

אין להעביר את הנוסחאון  
לנבחן אחר

מקום לנחיקת נחן

## נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ג

(22 עמודים)

### 1. מבוא למערכות תלת מופעיות

כוכב סימטרי

$$\text{זרם קווי} - I_L \quad [A]$$

$$\text{זרם מופעי} - I_{ph} \quad [A]$$

$$\text{מתח שלוב (קווי)} - U_L \quad [V]$$

$$\text{מתח מופעי} - U_{ph} \quad [V]$$

$$I_L = I_{ph}$$

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

משולש סימטרי

$$U_L = U_{ph}$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{ph}$$

הספק תלת מופעי

$$\text{הספק מדומה תלת-מופעי} - S \quad [VA]$$

$$\text{הספק פעיל תלת-מופעי} - P \quad [W]$$

$$\text{הספק היגבי תלת-מופעי} - Q \quad [VAr]$$

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

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \sin \varphi$$

## 2. שנאים

### 2.1 מתח מושרה בסליל

—  $E_1$  [V] כא"מ מושרה בסליל הראשוני

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

—  $E_2$  [V] כא"מ מושרה בסליל השניוני

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

—  $\Phi_{\max}$  [Wb] שטף מרבי בגרעין

—  $N_1$  מספר הכריכות בסליל הראשוני

—  $N_2$  מספר הכריכות בסליל השניוני

—  $f$  [Hz] תדירות

—  $B_{\max}$  [Wb / m<sup>2</sup>] השראה מגנטית מרבית

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

—  $A$  [m<sup>2</sup>] שטח החתך של הגרעין

—  $a$  יחס השנאה

שנאי חד-מופעלי:

—  $U_1$  [V] מתח בסליל הראשוני

—  $U_2$  [V] מתח בסליל השניוני

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

—  $I_1$  [A] זרם בסליל הראשוני

—  $I_2$  [A] זרם בסליל השניוני

שנאי תלת-מופעלי:

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

## 2.2 ניסוי קצר

יחס השנאה	—	$a$	
התנגדות הסליל השניוני	—	$R_2$ [Ω]	$R_2' = R_2 a^2$
התנגדות הסליל השניוני משוקפת לראשוני	—	$R_2'$ [Ω]	$X_2' = X_2 a^2$
היגב השראותי של הסליל השניוני	—	$X_2$ [Ω]	$R_k = R_1 + R_2'$
היגב השראותי של הסליל השניוני משוקף לראשוני	—	$X_2'$ [Ω]	$X_k = X_1 + X_2'$
התנגדות הקצר	—	$R_k$ [Ω]	$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$
היגב הקצר של השנאי	—	$X_k$ [Ω]	
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 קצר באחוזים מהמתח הנקוב	—	$U_{k\%}$	

2.3 פעולת השנאי בקצר ובריקם

שנאי תלת-מופעי בקצר

שנאי חד-מופעי בקצר

הספק בקצר —  $P_k$  [W]

$$P_k = 3 \cdot I_{phk}^2 \cdot R_k$$

$$P_k = I_k^2 \cdot R_k$$

זרם קצר —  $I_k$  [A]

$$P_k = \sqrt{3} \cdot U_k I_k \cos \varphi_k$$

$$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$$

התנגדות הקצר —  $R_k$  [ $\Omega$ ]

$$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{1phn} \cdot R_k}{U_{1phn}} \cdot 100$$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{1n} R_k}{U_{1n}} \cdot 100$$

היגב בקצר —  $X_k$  [ $\Omega$ ]

$$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{1phn} \cdot X_k}{U_{1phn}} \cdot 100$$

$$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{1n} X_k}{U_{1n}} \cdot 100$$

שנאי תלת-מופעי בריקם:

שנאי חד-מופעי בריקם:

זרם ריקם באחוזים —  $I_o\%$

$$I_o\% = \frac{I_{pho}}{I_{1phn}} \cdot 100 = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$$

$$I_o\% = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100$$

זרם הפסדי ברזל —  $I_{Fe}$  [A]

$$I_{Feph} = \frac{P_o}{3 \cdot U_{nph}}$$

$$I_{Fe} = \frac{P_o}{U_n}$$

זרם המגנט —  $I_\mu$  [A]

$$I_{\mu ph} = \sqrt{I_{oph}^2 - I_{Feph}^2}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_o^2 - I_{Fe}^2}$$

