

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנחיקת נחון

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג

(22 עמודים)

1. מבוא למערכות תלת-מופעיות

כוכב סימטרי

$$I_L = I_{ph}$$

זרם קווי - I_L [A]

זרם מופעי - I_{ph} [A]

מתח שלוב (קווי) - U_L [V]

מתח מופעי - U_{ph} [V]

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

משולש סימטרי

$$U_L = U_{ph} \quad I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

הספק תלת-מופע

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

הספק מדומה תלת-מופע - S [VA]

הספק פעיל תלת-מופע - P [W]

הספק היגבי תלת-מופע - Q [VAr]

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

חישוב זרמים:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_L} \quad I_{ph} = \frac{S}{3 \cdot U_{ph}}$$

2. שנאים

2.1 מתח מושרה בסליל

כא"מ מושרה בסליל הראשוני	-	E_1 [V]
כא"מ מושרה בסליל השניוני	-	E_2 [V]
שטף מרבי בגרעין	-	Φ_{\max} [Wb]
מספר הכריכות בסליל הראשוני	-	N_1
מספר הכריכות בסליל השניוני	-	N_2
תדירות	-	f [Hz]
השראה מגנטית מרבית	-	B_{\max} [Wb / m ²]
שטח החתך של הגרעין	-	A [m ²]

$$E_1 = 4.44 f \Phi_{\max} N_1$$

$$E_2 = 4.44 f \Phi_{\max} N_2$$

$$\Phi_{\max} = B_{\max} A$$

שנאי חד-מופעלי:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

יחס השנאה	-	a
מתח בסליל הראשוני	-	U_1 [V]
מתח בסליל השניוני	-	U_2 [V]
זרם בסליל הראשוני	-	I_1 [A]
זרם בסליל השניוני	-	I_2 [A]

שנאי תלת-מופעלי:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1ph}}{U_{2ph}} \approx \frac{I_{2ph}}{I_{1ph}}$$

2.2 ניסוי קצר

יחס השנאה	-	a	$R_2' = R_2 a^2$
התנגדות הסליל השניוני	-	R_2 [Ω]	$X_2' = X_2 a^2$
התנגדות הסליל השניוני משוקפת לראשוני	-	R_2' [Ω]	$R_k = R_1 + R_2'$
היגב השראותי של הסליל השניוני	-	X_2 [Ω]	$X_k = X_1 + X_2'$
היגב השראותי של הסליל השניוני משוקף לראשוני	-	X_2' [Ω]	$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$
התנגדות הקצר	-	R_k [Ω]	$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k$
היגב הקצר של השנאי	-	X_k [Ω]	$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k$
עכבת הקצר של השנאי	-	Z_k [Ω]	$U_{k\%} = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100$
מתח הקצר של השנאי	-	U_k [V]	
זרם הקצר של השנאי	-	I_k [A]	
מתח הקצר, באחוזים מהמתח הנקוב	-	$U_{k\%}$	

2.3 פעולת השנאי בקצר ובריקם

שנאי תלת-מופעי בקצר:

הספק הקצר	-	P_k [W]	$Z_k = \frac{U_{kph}}{I_{kph}}$
זרם הקצר	-	I_k [A]	$P_k = 3 \cdot I_{kph}^2 \cdot R_k$
התנגדות הקצר	-	R_k [Ω]	$P_k = \sqrt{3} \cdot U_k I_k \cos \varphi_k$
היגב הקצר	-	X_k [Ω]	$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{nph} \cdot R_k}{U_{nph}} \cdot 100$
עכבת הקצר	-	Z_k [Ω]	$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{phn} \cdot X_k}{U_{nph}} \cdot 100$
מפל מתח	-	$\Delta U_{R\%} / \Delta U_{X\%}$	
היגבי / התנגדותי באחוזים			

שנאי חד-מופעי בקצר:

$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$
$P_k = I_k^2 \cdot R_k$
$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$
$\Delta U_{R\%} = \frac{I_n R_k}{U_n} \cdot 100$
$\Delta U_{X\%} = \frac{I_n X_k}{U_n} \cdot 100$

שנאי תלת-מופעי בריקם:

