

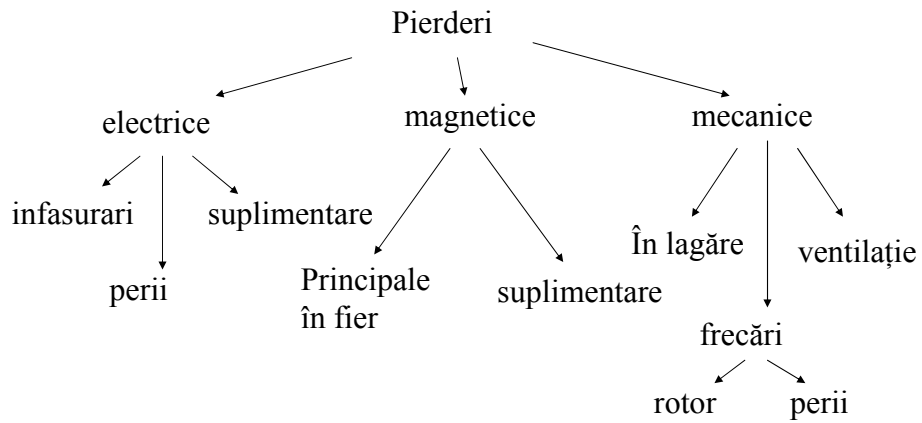
Calculul pierderilor mașinilor electrice

Pierderi în mașini electrice
rotative.

Pierderile mașinilor electrice

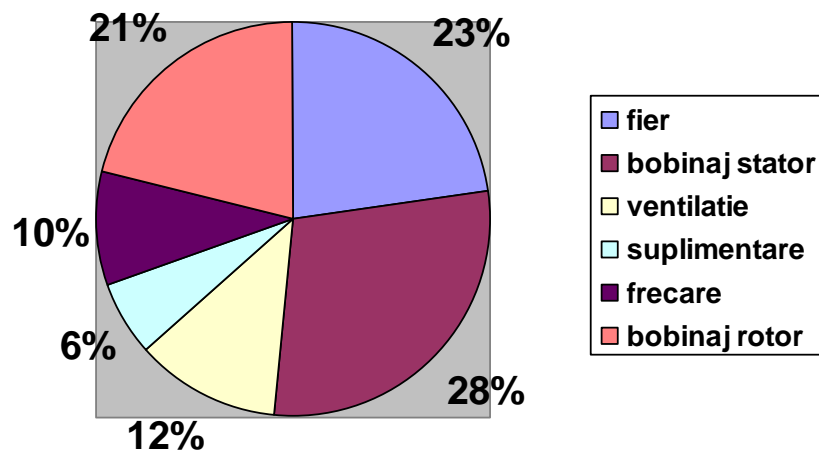
- Pierderi în înfășurări:
 - pierderi în înfășurări: principale și suplimentare,
 - pierderi de trecere,
- Pierderi în fier:
 - pierderi principale,
 - pierderi suplimentare în gol și în sarcină.
- Pierderi mecanice :
 - pierderi prin frecare în lagăre și la perii,
 - pierderi prin ventilație.

Clasificarea pierderilor



Pierderi în motoare electrice

Pierderile motorului de inducție de 2,2 kW:



Pierderi în înfășurări

Pierderi principale

$$p_b = m \cdot R \cdot i^2$$

rezistența

$$R = \rho \frac{L}{A_c}$$

Rezistivitatea depinde de: material
temperatură

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot v)$$

cupru $\alpha = \frac{1}{235 + v_a}$ $\rho_0 = 17,84 \cdot 10^9 \text{ } \Omega\text{m}$

Aluminiu $\alpha = 0,0037$ $\rho_0 = 34 \cdot 10^9 \text{ } \Omega\text{m}$

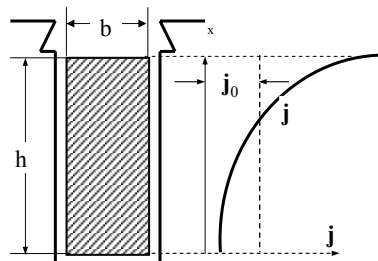
Pierderi în înfășurări

Pierderi suplimentare

- Refulării curentului
- Distribuției neuniforme pe conductoare în paralel
- Formei diferite a curentului

Se determină: *coeficienții de creștere a rezistenței*

Refulara curentului în creștătură.



