рис. 9.53, а), Тл:

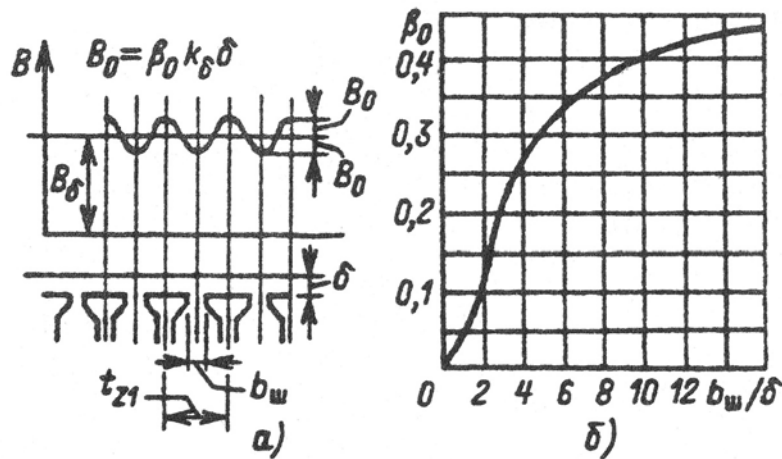


Рис. 9.53. К расчету поверхностных потерь в асинхронных машинах:
 а — пульсация индукции в воздушном зазоре; б — зависимость $\beta_0 = f(b_{ш}/\delta)$

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} k_{\delta} B_{\delta}. \quad (9.190)$$

Для зубцов статора β_{01} зависит от отношения ширины шлица пазов ротора к воздушному зазору: $\beta_{01} = f(b_{ш2}/\delta)$; для зубцов ротора — от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору: $\beta_{02} = f(b_{ш1}/\delta)$. Зависимость $\beta_0 = f(b_{ш}/\delta)$ приведена на рис. 9.53, б.

По B_0 и частоте пульсаций индукции над зубцами, равной $Z_2 n$ для статора и $Z_1 n$ для ротора, рассчитывают удельные поверхностные потери, т. е. потери, приходящиеся на 1 м^2 поверхности головок зубцов статора и ротора:

для статора

$$p_{\text{пов1}} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000} \right)^{15} (B_{01} t_{z2} \cdot 10^3)^2; \quad (9.191)$$

для ротора

$$p_{\text{пов2}} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000} \right)^{15} (B_{02} t_{z1} \cdot 10^3)^2. \quad (9.192)$$

В этих выражениях $k_{01(2)}$ — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери; если поверхность не обрабатывается (двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки), то $k_{01(2)} = 1,4 \dots 1,8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160 \text{ кВт}$) $k_{01(2)} = 1,7 \dots 2,0$; $n = n_c(1 - s) \approx n_c$ — частота вращения двигателя, об/мин.

Полные поверхностные потери статора, Вт,

$$P_{\text{пов1}} = p_{\text{пов1}} (t_{z1} - b_{ш1}) Z_1 l_{ст1}. \quad (9.193)$$

Полные поверхностные потери ротора, Вт,

$$P_{\text{пов}2} = p_{\text{пов}2}(t_{Z2} - b_{\text{ш}2})Z_2l_{\text{ст}2}. \quad (9.194)$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов $B_{\text{пул}}$, Тл: для зубцов статора

$$B_{\text{пул}1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{Z1}} B_{Z1\text{ср}}; \quad (9.195)$$

для зубцов ротора

$$B_{\text{пул}2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{Z2}} B_{Z2\text{ср}}. \quad (9.196)$$

В этих формулах $B_{Z1\text{ср}}$ и $B_{Z2\text{ср}}$ — средние индукции в зубцах статора и ротора, Тл:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(b_{\text{ш}1}/\delta)^2}{5 + b_{\text{ш}1}/\delta}; \\ \gamma_2 &= \frac{(b_{\text{ш}2}/\delta)^2}{5 + b_{\text{ш}2}/\delta}. \end{aligned} \right\} \quad (9.197)$$

При открытых пазах на статоре или на роторе при определении γ_1 и γ_2 в (9.197) вместо $b_{\text{ш}1}$ или $b_{\text{ш}2}$ подставляют расчетную ширину раскрытия паза, равную:

$$b'_{\text{ш}1(2)} = \frac{b_{\text{ш}1(2)}}{3} \left(1 + \frac{0,5t_{Z1(2)}}{t_{Z1(2)}b_{\text{ш}1(2)} + k_8} \right) \quad (9.198)$$

(индекс 1 при расчете $b'_{\text{ш}1}$, индекс 2 при расчете $b'_{\text{ш}2}$).

Значения коэффициента k_8 в зависимости от отношения $b_{\text{п}}/\delta$ для открытых пазов приведены на рис. 9.54.

Пульсационные потери в зубцах статора

$$P_{\text{пул}1} \approx 0,11 \left(\frac{Z_2^n}{1000} B_{\text{пул}1} \right)^2 m_{Z1}; \quad (9.199)$$

пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{\text{пул}2} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1^n}{1000} B_{\text{пул}2} \right)^2 m_{Z2}. \quad (9.200)$$

В этих формулах m_{Z1} — масса стали зубцов статора, кг, определяется по (9.189); m_{Z2} — масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{Z2} = Z_2 h_{Z2} b_{Z2\text{ср}} l_{\text{ст}2} k_{c2} \gamma_c, \quad (9.201)$$

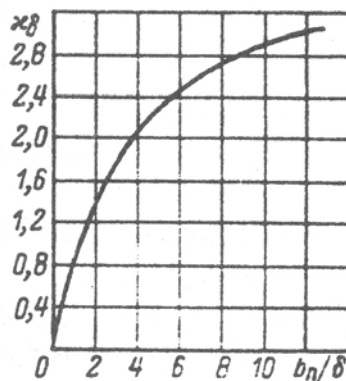


Рис. 9.54. К расчету пульсационных потерь в асинхронных машинах

где h_{z2} — расчетная высота зубца ротора, м; b_{z2cp} — средняя ширина зубца ротора, м:

$$b_{z2cp} = (b_{z2max} + b_{z2min})/2.$$

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно малы, так как в пазах таких роторов $b_{ш2}$ мало и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не проводят.