זרם ריקם באחוזים	-	$I_{o\%}$	$I_{o\%} = \frac{I_{oph}}{I_{nph}} \cdot 100 = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$
זרם ריקם	-	I_o [A]	$I_{Feph} = \frac{P_o}{3 \cdot U_{nph}}$
זרם הפסדי ברזל	-	I_{Fe} [A]	$I_{\mu ph} = \sqrt{I_{oph}^2 - I_{Feph}^2}$
זרם המגנט	-	I_μ [A]	$R_{Fe} = \frac{U_{nph}}{I_{Feph}}$
התנגדות מותאמת להפסדי ברזל	-	R_{Fe} [Ω]	$X_\mu = \frac{U_{nph}}{I_{\mu ph}}$
היגב המגנט	-	X_μ [Ω]	$P_o = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$
הספק בריקם	-	P_o [W]	

שנאי חד-מופעי בריקם:

$I_{o\%} = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$
$I_{Fe} = \frac{P_o}{U_n}$
$I_\mu = \sqrt{I_o^2 - I_{Fe}^2}$
$R_{Fe} = \frac{U_n}{I_{Fe}}$
$X_\mu = \frac{U_n}{I_\mu}$
$P_o = U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$

2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

מפל מתח באחוזים - $\Delta U_{\%}$

מפל מתח התנגדותי באחוזים - $\Delta U_{R\%}$

$$\Delta U_{\%} = \beta (\Delta U_{R\%} \cos \varphi_2 \pm \Delta U_{X\%} \sin \varphi_2)$$

מפל מתח היגבי באחוזים - $\Delta U_{X\%}$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{Cu_n}}{S_n} \cdot 100$$

גורם הספק של העומס - $\cos \varphi_2$

מקדם העמסה של השנאי - β

הספק מדומה של העומס - S_2 [VA]

$$\Delta U_{X\%} = \sqrt{(U_{k\%})^2 - (\Delta U_{R\%})^2}$$

הספק נקוב של השנאי - S_n [VA]

מתח שניוני נקוב - U_{2n} [V]

$$U_2 = U_{2n} \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right)$$

מתח שניוני - U_2 [V]

מתח ראשוני נקוב - U_{1n} [V]

$$U_1 = U_{1n} \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right)$$

מתח ראשוני - U_1 [V]

נצילות השנאי - η

גורם העמסה המותאם לנצילות מרבית - $\beta_{\eta_{max}}$

2.5 נצילות השנאי

הפסדי ברזל - ΔP_{Fe} [W]

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$$

הפסדי נחושת נקובים - ΔP_{Cu_n} [W]

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{Cu_n} + \Delta P_{Fe}}$$

התנאי לקבלת נצילות מרבית:

$$\beta_{\eta_{max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cu_n}}}$$

2.6 עבודת שנאים במקביל

בהפעלת שני שנאים במקביל:

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{S_{n_I} \cdot U_{K\%II}}{S_{n_{II}} \cdot U_{K\%I}}$$

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{Z_{k_{II}}}{Z_{k_I}}$$

$$S_I + S_{II} = S_L$$

- S_I - הספק מדומה בפועל של שנאי (1)
- S_{II} - הספק מדומה בפועל של שנאי (2)
- S_m - הספק מדומה בפועל של שנאי (m)
- S_L - הספק מדומה של הצרכן
- S_T - הספק מדומה של העומס
- $S_{T_{max}}$ - הספק מדומה של העומס (המרבי המותר)
- S_{n_I} - הספק מדומה נקוב של שנאי (1)
- $S_{n_{II}}$ - הספק מדומה נקוב של שנאי (2)
- Z_{k_I} - עכבת קצר של שנאי (1)
- $Z_{k_{II}}$ - עכבת קצר של שנאי (2)
- $U_{k\%I}$ - מתח קצר באחוזים של שנאי (1)
- $U_{k\%II}$ - מתח קצר באחוזים של שנאי (2)
- $U_{k\%m}$ - מתח קצר באחוזים של שנאי (m)
- $U_{k\%min}$ - מתח קצר באחוזים, הנמוך ביותר מבין מתחי הקצר של שנאים הפועלים יחד במקביל
- m - שנאי כלשהו מבין השנאים
- n - מספר השנאים