Factorul de refulare

$$\alpha = \sqrt{\frac{b \cdot n}{b_c} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \rho}}$$

n număr conductoare pe lățimea creștăturii

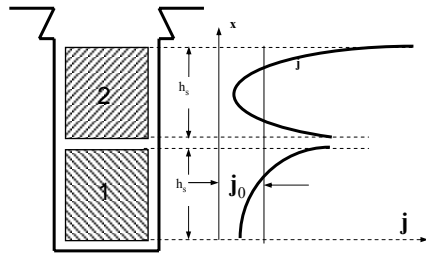
Pierderi în înfășurări

Înălțimea redusă $\xi = \alpha \cdot h$

Coefficientul de creștere a rezistenței din cauza refulării curentului

$$k_{cs1} = \xi \frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi} = \varphi(\xi)$$

Refularea curentului în cazul înfășurării în dublu strat



Depinde de defazajul curenților γ

Coefficientul de creștere a rezistenței pentru al doilea strat

$$k_{cs2} = \varphi(\xi) + \frac{I_1^2 + I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \gamma}{I_2^2} \psi(\xi)$$

unde
$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{sh\xi - \sin 2\xi}{ch\xi + \cos 2\xi}$$

Pierderi în înfășurări

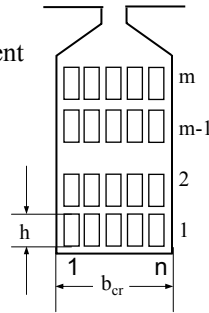
Mai multe conductoare în paralel

Dacă prin cele $m \times n$ conductoare circulă același curent

În cazul conductoarelor rotunde
$$k_{cs} = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{5} \psi(\xi)$$

$$k_{cs} = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 0,2}{5} \psi(\xi)$$

Refularea curentului în cazul conductoarelor în aer



Pentru un singur conductor rotund

Înălțimea redusă
$$\xi' = \frac{3 \cdot \pi}{40} \alpha' \cdot d$$

Coefficientul de creștere a rezistenței

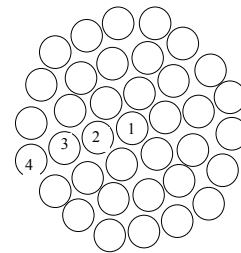
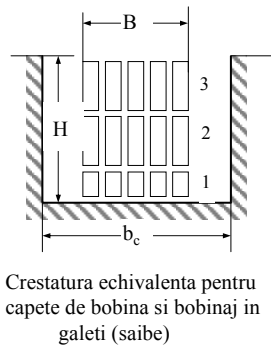
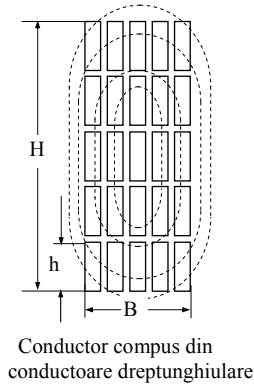
Factorul de refulare

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \rho}}$$

$$k_{fd} = 1 + \psi(\xi')$$

Pierderi în înfășurări

La capete de bobină mai multe conductoare parcurse de același curent



$$b_c = B + 1,2 \cdot H$$

Pierderi în înfășurări

Conductoare dreptunghiulare

$$k_f = \frac{m-0,8}{36} \xi^4$$

Conductoare rotunde

$$k_f = \frac{3 \cdot m \cdot (m-1) - 2}{122} \xi^4$$

m număr conductoare pe înălțime sau după rază

Factorul de majorare a rezistenței pentru întregul bobinaj

$$k_{rm} = \frac{k_c \cdot l_c + k_f \cdot l_f}{l_c + l_f}$$

Unde l_c , l_f sunt lungimile porțiunilor din creștătură respectiv în aer.

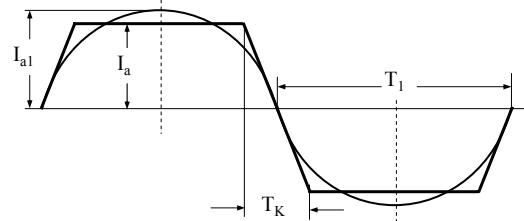
Pierderi în înfășurări

Factorul de creștere din cauza formei curentului

La mașini de c.c

Factorul de majorare

$$k_s = 1 + \sum_{v=3}^{\infty} (k_{rv} - 1) \left(\frac{I_v}{I} \right)^2$$



Forma curbei curentului în conductoarele indusului.