התנגדות מותאמת להפסדי ברזל —  $R_{Fe}$  [ $\Omega$ ]

$$R_{Fe} = \frac{U_{nph}}{I_{Feph}}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_n}{I_{Fe}}$$

היגב מנט —  $X_\mu$  [ $\Omega$ ]

$$X_\mu = \frac{U_{nph}}{I_{\mu ph}}$$

$$X_\mu = \frac{U_n}{I_\mu}$$

זרם ריקם —  $I_o$  [A]

$$P_o = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$$

$$P_o = U_n \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$$

הספק בריקם —  $P_o$  [W]

**2.4 מפלי מתח ומתחי עבודה**

			$\beta = \frac{S}{S_n}$
מפל מתח באחוזים	—	$\Delta U_{\%}$	
מפל מתח התנגדותי באחוזים	—	$\Delta U_{R\%}$	
			$\Delta U_{\%} = \beta (\Delta U_{R\%} \cos \varphi_2 + \Delta U_{X\%} \sin \varphi_2)$
מפל מתח היגבי באחוזים	—	$\Delta U_{X\%}$	
גורם הספק	—	$\cos \varphi_2$	$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{Cu_n}}{S_n} \cdot 100$
מקדם העמסה	—	$\beta$	
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	—	$\eta$	

**2.5 נצילות השנאי**

גורם העמסה מותאם לנצילות מירבית	—	$\beta_{\eta_{\max}}$	
הפסדי ברזל	—	$\Delta P_{Fe}$ [W]	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$
הפסדי נחושת נקובים	—	$\Delta P_{Cu_n}$ [W]	$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{Cu_n} + \Delta P_{Fe}}$

תנאי 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
- $S_{Tmax}$  — הספק מדומה של העומס (המירבי 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 כל השנאים הפועלים יחד במקביל
- $m$  — שנאי כלשהו מבין השנאים
- $n$  — מס' השנאים

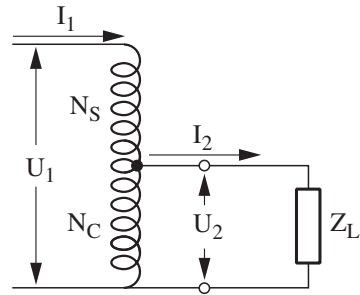
בהפעלת מספר שנאים מקביל:

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

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

2.7 שנהאי עצמי

מס' הכריכות בחלק הלא משותף של הסליל	—	$N_S$	[T]
מס' הכריכות בחלק המשותף של הסליל	—	$N_C$	[T]
תדירות	—	$f$	[Hz]
כח אלקטרומניע	—	$E$	[V]
מתח	—	$U$	[V]
זרם	—	$I$	[A]
שטף מגנטי מירבי	—	$\Phi_{\max}$	[Wb]



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

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

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

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

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_S + N_C}{N_C}$$

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

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

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

### 3. מכונה לזרם ישר

#### 3.1 חישוב כח אלקטרו מניע

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

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

E [V]	—	כא"מ מושרה ברוטור
Z	—	מספר מוליכים ברוטור
p	—	מספר זוגות קטבים
n [r.p.m]	—	מהירות סיבוב
a	—	מספר זוגות ענפים מקבילים ברוטור
$\Phi$ [Wb]	—	שטף
$K_e$	—	מקדם חישוב הכא"מ

#### מחולל לזרם ישר

E [V]	—	כוח אלקטרו מניע (כ.א.מ.)	$E = U + I_a \cdot R_a + \Delta U_b$ (עירור מקבילי)
U [V]	—	מתח הדקי המחולל	$E = U + I \cdot R_a + \Delta U_b$ עירור זר
$R_a$ [ $\Omega$ ]	—	התנגדות העוגן	$E = U + I (R_a + R_{es}) + \Delta U_b$ עירור טורי
$R_{es}$ [ $\Omega$ ]	—	התנגדות סליל בעירור טורי	
$\Delta U_b$ [V]	—	מפל המתח על המברשות	
$I_a$ [A]	—	הזרם בעוגן	$E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$ (עירור מקבילי)
I [A]	—	זרם הצרכן במחולל / זרם המקור במנוע	$E = U - I \cdot R_a - \Delta U_b$ (עירור זר)
			$E = U - I (R_a + R_{es}) - \Delta U_b$ (עירור טורי)