В общем случае добавочные потери в стали

$$P_{ст.доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} \quad (9.202)$$

и полные потери в стали асинхронных двигателей

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб}. \quad (9.203)$$

Обычно $P_{ст.доб}$ приблизительно в 5—8 раз меньше, чем $P_{ст.осн}$.

Электрические потери в асинхронных двигателях рассчитывают раздельно в обмотках статоров и роторов.

Электрические потери во всех фазах обмотки статора, Вт,

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (9.204)$$

Электрические потери во всех фазах обмотки фазного ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (9.205)$$

Электрические потери в обмотке короткозамкнутого ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = Z_2 I_2^2 r_2, \quad (9.206)$$

или

$$P_{э2} = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (9.207)$$

Электрические потери в щеточном контакте $P_{э.щ}$, Вт, фазных роторов асинхронных двигателей, не имеющих приспособлений для подъема щеток и замыкания накоротко контактных колец при номинальном режиме работы,

$$P_{э.щ} = m_2 \Delta U_{щ} I_{к.к}, \quad (9.208)$$

где $\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в скользящем контакте щетка—кольцо, В; принимается в зависимости от марки щеток по табл. П4.2; $I_{к.к}$ — ток в кольце, А; при соединении обмотки ротора в звезду $I_{к.к} = I_2$; при соединении обмотки ротора в треугольник (при $m_2 = 3$) $I_{к.к} = \sqrt{3} I_2$.

Механические и вентиляционные потери в асинхронных двигателях рассчитывают по приближенным формулам, полученным из опыта проектирования и эксплуатации двигателей. Коэффициент трения (K_T) учитывает конструкцию, скорость вращения, число пар

полюсов, мощность двигателя. Его размерность изменяется в зависимости от вида формулы для определения $P_{\text{мех}}$ (9.209—9.213).

Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в двигателях с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с короткозамкнутым ротором и вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах, Вт,

$$P_{\text{мех}} \approx K_T(n/1000)^2(10D)^3; \quad (9.209)$$

$K_T = 5$ при $2p = 2$; $K_T = 6$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м;
 $K_T = 6$ при $2p = 2$; $K_T = 7$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a > 0,25$ м.
 В двигателях с внешним обдувом ($0,1 \leq D_a \leq 0,5$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_T(n/10)^2D_a^4; \quad (9.210)$$

$K_T = 1$ для двигателей с $2p = 2$ и $K_T = 1,3(1 - D_a)$ при $2p \geq 4$.

В двигателях с радиальной системой вентиляции средней и большой мощности

$$P_{\text{мех}} = 1,2 \cdot 2p\tau^3(n_k + 11) \cdot 10^3, \quad (9.211)$$

где n_k — число радиальных вентиляционных каналов; при отсутствии радиальных каналов $n_k = 0$.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции

$$P_{\text{мех}} = K_T(n/1000)^2(10D_{\text{вент}})^3, \quad (9.212)$$

где $D_{\text{вент}}$ — наружный диаметр вентилятора, м; в большинстве конструкций можно принять $D_{\text{вент}} \approx D_a$; $K_T = 2,9$ для двигателей с $D_a \leq 0,25$ м; $K_T = 3,6$ для двигателей с $D_a = 0,25 \dots 0,5$ м.

В двигателях большой мощности ($0,5 < D_a < 0,9$ м)

$$P_{\text{мех}} = K_T(10D_a)^3. \quad (9.213)$$

В этом выражении коэффициент K_T принимается по табл. 9.29.

Таблица 9.29. К расчету механических потерь двигателей большой мощности

$2p$	2	4	6	8	10	12
K_T	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Потери на трение щеток о контактные кольца, Вт, рассчитывают для двигателей с фазными роторами при отсутствии приспособлений для подъема щеток и закорачивания контактных колец в номинальном режиме работы:

$$P_{\text{тр.щ}} = K_{\text{тр}}\rho_{\text{щ}}S_{\text{щ}}v_k, \quad (9.214)$$

где $K_{\text{тр}}$ — коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,16—0,17); $\rho_{\text{щ}}$ — давление на контактной по-

верхности щеток, кПа (см. табл. П4.2); $S_{щ}$ — общая площадь контактной поверхности всех щеток, м²; v_k — линейная скорость поверхности контактных колец, м/с.

Добавочные потери при нагрузке асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т. е. токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1...2 % (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает средние расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5 % номинальной потребляемой мощности. При расчетах потерь и КПД двигателей в режимах, отличных от номинального, значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату токов:

$$P_{доб} = P_{доб.ном}(I_1/I_{1ном})^2. \quad (9.215)$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \Sigma P/P_1, \quad (9.216)$$

где ΣP — сумма всех потерь в двигателе, Вт.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{х.х} = \sqrt{I_{х.х.а}^2 + I_{х.х.р}^2}. \quad (9.217)$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{элх.х.}}{mU_{1ном}}. \quad (9.218)$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными:

$$P_{элх.х} = mI_{\mu}^2 r_1. \quad (9.219)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{х.х.р} \approx I_{\mu}. \quad (9.220)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_{х.х} = I_{х.х.а}/I_{х.х}. \quad (9.221)$$