

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנכתוב תשובות

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(22 עמודים)

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואות מתחים וקטורית

כא"מ מופעי E_{ph} [V] -

מתח מופעי U_{ph} [V] -

זרם מופעי בסטטור I_{ph} [A] -

התנגדות העוגן למופע אחד R_a [Ω] -

היגב סינכרוני למופע אחד X_s [Ω] -

$$\bar{E}_{ph} = \bar{U}_{ph} + \bar{I}_{ph} (R_a + j X_s)$$

(בהזנחת התנגדות העוגן)

$$\bar{E}_{ph} = \bar{U}_{ph} + \bar{I}_{ph} \cdot j X_s$$

חישוב היגב סינכרוני

$$X_s \approx \frac{E_{phk}}{I_{phk}}$$

כא"מ מופעי בניסוי בריקס E_{pho} -

כא"מ מופעי בניסוי בקצר E_{phk} -

זרם מופעי בסטטור בניסוי בקצר I_{phk} -

זרם עירור בניסוי בריקס I_{fo} -

זרם עירור בניסוי בקצר I_{fk} -

(בהזנחת R_a ובעקום מיגנוט לינארי)

$$\frac{E_{phk}}{E_{pho}} = \frac{I_{fk}}{I_{fo}}$$

עבור עומס התנגדותי ($\varphi=0^\circ$):

φ - הזווית בין הזרם המופעי
 למתח המופעי

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} + I_{ph} \cdot R_a)^2 + (I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

Ψ - הזווית בין הזרם המופעי
 לכא"מ המופעי

$$\tan\Theta = \frac{I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} + I_{ph} \cdot R_a}$$

Θ - הזווית בין המתח המופעי
 לכא"מ המופעי

עבור עומס השראותי ($0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan\Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \Psi - \varphi$$

עבור עומס קיבולי ($-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan\Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi + I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \varphi \pm \Psi$$

2. מנוע סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph} (R_a + j X_s)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{בהזנחת} \\ \text{התנגדות} \\ \text{העוגן} \end{array} \right) \vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph} \cdot j X_s$$

עבור עומס התנגדוטי ($\varphi = 0^\circ$):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} - I_{ph} \cdot R_a)^2 + (I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan \Theta = \frac{I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} - I_{ph} \cdot R_a}$$

עבור עומס השראוטי ($0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi - I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \varphi \pm \Psi$$

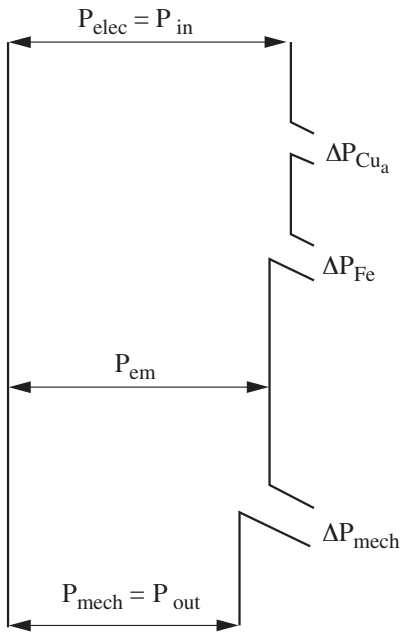
עבור עומס קיבולי ($-90^\circ \leq \varphi < 0^\circ$):

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a)^2 + (U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s)^2}$$

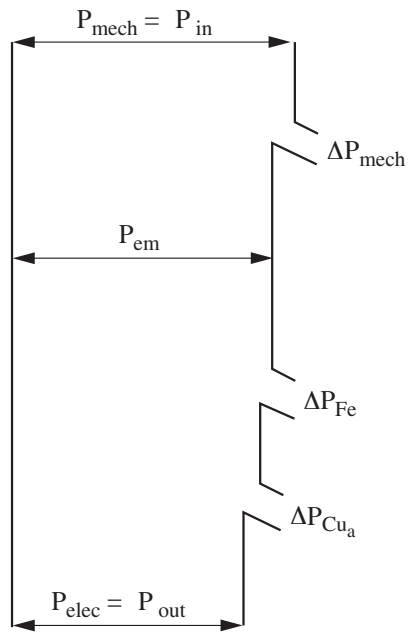
$$\tan \Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin \varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos \varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \Psi - \varphi$$