Factorul de creștere a rezistenței
armonicii v

$$k_{rv} = 1 + \frac{4}{3\pi} m^2 \cdot \xi^2 \frac{\ell_c}{\ell_c + \ell_f} \cdot k_K$$

Factorul din cauza comutației

$$K_k = \frac{1}{1,1 + \sigma}$$

u este numărul de secții pe creștătură

$$\sigma = \frac{9}{\xi^2} \cdot \frac{b_{pe} + b_k \cdot (u-1)}{\tau} \cdot \frac{D}{D_K}$$

Pierderi în înfășurări

Pierderi de trecere la perii

ΔU_p Căderea de tensiune la perii

Mașina de cc 1 V 2 V

Mașina de ca 1,25 V

pierderi

$$p_t = n_{pe} \cdot \Delta U_p \cdot I$$

La mașini cu câmp transversal

$$p_{ts} = n_{pe} \cdot b_{pe} \frac{U_{peq}^2}{\rho_{peq}} K_v$$

Pierderi în înfășurări

Pierderi principale $p_b = m \cdot R \cdot i^2$

rezistența $R = \rho \frac{L}{A_c}$ Rezistivitatea depinde de: **material**
temperatura

Pierderi suplimentare

Factorul de refulare $\alpha = \sqrt{\frac{b \cdot n_{cb}}{b_c} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \rho}}$

Înălțimea redusă $\xi = \alpha \cdot h$

Coefficientul de creștere a rezistenței din cauza refulării curentului

$$k_{cs} = \varphi(\xi) + \frac{n_{ch}^2 - 1}{3} \psi(\xi) \quad k_{rm} = \frac{k_c \cdot \ell_c + k_f \cdot \ell_f}{\ell_c + \ell_f}$$

Pierderi mecanice

Pierderi prin frecări în lagăre

Lagăre orizontale cu rulmenți $p_t = 0,015 \frac{F_f}{D_{cb}} v_{cb} \quad [W]$

Lagăre orizontale cu alunecare cu ungere cu ulei

$$p_f = \frac{26}{v_\ell} d_f \cdot \ell_f \cdot v_f^{1,5} \quad [W]$$

Lagăre orizontale la mașini mari, de mare viteză

$$p_f = 23 \cdot \ell_f \frac{50}{v_\ell} v_f^{1,5} \cdot \sqrt{\lambda_{50} \frac{F_f}{\ell_f} d_f \cdot \left(1 + 4 \frac{d_f}{\ell_f}\right)} \quad [W]$$

Lagăre verticale

$$p_f = F_f \cdot v \cdot \mu \quad \mu = f\left(\frac{F_f}{S_f}, v, \theta\right) = [0,001 \div 0,008]$$

Pierderi mecanice

Pierderi prin ventilație

$$p_r = \gamma \cdot Q \cdot V_v^2 \cdot K \quad [W]$$

Pierderi prin frecarea rotorului cu aerul

$$p_{fv} = C \cdot n^2 \cdot D^5 \cdot \left(1 + C_1 \frac{\ell}{D}\right) \quad [W]$$

Pierderi prin frecare la perii

$$p_{fpe} = p_{pe} \cdot \mu_{pe} \cdot S_{pe} \cdot V_c \quad [W]$$

Presiunea $p_{pe} = 2 \text{ N/cm}^2$ Viteza colectorului $V_c = 2 \div 30 \text{ m/s}$