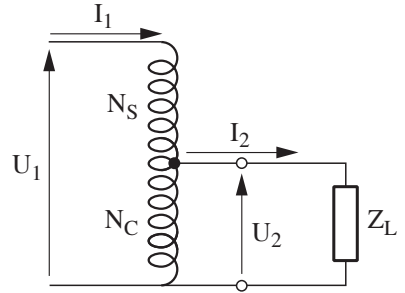
בהפעלת מספר שנאים במקביל:

$$S_m = \frac{S_T}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{n_i}}{U_{k\%i}} \right)} \cdot \frac{S_{n_m}}{U_{k\%m}}$$

$$S_{T_{max}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{n_i}}{U_{k\%i}} \right) \cdot U_{k\%min}$$

2.7 שניאי עצמי

- מספר הכריכות בחלק הלא משותף של הסליל - N_S [T]
- מספר הכריכות בחלק המשותף של הסליל - N_C [T]
- תדירות - f [Hz]
- שטף מגנטי מרבי - Φ_{max} [Wb]
- כוח אלקטרו־מניע - E [V]
- מתח - U [V]
- זרם - I [A]
- יחס השנאה - a
- הזרם בחלק המשותף של הסליל - I_C [A]



$$E_S = 4.44 \cdot N_S \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

$$E_C = 4.44 \cdot N_C \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_S + \vec{E}_C$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_C$$

$$a = \frac{U_1}{U_2} = \left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{N_S + N_C}{N_C}$$

$$\left| \frac{I_1}{I_2} \right| = \frac{U_2}{U_1}$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_2 + \vec{I}_1$$

$$I_C \approx I_2 - I_1$$

3. מכונה לזרם ישר

3.1 כוח אלקטרו־מניע

כא"מ מושרה ברוטור - E [V]

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot n$$

מספר מוליכים ברוטור - Z

מספר זוגות קטבים - p

$$K_e = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a}$$

מהירות סיבוב - n [r.p.m]

מספר זוגות ענפים - a

במחולל לזרם ישר:

מקבילים ברוטור

(עירור מקבילי) $E = U + I_a \cdot R_a + \Delta U_b$

שטף - Φ [Wb]

מקדם הכא"מ - K_e

(עירור זר) $E = U + I \cdot R_a + \Delta U_b$

כוח אלקטרו־מניע (כא"מ) - E [V]

המתח בין הדקי המחולל / המתח המסופק למנוע - U [V]

(עירור טורי) $E = U + I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$

התנגדות העוגן - R_a [Ω]

במנוע לזרם ישר:

התנגדות סליל העירור הטורי - R_{es} [Ω]

(עירור מקבילי) $E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$

מפל המתח על המברשות - ΔU_b [V]

(עירור זר) $E = U - I \cdot R_a - \Delta U_b$

הזרם בעוגן - I_a [A]

זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע - I [A]

(עירור טורי) $E = U - I(R_a + R_{es}) - \Delta U_b$

3.2 זרמים במחולל

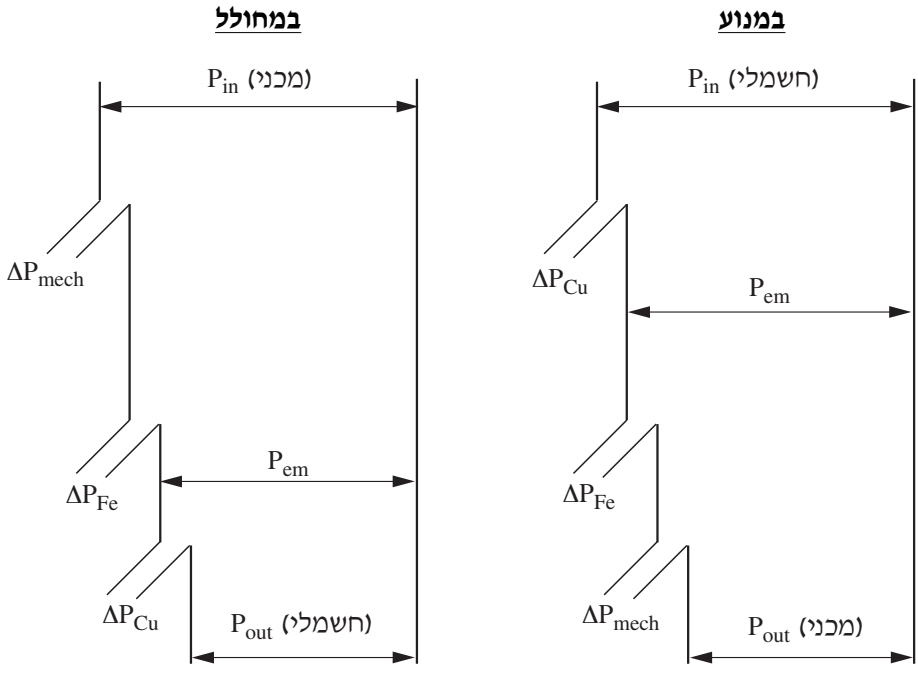
הזרם המסופק לצרכן על-ידי המחולל	- I [A]	$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	עירור זר
		$I = I_a - I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e}$	עירור מקבילי
		$I = I_a = I_e$		עירור טורי