הספקים ואיבודי הספק במכונה סינכרונית:



מנוע



מחולל

הספק מכני	-	P_{mech} [W]	$P_{mech} = M \cdot \omega_s = \frac{M \cdot n_s}{9.55}$
מומנט	-	M [Nm]	
מהירות זוויתית סינכרונית	-	ω_s $\left[\frac{rad}{sec} \right]$	$\omega_s = \frac{2 \pi n_s}{60}$
מהירות סינכרונית	-	n_s [rpm]	
תדירות	-	f [Hz]	$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$
מס' זוגות קטבים	-	p	
הספק חשמלי	-	P_{elec} [W]	$P_{elec} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos \varphi$
גורם הספק	-	$\cos \varphi$	
כא"מ מופעי	-	E_{ph} [V]	$P_{elec} = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot U_{ph}}{X_s} \cdot \sin \Theta$
היגב סינכרוני מופעי	-	X_s [Ω]	
הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי	-	ψ	$Q = \frac{3}{X_s} \left[U_{ph} \cdot E_{ph} \cdot \cos \Theta - U_{ph}^2 \right]$
הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי	-	Θ	
הספק עיוור	-	Q [VAr]	$P_{em} = 3 \cdot E_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos \psi$
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em} [W]	
הפסדי נחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu_a} [W]	$\Delta P_{Cu_a} = 3 \cdot I_{ph}^2 \cdot R_a$
הפסדי נחושת בסליל (DC) ברוטר	-	ΔP_{Cu_e} [W]	
הפסדים מגנטיים בליבת הברזל	-	ΔP_{Fe} [W]	$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100$
הפסדים מכניים	-	ΔP_{mech} [W]	
נצילות המכונה	-	η [%]	
הספק מוצא	-	P_{out} [W]	
הספק מבוא	-	P_{in} [W]	

ב. שיקולים ושיטות לבחירת מנועים חשמליים

מיון חומרי בידוד על-פי טמפרטורה מרבית מותרת:

C	H	F	B	E	A	Y	קבוצת חומר הבידוד
>180	180	155	130	120	105	90	טמפרטורת סביבה מרבית (°C)

הפרש הטמפרטורה בין גוף ΔT_0 [°C]

המנוע לסביבה בזמן $t = 0$

הפרש הטמפרטורה בין גוף ΔT_∞ [°C]

המנוע לסביבה בזמן $t = \infty$

$$\Delta T = \Delta T_0 + (\Delta T_\infty - \Delta T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

הפרש הטמפרטורה בין ΔT [°C]

גוף המנוע לסביבה בזמן t

כלשהו

$$\left(\begin{array}{l} \text{בהנחת} \\ \Delta T_0 = 0 \end{array} \right) \Delta T = \Delta T_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

זמן t [sec]

קבוע זמן חימום τ [sec]

מקדם פיזור החום באוויר α $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

זורם

$$\alpha = \alpha_0 (1 - K \cdot \sqrt{V})$$

מקדם פיזור החום באוויר α_0 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

נח

$$\tau = \frac{G \cdot C}{\alpha \cdot A_T}$$

מהירות האוויר V $\left[\frac{m}{sec} \right]$

מקדם האיורור K

שטח פיזור החום A_T [m²]

משקל G [kg]

$$\Delta T_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot A_T}$$

חום סגולי C $\left[\frac{W \cdot sec}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

$$\Delta P = \frac{P_n}{\eta} - P_n$$

סכום הפסדי ההספק של המנוע ΔP [W]

הספק נקוב של המנוע P_n [W]

נצילות המנוע η

בחירת הספק מנוע לעבודה עם הפסקות (ש.ה.):

$$t_w \leq 2 \cdot \tau \quad \text{תנאי פעולה:}$$

$$t_o \geq 5 \cdot \tau$$

זמן עבודה	-	t_w	[sec]	$P_n = \frac{P_x}{\sqrt{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}}} \right) \frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2}}}$
קבוע זמן תרמי	-	τ	[sec]	
הספק נקוב של המנוע בעבודה ממושכת	-	P_n	[W]	
הספק העומס	-	P_x	[W]	$P_n = P_x \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}} \right)$
מהירות זוויתית	-	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	
מהירות סיבוב	-	n	[rpm]	$P_x = M \cdot \omega$
קבוע ההפסדים הקבועים	-	K_1		$\omega = \frac{2\pi n}{60}$
קבוע ההפסדים המשתנים	-	K_2		