Coefficient de frecări $\mu_{Fe} = 0,1 \div 0,4$

Pierderi în fier

Pierderi principale în fier

Pierderi specifice prin istereză magnetică

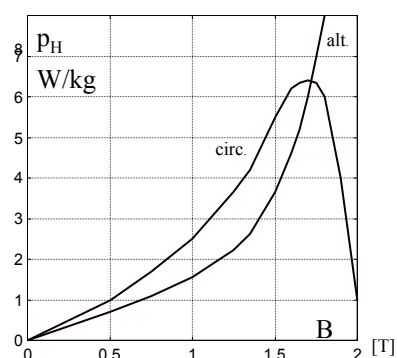
$$p_{sH} = C_H \cdot f \cdot B^{1,6} \cdot k_{Hm} \cdot k_{Hnu}$$

$$p_{Hs} = \sigma_H \cdot f \cdot B^2 \cdot k_{Hm} \cdot k_{Hnu} \cdot k_{Hp}$$

k_{Hnu} coeficient de neuniformitate

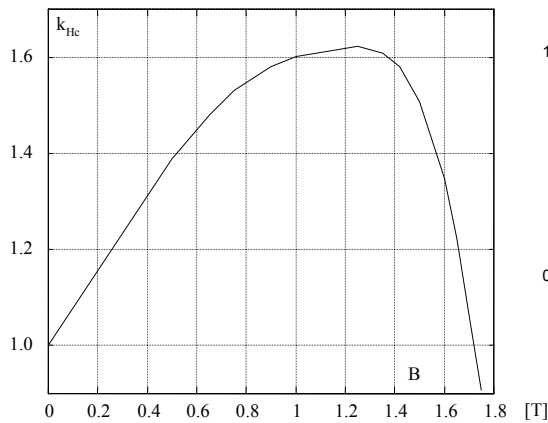
k_{Hp} coeficient de prelucrare

k_{Hm} coeficient de majorare a pierderilor specifice datorita reacției curenților turbionari.

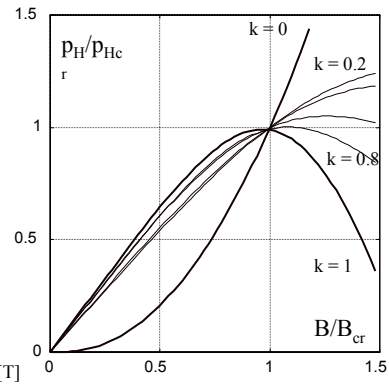


Pierderile specifice prin istereza pentru tabla mediu aliata.

Pierderi în fier



Cresterea pierderilor prin isteriza la remagnetizarea prin rotire.



Pierderile prin isteriza la remagnetizare mixta.

Pierderi în fier

Tipul tolei	Conținut Si	p_0	σ_H	σ_F
Unitate de măsură	%	w/kg	J/(kg Te ²)	Js/(kg Te ²)
Normală 1 mm	0,4÷0,8	8	0,048	7680
0,5 mm		3,6		1920
Slab aliată	0,6÷1,2	3	0,047	1040
Mediu aliată	1,8÷2,3	2,3	0,038	640
Tare aliată 0,5 mm	3,6÷4,2	1,7	0,0285	440
0,35 mm		1,3		215
specială	5	1	0,015	140

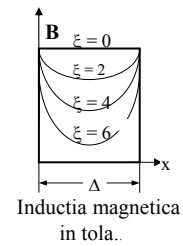
Pierderi în fier

Pierderi specifice prin curenți turbionari

$$p_{Fs} = \sigma_F (\Delta \cdot t \cdot B)^2 k_{Fm} \cdot k_{Fnu} \cdot k_{Fp}$$

Luarea în considerare a reacției curenților turbionari

$$\xi = \alpha \cdot \Delta \quad \text{si} \quad \alpha = \sqrt{\frac{\mu \omega}{\rho}}$$



Pierderi în fier

$$K_{Fm} = \frac{3 \operatorname{sh} \xi - \sin \xi}{\xi \operatorname{ch} \xi - \cos \xi}$$

$$K_{Hm} = \frac{\xi \operatorname{sh} \xi + \sin \xi}{2 \operatorname{ch} \xi - \cos \xi}$$

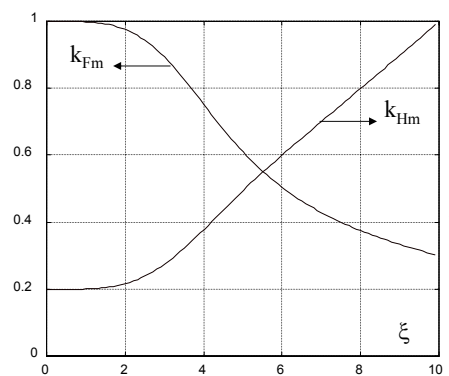


Fig. 5 Coeficientii de majorare a pierderilor specifice datorita reactiei curenților turbionari.