#### 3.2 במנוע לזרם ישר

#### 3.3 חישוב מהירות

$$n = \frac{E}{K_e \Phi}$$

n	—	מהירות המכונה
---	---	---------------



3.4 חישוב זרמים במנוע

הזרם הנצרך על-ידי המנוע	$I$	[A]	$I = I_a$	$I_e = \frac{U_e}{R_e}$	עירור זר
הזרם בעוגן (רוטור)	$I_a$	[A]	$I = I_a + I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e}$	עירור מקבילי
הזרם בסליל העירור	$I_e$	[A]	$I = I_a = I_e$		עירור טורי

3.5 חישוב 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

3.6 חישוב הספקים והפסדי הספק

הספק אלקטרו מגנטי	—	$P_{em}$	[W]
הפסדי נחושת	—	$\Delta P_{Cu}$	[W]
הפסדי נחושת בעוגן (רוטור)	—	$\Delta P_{Cu_a}$	[W]
הספק מכני	—	$P_{mech}$	[W]
הפסדי ברזל	—	$\Delta P_{Fe}$	[W]
הפסדי נחושת בסליל העירור	—	$\Delta P_{Cu_e}$	[W]
הספק מבוא	—	$P_{in}$	[W]
הספק מוצא	—	$P_{out}$	[W]
הספק חשמלי	—	$P_{חשמלי}$	[W]
הספק מכני	—	$P_{מכני}$	[W]

$$P_{חשמלי} = U \cdot I$$

$$P_{em} = E \cdot I_a$$

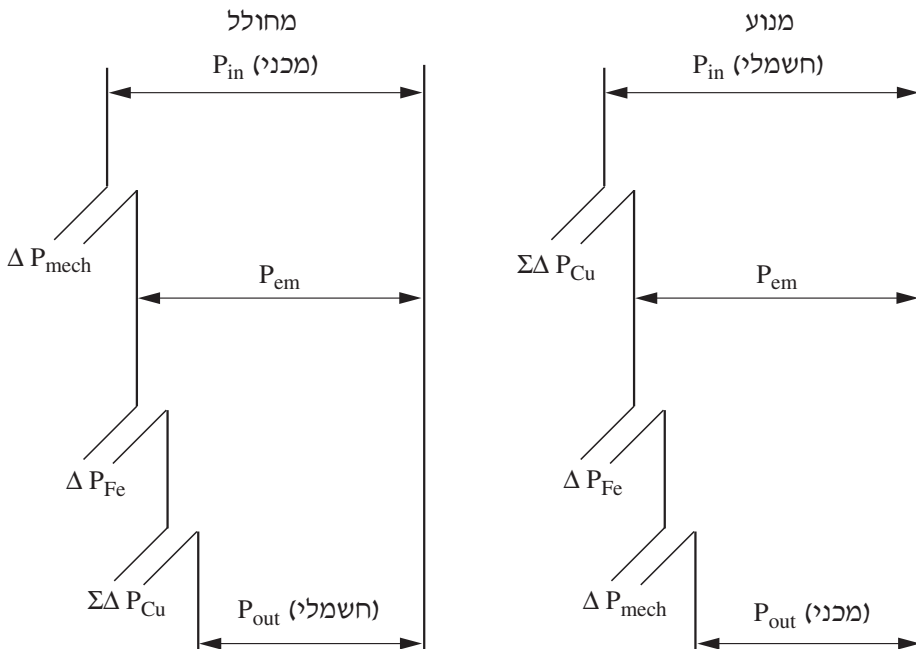
$$\Delta P_{Cu_a} = I_a^2 \cdot R_a$$

$$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$$

$$\Sigma \Delta P = \Sigma \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$$

$$P_{מכני} = M \cdot \omega$$

3.7



3.8 מומנטים

מומנט נקוב	—	$M_n$ [N · m]
מהירות זוויתית	—	$\omega_n$ $\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב נקובה	—	$n_n$ [r.p.m]
מקדם חישוב המומנט	—	$K_m$
מספר מוליכים ברוטור	—	$Z$
מספר זוגות קטבים	—	$p$
מספר זוגות ענפים	—	$a$
מקבילים בעוגן		
מומנט אלקטרומגנטי	—	$M_{em}$ [N · m]
שטף מגנטי	—	$\Phi$ [Wb]
זרם העוגן	—	$I_a$ [A]
הספק אלקטרומגנטי	—	$P_{em}$ [W]
סכום הפסדי הנחשת	—	$\Sigma P_{Cu}$ [W]
הפסדי הברזל	—	$\Delta P_{Fe}$ [W]
הספק מבוא	—	$P_{in}$ [W]
הספק מוצא	—	$P_{out}$ [W]
איבודי מומוט בריקם	—	$\Delta M_0$ [N · m]