3.3 זרמים במנוע

הזרם הנצרך על-ידי המנוע	- I [A]	$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	עירור זר	
		הזרם בעוגן (ברוטור)	$I = I_a + I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e}$	עירור מקבילי
		הזרם בסליל העירור			
מתח העירור	- U_e [V]	$I = I_a = I_e$		עירור טורי	
התנגדות סליל העירור	- R_e [Ω]				
זרם ההתנעה בעוגן	- I_{ast} [A]	$I_{ast} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$			
התנגדות המתנע	- R_{st} [Ω]				

3.4 הספקים והפסדי הספק

P_{em} [W]	-	הספק אלקטרו מגנטי	$P_{em} = E \cdot I_a$
ΔP_{Cu} [W]	-	הפסדי נחושת	$\Delta P_{Cu_a} = I_a^2 \cdot R_a$
ΔP_{Cu_a} [W]	-	הפסדי נחושת בעוגן (רוטור)	
ΔP_{Cu_e} [W]	-	הפסדי נחושת בסליל העירור	$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$
ΔP [W]	-	הפסדי הספק	$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$
ΔP_{Fe} [W]	-	הפסדי ברזל	
ΔP_{mech} [W]	-	הפסדי הספק מכני	
P_{in} [W]	-	הספק מבוא	$P_{חשמלי} = U \cdot I$
P_{out} [W]	-	הספק מוצא	
$P_{חשמלי}$ [W]	-	הספק חשמלי	
$P_{מכני}$ [W]	-	הספק מכני	$P_{מכני} = M \cdot \omega$



3.5 מומנטים

מומנט נקוב	-	M_n [N · m]	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \frac{P_n}{n_n}$
הספק נקוב	-	P_n [W]	
מהירות זוויתית נקובה	-	ω_n $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$
מהירות סיבוב נקובה	-	n_n [r.p.m]	
מקדם המומנט	-	K_m	$M_{em} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$
מספר מוליכים ברוטור	-	Z	
מספר זוגות קטבים	-	p	$K_m = \frac{Z \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a}$
מספר זוגות ענפים	-	a	
מקבילים בעוגן			
מומנט אלקטרומגנטי	-	M_{em} [N · m]	$\frac{K_e}{K_m} = \frac{2\pi}{60} = 0.1047$
שטף מגנטי	-	Φ [Wb]	
זרם העוגן	-	I_a [A]	$\Delta M_0 = M_{em_n} - M_n$
איבודי מומנט בריקם	-	ΔM_0 [N · m]	

3.6 מהירות במנוע

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מקדם הכא"מ	-	K_e	$n_o = \frac{U}{K_e \Phi}$
שטף מגנטי	-	Φ [Wb]	
מהירות המנוע	-	n [r.p.m]	$n = n_o - \Delta n$
מהירות המנוע בריקם	-	n_o [r.p.m]	
זרם בעוגן	-	I_a [A]	$n = \frac{U - I_a (R_a + R_x)}{K_e \Phi}$
זרם כללי (הנצרך מהמקור)	-	I [A]	
זרם העירור	-	I_e [A]	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em} \frac{R_a + R_x}{K_e \Phi \cdot K_m \Phi}$
מומנט אלקטרומגנטי	-	M_{em} [N · m]	
מתח	-	U [V]	$n = \frac{U}{K_e \Phi} - M_{em} \frac{R_a + R_x}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$
התנגדות העוגן	-	R_a [Ω]	
התנגדות סליל העירור	-	R_e [Ω]	
התנגדות נוספת במעגל העוגן	-	R_x [Ω]	