Pierderi în fier

Luarea în considerare a neuniformității inducției magnetice

La juguri

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{\pi h_j}{p \tau}} \quad \text{exterior}$$

$$\lambda = 1 - \frac{\pi h_j}{p \tau} \quad \text{interior}$$

$$K_{Fnu} = 2p \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} \frac{1 + \lambda^{2p}}{1 - \lambda^{2p}}$$

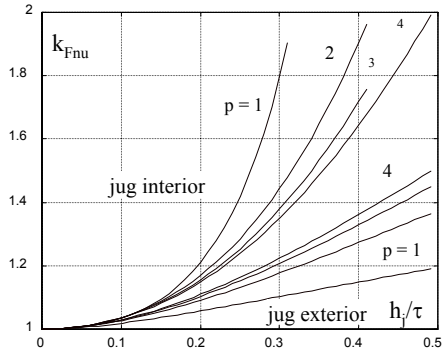


Fig. 6. Influența neuniformității inducției în jug asupra pierderilor prin curenți turbionari

Pierderi în fier

Pentru juguri coeficientul de neuniformitate prin histerezis

$$K_{Hnu} = 2 \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} \frac{1 + \lambda^2}{1 - \lambda^2}$$

Luarea în considerare a influenței prelucrărilor mecanice

k_{Fp}

Material	Calitate stantare	Derabvurare		Prelucrari ulterioare
		da	nu	
Otel nealiat	fbuna	1,1	1,3	1,5
	slaba	1,3	1,5	1,6
Otel aliat	fbuna	1,2	1,5	1,8
	slaba	1,5	1,8	2,2

$$k_{Hp} = 1,1 \div 1,2$$

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Pierderi suplimentare în fier – la suprafața armăturilor- *pierderi de suprafață*
 - In corpul dinților- *pierderi prin pulsație*

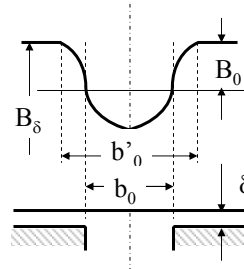
Inducția magnetică în întrefier din cauza deschiderilor de creștături variază

Amplitudinea variației

$$B_o = \beta \cdot k_c \cdot B_\delta$$

Depinde de: -dimensiunea întrefierului,
 - deschiderea creștăturii,
 - pasul dentar

raportul $\frac{b_o}{\delta} = b_\delta$ determină $u = \frac{b_\delta}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_\delta}{2}\right)^2}$



Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Se poate calcula:

$$\beta = \frac{(1-u)^2}{2(1+u^2)} \quad \gamma = \frac{b_\delta^2}{5+b_\delta} \quad b'_0 = \frac{\gamma}{\beta} b_0$$

Factorul lui Carter

$$k_c = \frac{\tau_d}{\tau_d - \beta \cdot b'_0} \quad \delta' = k_c \cdot \delta$$

Pierderile specifice pe unitate de suprafață; după [R.R.;V1pp208]

$$p_0 = \frac{\tau_d^2}{16} \sqrt{\frac{\pi^3 \cdot f^3}{\rho \cdot \mu}} B_{0m}^2$$

Frecvența de pulsație

$$f_p = Z \cdot n \quad [Hz]$$

Unde Z este numărul de creștături al armăturii opuse

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Pierderi de suprafață

la suprafața pieselor polare, în dinți pe o adâncime mică se produc pierderi prin curenți turbionari numite *pierderi de suprafață*

Pierderile specifice pe unitate de suprafață sunt influențate de:

- reacția curenților turbionari k_{Fs}
- forma nesinusoidală a inducției k_{ns}
- variația întrefierului $k_{\delta s}$

$$p_{ss} = c_{s0} \cdot k_{Fs} \cdot k_{ns} \cdot k_{\delta s} \cdot k_{ps} \cdot (Z \cdot n)^{1,5} \cdot (\tau_d \cdot B_0)^2$$

unde
$$c_{s0} = \frac{1}{8 \cdot \pi \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot 10^{-7}}}$$