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \frac{P_n}{n_n}$$

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$$

$$M_{em} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$K_m = \frac{Z \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

$$\frac{K_e}{K_m} = \frac{2\pi}{60} = 0.1047$$

$$\Delta M_0 = M_{em_n} - M_n$$

3.9 חישוב מהירות במנוע

א. במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי

מקדם חישוב הכא"מ	—	$K_e$	$n_o = \frac{U}{K_e \Phi}$
שטף מגנטי	—	$\Phi$ [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	—	$M_{em}$ [Nm]	
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	—	$R_a$ [ $\Omega$ ]	
התנגדות סליל העירור	—	$R_e$ [ $\Omega$ ]	
התנגדות נוספת במעגל העוגן	—	$R_x$ [ $\Omega$ ]	

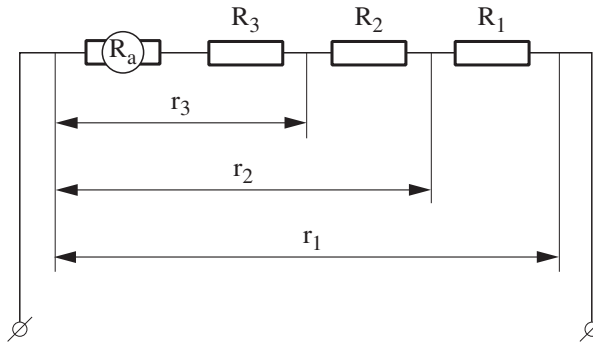
ב. במנוע בעירור טורי

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

**3.10 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 n	—	$R_n$ [Ω]	$r_n = \frac{r_1}{\lambda^{n-1}}$
			$r_2 = \frac{r_1}{\lambda}$
			$R_n = r_n - r_{n+1}$

**מתנע בעל שלוש דרגות**



## 4. מנוע השראתי – תלת מופעי

### 4.1 חישוב זרמים

זרם נקוב קוי	—	$I_{1n}$ [A]
הספק נקוב המופק על ידי המנוע	—	$P_n$ [W]
גורם הספק	—	$\cos \varphi$
נצילות	—	$\eta$
זרם מופעי בסטטור	—	$I_{ph1}$ [A]
זרם מופעי ברוטור המשוקף לסטטור	—	$I_{ph2}$ [A]
התנגדות סליל אחד בסטטור	—	$R_1$ [ $\Omega$ ]
התנגדות סליל אחד בעוגן	—	$R_2$ [ $\Omega$ ]
התנגדות סליל העוגן המשוקף לסטטור	—	$R'_2$ [ $\Omega$ ]
היגב מופעי ברוטור ניח	—	$X_{20}$ [ $\Omega$ ]
ההיגב הכולל של המנוע	—	$X_T$ [ $\Omega$ ]
יחס תמסורת בין ערכים מופעיים	—	$a_{ph}$
מס' כריכות בסליל	—	$N$ [T]
מקדם ליפוף של הסליל	—	$K_N$
גורם החליקה	—	$s$
כא"מ מופעי מושרה ברוטור ניח ופתוח	—	$E_{ph2(0)}$ [V]
הספק המנוע בריקם	—	$P_0$ [W]
גורם ההספק בריקם	—	$\cos \varphi_0$

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

(בהזנחת זרם ריקם)

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

$$I_{ph2} = \frac{E_{ph2(0)}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

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

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

### 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 ריקם) — זרם פאזורי מופעי בסטטור בהתנעה —  $I_{ph1(st)}$  [A]

— זרם פאזורי מופעי ברוטור משוקף לסטטור בהתנעה —  $I_{ph2(st)}$  [A]

$$I'_{ph2(st)} \approx I_{ph1(st)} = \frac{U_{ph1}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + X_T^2}}$$

$$X_T = X_1 + X_{2(0)}$$

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

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

**4.4 מהירות וגורם החלקה**

מהירות סנכרונית —  $n_s$  [r.p.m]

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

תדירות הרשת —  $f_1$  [Hz]

מס' זוגות קטבים —  $p$

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

תדירות הזרם ברוטור —  $f_2$  [Hz]