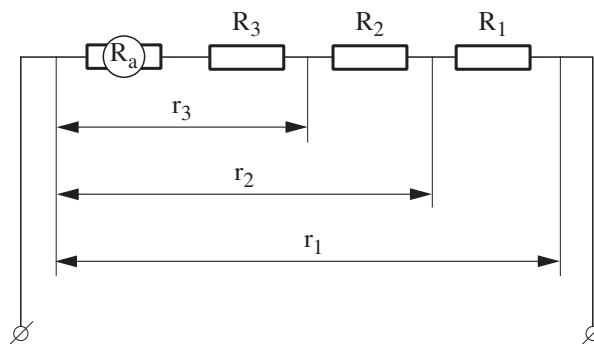
ב. במנוע לזרם ישר בעירור טורי

$$n = \frac{U - I (R_a + R_e + R_x)}{K_e \Phi}$$

3.7 תכנון מתנע דרגתי למנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מספר דרגות	-	m	
התנגדות מרבית של מעגל העוגן ברגע ההתנעה ($n = 0, E = 0$)	-	r_1 [Ω]	$m = \frac{\ln \frac{r_1}{R_a}}{\ln \lambda}$
התנגדות הרוטור	-	R_a [Ω]	$r_1 = \frac{U}{I_{a \max}}$
זרם התנעה מרבי בעוגן	-	$I_{a \max}$ [A]	$\lambda = \frac{I_{a \max}}{I_{a \min}}$
זרם מזערי בעוגן	-	$I_{a \min}$ [A]	
התנגדות הדרגה ה- n	-	R_n [Ω]	$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$
התנגדות כוללת עד הדרגה ה- n	-	r_n [Ω]	
מהירות המנוע שבה נדרש לקצר את הנגד R_i , כאשר הזרם בעוגן הוא מזערי ($I_{a \min}$)	-	n_i	$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$
			$R_n = r_n - r_{n+1}$
			$n_i = \frac{U - I_{a \min} \cdot r_i}{K_e \Phi}$

מתנע בעל שלוש דרגות



4. מנוע השראתי תלת-מופעי

4.1 חישוב זרמים

(בהזנחת זרם ריקם)

זרם נקוב קווי	-	I_{1n} [A]
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	-	P_n [W]
גורם הספק	-	$\cos \varphi$
נצילות	-	η
זרם מופעי בסטטור	-	I_{ph1} [A]
זרם מופעי ברוטור, המשוקף לסטטור	-	I_{ph2} [A]
התנגדות סליל אחד בסטטור	-	R_1 [Ω]
התנגדות סליל אחד בעוגן	-	R_2 [Ω]
התנגדות סליל העוגן המשוקף לסטטור	-	R'_2 [Ω]
היגב מופעי ברוטור ניח	-	$X_{2(0)}$ [Ω]
ההיגב הכולל של המנוע	-	X_T [Ω]
יחס תמסורת בין ערכים מופעיים	-	a_{ph}
מספר כריכות בסליל	-	N
מקדם ליפוף של הסליל	-	K_N
גורם החליקה	-	s
כא"מ מופעי מושרה ברוטור ניח ופתוח	-	$E_{ph2(0)}$ [V]

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

$$I_{ph1} \approx I'_{ph2} = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

$$I_{ph2} = \frac{E_{ph2(0)}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2(0)}^2}}$$

$$I_{ph2} \approx I_{ph1} \cdot a_{ph}$$

$$a_{ph} = \frac{N_1 \cdot K_{N1}}{N_2 \cdot K_{N2}} = \frac{U_{ph1}}{E_{ph2(0)}} \approx \frac{I_{ph2}}{I_{ph1}}$$

$$X_T = X_1 + X'_{2(0)}$$

$$X'_{2(0)} = X_{2(0)} \cdot a_{ph}^2$$

$$R'_2 = R_2 \cdot a_{ph}^2$$

4.2 חישוב פאזורי של זרמים

$$\vec{I}_{ph1} = \vec{I}'_{ph2} + \vec{I}_{ph0}$$

$$\vec{I}_{ph2} = \frac{\vec{U}_{1ph}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + jX_T}$$