Pentru piese polare masive din oțel forjat	$c_{s0} = 23,3 \cdot 10^{-3}$
Pentru piese polare masive din fontă	$c_{s0} = 17,5 \cdot 10^{-3}$
Pentru piese polare din tole de 2 mm	$c_{s0} = 8,6 \cdot 10^{-3}$
Pentru tole de oțel de 1mm	$c_{s0} = 4,2 \cdot 10^{-3}$
Pentru tole de oțel de 0,5 mm	$c_{s0} = 2,3 \cdot 10^{-3}$

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Grosimea redusă
$$\xi = \pi \cdot \frac{\tau_d}{2} \sqrt{\frac{\mu_r \cdot Z \cdot n}{\rho \cdot 10^7}}$$

Coefficientul de reacție a curenților turbionari

Notând
$$\chi = \frac{\tau_d}{b_0} \quad K_{Fs} = \frac{3 \operatorname{sh} \xi - \sin \xi}{\xi \operatorname{ch} \xi - \cos \xi}$$

Coefficientul datorită formei nesinusoidale a inducției
$$k_{ns} = \frac{1,3 \cdot \chi}{1 + 0,35 \cdot \chi^2} + \frac{\chi}{40}$$

Coefficientul datorită variației întrefierului $k_{\delta s}$ depinde de factorul de acoperire al polului $b_p/\tau = \alpha_i$ și de deschiderea creștăturii raportată la valoarea întrefierului pe axa polului $b_0/\delta = b_\delta$

$$k_{\delta s} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} \left(0,295 - \frac{7,275 \cdot 10^{-4}}{\alpha_i^7} b_\delta + \frac{3,48 \cdot 10^{-2}}{\alpha_i^3} \sqrt{b_\delta} \right)$$

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Factorul de prelucrare k_{ps} depinde de calitatea tolei, de grosimea ei și de prelucrarea suprafeței, de saturație.

Marca otel	Grosimea tolei Δ [mm]	Modul de prelucrare		
		Fara prelucrare	Prelucrare superficiala	Prelucrare finala.
laminat la cald	0,5	1,4	1,8	2,0
otel nealiat	0,5	2,0	2,5	2,8
otel nealiat	1,0	4,5	5,0	5,5
otel nealiat masiv		-	-	23,3
laminat la rece	0,5	1,3	1,6	1,9
dublu laminat	0,5	1,0	1,3	1,5

Pierderile de suprafață rezultă:

$$P_{su} = P_{ss} \cdot S_{Fe}$$

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

suprafața fierului

Pentru mașini cu creștături uniform repartizate

$$S_{Fe} = \pi \cdot D \cdot L \cdot K_{Fe} \frac{\tau_d - b_0}{\tau_d}$$

în cazul polilor aparenti.

$$S_{Fe} = 2p \cdot b_p \cdot L_p$$

Pierderi prin pulsație

La mașini cu creștături pe stator și pe rotor din cauza pulsației reluctanței circuitului magnetic, inducția magnetică în dinte pulsează cu frecvența determinată de viteza de rotație și numărul de dinți a armăturii opuse. Amplitudinea oscilațiilor inducției magnetice este determinată de variația permeabilității. Pentru armătura 1

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Amplitudinea oscilației inducției magnetice se calculează în funcție de inducția medie în dinte

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{\delta_1} K_{c1} \cdot B_{d1}$$

Unde γ_2 se referă la armătura opusă

$$\text{Frecvența de pulsație} \quad f_{p1} = Z_2 \cdot n \quad [Hz]$$

Unde Z_2 este numărul de creștături al armăturii opuse

Pierderile specifice pe unitate de masă

$$p_{p1s} = \sigma_F \cdot k_{fp} \cdot k_{pp} \cdot (f_{p1} \cdot B_{p1})^2$$

Unde k_{fp} este factorul de corecție din cauza curenților turbionari. se determină în funcție de grosimea redusă a tolei ξ .

k_{pp} este factorul de prelucrare $\sim k_{ps}$

Pierderi suplimentare în fier – la mersul în gol

Pierderile prin pulsație în dinți

$$p_p = k_{\delta p1} \cdot p_{p1} \cdot G_{d1} + k_{\delta p2} \cdot p_{p2} \cdot G_{d2}$$

Unde $k_{\delta p}$ este dată de relația $k_{\delta s}$ în care se înlocuiește $\alpha_1 = 2/\pi$ și b_δ pentru cele două armături

G_{d1} respectiv G_{d2} sunt greutatea dinților

Pierderi suplimentare în fier la funcționare în sarcină

Armonicile superioare sunt de ordinul $v = 2k+1$,

pasul polar fiind de $\tau_v = \tau/v$

iar numărul de perechi de poli $p_v = v \cdot p$.