גורם החלקה (חליקה) —  $S$

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

מהירות קריטית —  $n_k$  [r.p.m]

היחס בין המומנט המירבי למומנט הנקוב של המנוע —  $\lambda_{max}$

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

מומנט מירבי (קריטי) —  $M_k$

מומנט נקוב —  $M_n$

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

גורם החלקה במומנט קריטי —  $S_k$

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}} \approx \frac{R_2'}{X_T}$$

גורם החלקה במומנט נקוב —  $S_n$

4.5 הספקים ואיבודי הספק

הספק (ממשי) מושקע	—	$P_{in}$	[W]
הספק מופק על גל המנוע	—	$P_n$	[W]
הספק אלקטרומגנטי	—	$P_{em}$	[W]
הספק מכני	—	$P_{mech}$	[W]
איבודי נחושת בסטטור	—	$\Delta P_{Cu_1}$	[W]
איבודי נחושת ברוטור	—	$\Delta P_{Cu_2}$	[W]
איבודי ברזל ברוטור	—	$\Delta P_{Fe}$	[W]
איבודי חיכוך ואיזורור	—	$\Delta P_{mech}$	[W]
איבודים נוספים	—	$\Delta P_{add}$	[W]
גורם הספק בסטטור	—	$\cos \varphi_1$	
זרם קוי בסטטור	—	$I_1$	[A]
הספק המנוע בריקם	—	$P_o$	[W]
גורם החלקה	—	$s$	

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

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

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

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

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

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

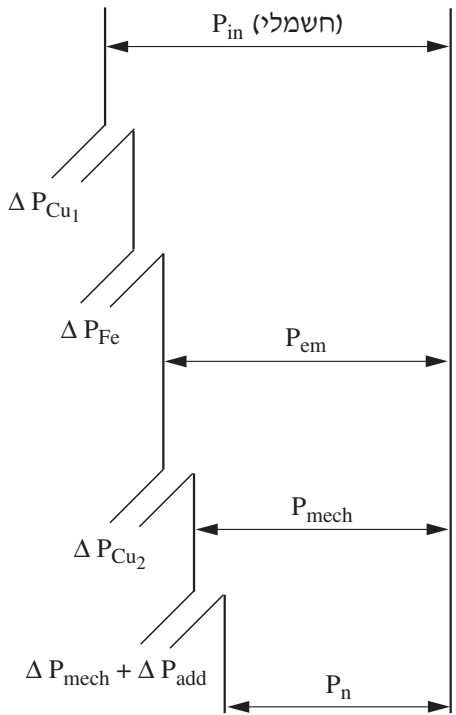
$$\Delta P_{Cu_2} = P_{em} \cdot s = P_{mech} \cdot \left( \frac{s}{1-s} \right)$$

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

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

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

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





4.6 חישובי מומנטים

המהירות הזוויתית של הרוטור	— $\omega_n$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$
המהירות הזוויתית של השדה המסתובב	— $\omega_s$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60}$
מהירות סיבובית של השדה (סנכרונית)	— $n_n$	[r.p.m]	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n_n}$
הספק נקוב מופק של 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	— $M_{em_{start}}$	[Nm]	$M_{em} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט אלקטרומגנטי	— $M_{em}$	[Nm]	$M_{em_{start}} = \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2 \cdot R_2'}{n_s \left[ \left( R_1 + R_2' \right)^2 + X_T^2 \right]}$
מומנט מירבי (קריטי)	— $M_k$	[Nm]	$M_k \cong \frac{3 \cdot 9.55 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
			$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$
			$\frac{M_I}{M_{II}} = \left( \frac{U_I}{U_{II}} \right)^2$
			$\frac{M_{start}(\Delta)}{M_{start}(Y)} = 3$

4.7 נגד נוסף במעגל רוטור

א. כאשר המנוע מועמס במומנט נקוב

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

ב. כאשר המנוע מועמס במומנט כלשהו –  $M_x$

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

- $R_x$   $[\Omega]$  התנגדות נגד טורי נוסף לסליל הרוטור
- $R_2$   $[\Omega]$  התנגדות סליל הרוטור
- $s_n$  חליקה נקובה
- $s_x$  חליקה מותאמת למהירות  $n_x$
- $\lambda_{max}$  היחס בין מומנט מירבי למומנט נקוב