4.3 זרם התנעה

(בהזנחת זרם ריקים)

- זרם פאזורי מופעי בסטטור, בהתנעה $I_{ph1(st)}$ [A]
- זרם פאזורי מופעי ברוטור, משוקף לסטטור, בהתנעה $I'_{ph2(st)}$ [A]

$$I'_{ph2(st)} \approx I_{ph1(st)} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{\left(R_1 + R'_2 \right)^2 + X_T^2}}$$

4.4 מהירות וגורם החליקה

- מהירות סינכרונית n_s [r.p.m]
- תדירות הרשת f_1 [Hz]
- מס' זוגות קטבים p
- תדירות הזרם ברוטור f_2 [Hz]
- גורם החליקה s
- מהירות קריטית n_k [r.p.m]
- היחס בין המומנט המרבי למומנט הנקוב של המנוע λ_{max}
- מומנט מרבי (קריטי) M_k [N · m]
- מומנט נקוב M_n [N · m]
- גורם החליקה במומנט קריטי s_k
- גורם החליקה במומנט נקוב s_n

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$\lambda_{max} = \frac{M_k}{M_n} = \left(\frac{s_k + s_n}{s_n + s_k} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

$$s_k = s_n \left[\lambda_{max} \pm \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1} \right]$$

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}} \approx \frac{R'_2}{X_T}$$

4.5 הספקים ואיבודי הספק

הספק (ממשי) מושקע	-	P_{in}	[W]
הספק המופק על-ידי המנוע	-	P_n	[W]
הספק אלקטרומגנטי	-	P_{em}	[W]
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]
איבודי נחשת בסטטור	-	ΔP_{Cu_1}	[W]
איבודי נחשת ברוטור	-	ΔP_{Cu_2}	[W]
איבודי ברזל בסטטור	-	ΔP_{Fe}	[W]
איבודי חיכוך ואיורור	-	ΔP_{mech}	[W]
איבודים נוספים	-	ΔP_{add}	[W]
הספק המנוע בריקים	-	P_o	[W]
גורם החליקה	-	s	

$$\Delta P_{Cu_1} = 3 \cdot I_{1ph}^2 \cdot R_1$$

$$\Delta P_{Cu_2} = 3 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R_2 = 3 \cdot I_{1ph}'^2 \cdot R_2'$$

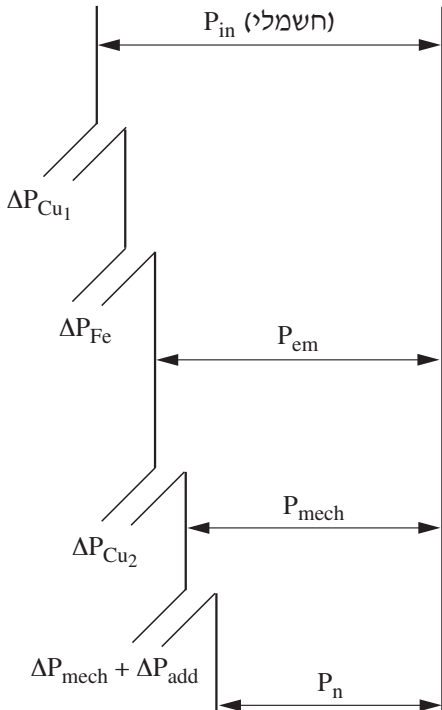
$$\Delta P_{Cu_2} = P_{em} \cdot s = P_{mech} \cdot \left(\frac{s}{1-s} \right)$$

$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s}$$

$$P_o \cong \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$$

$$\Delta P_{סטטור} \cong \Delta P_{Cu_1} + \Delta P_{Fe}$$

$$\Delta P_{רוטור} \cong \Delta P_{Cu_2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{add}$$