בחירת הספק מנוע לעבודה עם הפסקות מחזוריות (ש.ה.מ.):

$$P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{K_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}} \right)}{1 - e^{-(t_w+t_o)/\tau} - K_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_w}{\tau}} \right)}}$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{כאשר} \\ t_w \ll \tau \end{array} \right) \quad P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{t_w}{t_w + t_o}}$$

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

שיטת ההפסדים הממוצעים

$$\Delta P_{av} = \frac{\Sigma(\Delta P_i \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \Sigma t_w}$$

הפסדי הספק ממוצעים - ΔP_{av} [W]

הפסדי הספק בקטע i - ΔP_i [W]

זמן בקטע i - t_i [sec]

זמן התנעה (start) - t_s [sec]

זמן בלימה (brake) - t_b [sec]

זמן הפסקה (מנוחה) (rest) - t_r [sec]

זמן בעומס כלשהו במצב - t_w [sec]

שאינו בלימה, התנעה או הפסקה

הזרם השקול - I_{eq} [A]

זרם המנוע בקטע i - I_i [A]

התנאי לבחירת מנוע:

$$\Delta P_{av} \leq \Delta P_n$$

שיטת הזרם השקול

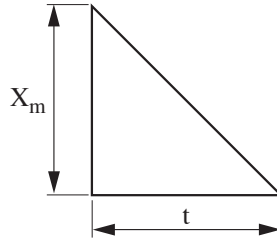
$$I_{eq} = \sqrt{\frac{\Sigma(I_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \Sigma t_w}}$$

שיטת המומנט השקול

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{\Sigma(M_i^2 \cdot t_i)}{\beta(t_s + t_b) + \alpha \cdot t_r + \Sigma t_w}}$$

מציאת זרם/מומנט שקול

משולש:

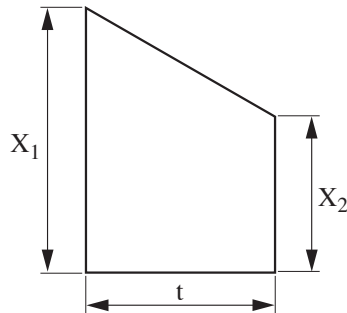


$$X_{eq} = \frac{X_m}{\sqrt{3}}$$

זרם/מומנט שקול - X_{eq}

זרם/מומנט מרבי - X_m

טרפז:



$$X_{eq} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_1 X_2}{3}}$$

זרם/מומנט מרבי - X_1

זרם/מומנט מזערי - X_2

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

- P_T [W] הספק העמסה מותר
- P_n [W] הספק נומינלי
- $\Delta T_{\infty T}$ [°C] הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה לא תקנית
- ΔT_{∞} [°C] הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה תקנית
- K_1 קבוע ההפסדים הקבועים
- K_2 קבוע ההפסדים המשתנים

$$P_T = P_n \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{\infty T}}{\Delta T_{\infty}} - K_1\right) \cdot \frac{1}{K_2}}$$

ג. מנוע לזרם ישר

כוח אלקטרו-מניע:

- E [V] כוח אלקטרו-מניע
- z מספר המוליכים ברוטור
- p מספר זוגות הקטבים
- a מספר זוגות הענפים המקבילים ברוטור

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

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

$$K_m = \frac{z \cdot p}{2\pi \cdot a}$$

$a = 1$ (ליפוף גלי פשוט)

$a = p$ (ליפוף עניבה פשוט)

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

מומנטים:

- מומנט אלקטרו-מגנטי - M_{em} [Nm]
- מומנט נומינלי - M_n [Nm]
- איבודי מומנט בריקם - ΔM_o [Nm]
- מהירות זוויתית - ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
- מהירות סיבוב של הרוטור - n [rpm]