4.8 תכנון מתנגד הדרגתי למנוע השראתי רוטור מלופף

- $m$  מספר דרגות התנעה
- $r_1$   $[\Omega / \text{ph}]$  התנגדות מירבית של מעגל הרוטור ברגע ההתנעה
- $R_2$   $[\Omega / \text{ph}]$  התנגדות מעגל הרוטור לפאזה
- $M_{min}$   $[\text{Nm}]$  מומנט מזערי בהתנעה
- $M_{max}$   $[\text{Nm}]$  מומנט מירבי בהתנעה
- $M_n$   $[\text{Nm}]$  מומנט נומינלי
- $r_n$   $[\Omega / \text{ph}]$  התנגדות כוללת של דרגה  $n$
- $R_n$   $[\Omega / \text{ph}]$  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]	משוואת התנועה:
כוח דינמי	—	$F_d$	[N]	משוואת התנועה: $F = F_s + F_d$
כוח נגדי	—	$F_s$	[N]	
מסת הגוף	—	$m$	[kgf · s <sup>2</sup> / m] [kg]	$F_d = m \frac{dv}{dt} = ma$
מהירות	—	$v$	[m / s]	
תאוצה	—	$a$	[m / s <sup>2</sup> ]	

### 5.2 תנועה סיבובית

מומנט סיבובי	—	$M$	[N · m]	משוואת התנועה:
מומנט סטטי (נגדי)	—	$M_s$	[N · m]	משוואת התנועה: $M = M_s + M_d$
מומנט דינמי	—	$M_d$	[N · m]	
מומנט התמדה (אינרציה)	—	$J$	[kgf · m · s <sup>2</sup> ]	$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$
תאוצה זוויתית	—	$\frac{d\omega}{dt}$	$\left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	
מומנט תנופה	—	$GD^2$	[kgf · m <sup>2</sup> ]	$M - M_s = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$
תאוצת הכובד	—	$g = 9.8$	[m/s <sup>2</sup> ]	$GD^2 = 4gJ$
קוטר האינרציה	—	$D$	[m]	
מהירות סיבוב	—	$n$	[r.p.m]	

## 6. העברת מומנטים

### תנועה סיבובית

#### העברת מומנט סטטי

מומנט סטטי (נגדי) של המנגנון —  $M_{sm}$  [kgf · m]

$$M_s = \frac{M_{sm}}{K \cdot \eta}$$

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

מומנט סטטי (נגדי) המועבר לציר המנוע —  $M_s$  [kgf · m]

$$K = \frac{n}{n_m}$$

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

מהירות סיבוב ציר המנוע —  $n$  [r.p.m]

עבור תמסורת של  $i$  גלגלי שיניים:

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

מהירות סיבוב ציר המנגנון —  $n_m$  [r.p.m]

נצילות התמסורת —  $\eta$

#### העברת מומנטי תנופה לציר המנוע

מומנט תנופה של המנוע —  $GD_N^2$  [kgf · m<sup>2</sup>]

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

מומנט תנופה של גלגל התמסורת ה- $i$  או העומס הנגדי ה- $i$  —  $GD_i^2$  [kgf · m<sup>2</sup>]

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

מהירות סיבוב ציר המנוע —  $n$  [r.p.m]

מהירות סיבוב הציר המשני של התמסורת או של העומס הנגדי —  $n_i$  [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]	
מהירות הקווית של המטען	—	$v$ [m / s]	$v = \frac{\pi D n}{60}$
מהירות הסיבוב של ציר המנוע	—	$n$ [r.p.m]	
נצילות התמסורת	—	$\eta$	
קוטר התוף	—	$D$ [m]	

**העברת מסות למומנט תנופה**

משקל הגוף	—	$G$ [kgf]	$GD^2 = 365G \left( \frac{v}{n} \right)^2$
-----------	---	-----------	--

**זמן התנעה וזמן עצירה**

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- $GD^2$  קבועים)

מומנט תנופה	—	$GD^2$ [kgf · m <sup>2</sup> ]	$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_2 - n_1}{M - M_s}$	: בהתנעה:
מהירות סיבוב התחלתית	—	$n_1$ [r.p.m]		
מהירות סיבוב סופית	—	$n_2$ [r.p.m]	$t = \frac{GD^2}{38.2} \frac{n_2 - n_1}{M + M_s}$	: בבלימה:
מומנט סיבובי	—	$M$ [N · m]		
מומנט סטטי (נגדי)	—	$M_s$ [N · m]		

**בהצלחה !**