4.6 מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	- ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	- ω_s	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$
מהירות סיבוב (סינכרונית) של השדה	- n_n	[r.p.m]	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n}$
הספק נקוב המופק על-ידי המנוע	- P_n	[W]	$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_s}$
הספק אלקטרומגנטי	- P_{em}	[W]	
מומנט אלקטרומגנטי בהתנעה	- $M_{em_{start}}$	[N · m]	$M_{em} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{n_s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט אלקטרומגנטי	- M_{em}	[N · m]	
מומנט מרבי (קריטי)	- M_k	[N · m]	
גורם החליקה	- s		$M_{em_{start}} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R'_2}{n_s \left[\left(R_1 + R'_2 \right)^2 + X_T^2 \right]}$
גורם החליקה במומנט קריטי	- s_k		$M_k \cong \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
			$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$
			$\frac{M_I}{M_{II}} = \left(\frac{U_I}{U_{II}} \right)^2$
			$\frac{M_{start}(\Delta)}{M_{start}(Y)} = 3$

4.7 נגד נוסף במעגל הרוטור

כאשר המנוע מועמס במומנט נקוב:

$$R_x = R_2 \left(\frac{s_x}{s_n} - 1 \right)$$

כאשר המנוע מועמס במומנט כלשהו M_x :

$$R_x = R_2 \left(\frac{M_n \cdot s_x}{M_x \cdot s_n} - 1 \right)$$

- R_x [Ω] התנגדות נגד טורי נוסף לסליל הרוטור
- R_2 [Ω] התנגדות סליל הרוטור
- s_n חליקה נקובה
- s_x חליקה מותאמת למהירות n_x

4.8 תכנון מתנע הדרגתי למנוע השראתי בעל רוטור מלופף

- λ היחס בין מומנט מרבי למומנט נקוב
- m מספר דרגות התנעה
- r_1 [Ω / ph] התנגדות מרבית של מעגל הרוטור ברגע ההתנעה
- R_2 [Ω / ph] התנגדות מעגל הרוטור לפאזה
- M_{max} [N · m] מומנט מרבי בהתנעה
- M_n [N · m] מומנט נומינלי
- r_n [Ω / ph] התנגדות כוללת עד הדרגה ה- n
- R_n [Ω / ph] התנגדות הדרגה n

$$r_1 = R_2 \cdot \frac{M_n}{M_{max} \cdot s_n}$$

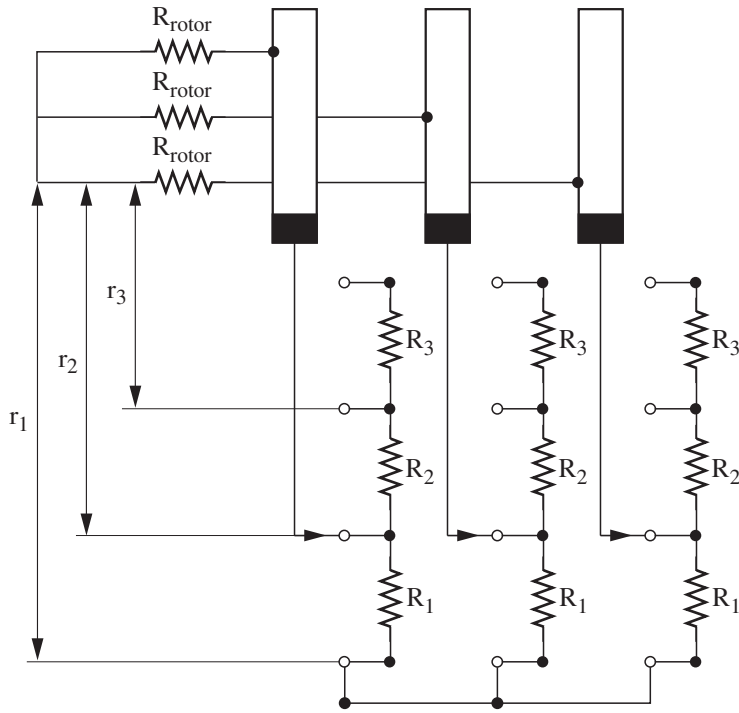
$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_n}$$