În cazul înfășurărilor trifazate, ordinul armonicilor $v = 2mk \pm 1$,

viteza de rotație a câmpului față de stator este $n_v = f_s/p_v$.

Pierderi suplimentare în fier la funcționare în sarcină

armonicile dentare a căror ordine este $\nu = Z \cdot k/p + 1$.

Frecvența t.e.m. induse în stator de aceste câmpuri este frecvența fundamentală din stator.

$$f_{vs} = p_v \cdot n_v = f_s$$

frecvența t.e.m. induse în rotor

$$f_{vR} = p_v (n_s \pm n_v) = p \cdot \nu \cdot n_s \left(1 \pm \frac{1}{\nu}\right) = f_s (\nu \pm 1)$$

Armonicile statorice crează pierderile de suprafață în stratul superficial al rotorului, iar armonicile rotorice în stratul superficial al statorului.

Pierderi suplimentare în fier la funcționare în sarcină

Amplitudinea armonicii la suprafața rotorului se poate determina din amplitudinea solenației:

$$F_{vs} = \frac{1}{\nu} F_{1s} \frac{k_{bv}}{k_{b1}} = \frac{1}{\nu} \frac{\sqrt{2}}{\pi} A \cdot \tau \cdot k_{bv}$$

Inducția rezultă

$$B_{vR} = \mu_0 \frac{F_{vs}}{2\delta_c} k_v = \left(\mu_0 \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot \delta_c} A \cdot \tau \right) \frac{1}{\nu} k_{bv} \cdot k_v$$

coeficient de amortizare spațială ce ține seama de micșorarea amplitudinii din cauza întrefierului real față de cazul întrefierului infinit mic.

$$k_v = \frac{\pi \cdot \delta_c}{\tau_v \cdot sh \frac{\pi \cdot \delta}{\delta_v}}$$

Pierderi suplimentare în fier la funcționare în sarcină

Pierderile specifice de suprafață

$$p_{ss} = k_{op} \frac{1}{2} f_s^{1,5} A^2 \tau^2 \left(\frac{\tau_d}{\delta} \right)^2 \frac{\mu_0^2}{\pi^2} \sum \left\{ \left(\frac{k_{bv} k_v}{v} \right)^2 (v \pm 1)^{1,5} k_{Fv}^2 \right\}$$

Pentru armonicile spațiale rezultă:

$$p_{ss} = k_{op} \sum \left\{ (B_{vR} \cdot \tau_v)^2 f_{vR}^{1,5} \cdot k_{Fv} \cdot f_{sv}^2 \right\} = k_{op} \tau^2 \sum \left\{ \left(\frac{B_{vR}}{v} \right)^2 (v \pm 1)^{1,5} k_{Fv}^2 \right\}$$

Pentru armonicile dentare rezultă:

$$p_{ss} = k_{op} \frac{1}{2} (Z \cdot n)^{1,5} A^2 \frac{\tau_d^4}{\delta^2} \frac{\mu_0^2}{\pi^2} \sum \left\{ k_v^2 \cdot k_{Fv}^2 \right\}$$

Pierderi suplimentare în fier la funcționare în sarcină

Pierderi totale în dinții statorului

$$p_{s1} = \pi \cdot D \cdot L \cdot k_{cf} \cdot p_{ss} \frac{\tau_{d2} - b_{02}}{\tau_{d2}}$$

k_{cf} – coeficientul de corecție de formă, ține seama de faptul că variația inducției magnetice nu este sinusoidală. Această abatere este cu atât mai mare cu cât raportul dintre pasul dentar τ_d și deschiderea creștăturii, adică lățimea de calcul a deschiderii creștăturii.

$$x = \frac{0,9 \frac{\tau_d}{\delta}}{1 + \frac{1}{5} \frac{b_0}{\delta}} \quad K_{cf} = 0,8 \frac{x + \frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{5} x^2}$$