$$m = \frac{\ln \frac{r_1}{R_2}}{\ln \lambda}$$

$$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$$

$$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$$

$$R_n = r_n - r_{n+1}$$



5. כוחות ומומנטים במערכות הינע

5.1 תנועה קווית

כוח מניע	-	F	[N]
כוח דינמי	-	F _d	[N]
כוח נגדי	-	F _s	[N]
מסת הגוף	-	m	[kgf · s ² / m] , [kg]
מהירות	-	v	[m / s]
תאוצה	-	a	[m / s ²]

$$F = F_s + F_d$$

$$F_d = m \frac{dv}{dt} = ma$$

5.2 תנועה סיבובית

מומנט סיבובי	-	M	[N · m]
מומנט סטטי (נגדי)	-	M _s	[N · m]
מומנט דינמי	-	M _d	[N · m]
מומנט התמדה (אינרציה)	-	J	[kgf · m · s ²]
תאוצה זוויתית	-	$\frac{d\omega}{dt}$	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מומנט תנופה	-	GD ²	[kgf · m ²]
מהירות סיבוב	-	n	[r.p.m]

$$M = M_s + M_d$$

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$M - M_s = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$$

$$GD^2 = 4gJ$$

6. העברת מומנטיים

תנועה סיבובית

העברת מומנט סטטי:

מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון - $M_{sm} \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$

$$M_s = \frac{M_{sm}}{K \cdot \eta} \text{ : מומנט על ציר המנוע}$$

מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע - $M_s \text{ [kgf} \cdot \text{m]}$

$$K = \frac{n}{n_m} \text{ : תמסורת גלגלי השיניים}$$

מהירות סיבוב ציר המנוע - $n \text{ [r.p.m]}$

עבור תמסורת של i גלגלי שיניים:

$$M_s = M_{sm} \cdot \frac{1}{K_1 K_2 \dots K_i \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i}$$

מהירות סיבוב ציר המנגנון - $n_m \text{ [r.p.m]}$

נצילות התמסורת - η

העברת מומנטי תנופה לציר המנוע:

מומנט תנופה של המנוע - $GD_N^2 \text{ [kgf} \cdot \text{m}^2]$

$$GD^2 = GD_N^2 + \sum_{i=1}^m GD_i^2 \frac{1}{K_i^2}$$

מומנט תנופה של גלגל התמסורת ה- i או העומס הנגדי ה- i - $GD_i^2 \text{ [kgf} \cdot \text{m}^2]$

$$K_i = \frac{n}{n_i}$$

מהירות סיבוב ציר המנוע - $n \text{ [r.p.m]}$

מהירות סיבוב הציר המשני של התמסורת או של העומס הנגדי - $n_i \text{ [r.p.m]}$

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$$

העברת מסות ומומנטים מתנועה קווית לתנועה סיבובית

העברת כוח סטטי למומנט סיבובי על ציר המנוע:

המומנט הסטטי המועבר
לציר המנוע - M_s [N · m]

$$M_s = 9.55 \frac{F_{sm} \cdot v}{n \cdot \eta}$$

הכוח הנגדי של העומס
(או של המטען) - F_{sm} [N]

$$v = \frac{\pi D n}{60}$$

המהירות הקווית
של המטען - v [m / s]

מהירות הסיבוב
של ציר המנוע - n [r.p.m]

נצילות התמסורת - η

קוטר התוף - D [m]

העברת מסות למומנט תנופה:

משקל הגוף - G [kgf]

$$GD^2 = 365 \cdot G \cdot \left(\frac{v}{n}\right)^2$$

זמן התנעה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- GD^2 קבועים)

מומנט תנופה - GD^2 [kgf · m²]

$$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_2 - n_1}{M - M_s} \quad \text{: בהתנעה:}$$

מהירות סיבוב התחלתית - n_1 [r.p.m]

מהירות סיבוב סופית - n_2 [r.p.m]

מומנט סיבובי - M [N · m]

מומנט סטטי (נגדי) - M_s [N · m]

$$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_1 - n_2}{M + M_s} \quad \text{: בבלימה:}$$

בהצלחה!