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_{em}}{n} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n}$$

$$\Delta M_o = M_{em} - M_n$$

הספקים:

- עוצמת הזרם ברוטור - I_a [A]
- הספק חשמלי (מושקע) - P_{in} [W]
- הספק אלקטרו-מגנטי - P_{em} [W]
- הספק נומינלי (מופק) - P_n [W]
- נצילות המנוע - η

$$P_{in} = U \cdot I \quad P_{em} = E \cdot I_a$$

$$P_n = M_n \cdot \omega \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\eta = \frac{P_n}{P_{in}}$$

איבודי הספק:

- איבודי הספק ברוטור - ΔP_{Cu_a} [W]
- איבודי הספק בסליל העירור המקבילי - ΔP_{Cu_e} [W]
- איבודי הספק בסליל העירור הטורי - ΔP_{Cu_s} [W]
- איבודי הספק בברזל - ΔP_{Fe} [W]
- איבודי הספק מכניים - ΔP_{mech} [W]
- התנגדות סליל העוגן - R_a [Ω]
- התנגדות סליל העירור המקבילי - R_e [Ω]
- התנגדות סליל העירור הטורי - R_s [Ω]

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

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

$$\Delta P_{Cu_s} = I_s^2 \cdot R_s$$

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_{em} - P_n$$

סוג עירור	זרם העוגן	זרם העירור	כ.א.מ.	כ.מ.מ.
טורי	$I = I_a = I_e$		$E = U - I(R_a + R_s)$	$NI = N_s \cdot I$
זר	$I_a = I$	$I_e = \frac{U_e}{R_e + R_{re}}$	$E = U - I_a \cdot R_a$	$NI = N_e \cdot I_e$
מקבילי	$I_a = I - I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e + R_{re}}$	$E = U - I_a(R_a + R_s)$	^(*) $NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I_a$
מעורב ארוך			$E = U - I \cdot R_s - I_a \cdot R_a$	^(*) $NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I$
מעורב קצר				

(* הערה:

הסימן (+) מתייחס לעירור מעורב מתוסף
הסימן (-) מתייחס לעירור מעורב מתחסר

- עוצמת הזרם ברוטור - I_a [A]
- עוצמת הזרם הנצרך על-ידי המנוע - I [A]
- עוצמת הזרם בסליל העירור - I_e [A]
- כוח אלקטרו-מניע - E [V]
- מתח - U [V]
- מתח העירור - U_e [V]
- התנגדות סליל העוגן - R_a [Ω]
- התנגדות סליל העירור המקבילי - R_e [Ω]
- התנגדות נוספת במעגל העירור - R_{re} [Ω]
- כוח מגנטו-מניע - NI [AT]
- מספר הכריכות בסליל העירור הטורי - N_s [T]
- מספר הכריכות בסליל העירור המקבילי - N_e [T]

ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

הכנסת נגד טורי למעגל העוגן:

- מהירות סיבוב - n [rpm]
- מהירות סיבוב בריקס - n_0 [rpm]
- התנגדות נוספת במעגל הרוטור - R_x [Ω]
- התנגדות סליל העוגן - R_a [Ω]

$$n_0 = \frac{U}{K_e \Phi} \quad n = \frac{E}{K_e \Phi}$$

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

- שטף מגנטי - Φ [Wb]
- מתח - U [V]
- כוח אלקטרו־מניע - E [V]
- מספר כריכות בסליל העירור - N_e [T]
- מומנט אלקטרו־מגנטי - M_{em} [Nm]

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_x}{(K_e \Phi)^2}$$

הכנסת נגד טורי למעגל העירור:

$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$$

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{N_e \cdot I_{e1}}{N_e \cdot I_{e2}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{עבור} \\ \text{מעגל מגנטי} \\ \text{בתחום הלינארי} \end{array} \right)$$

שינוי מתח העוגן באמצעות בקרת מחזור הפעולה (Duty Cycle):

- מתח - U [V]
- מתח הרוטור השקול - U_a [V]
- מחזור הפעולה - D
- זמן פעולה - T_{on} [sec]
- זמן הפסקה - T_{off} [sec]

$$n = \frac{U_a - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi} = \frac{U \cdot D - I_a \cdot R_a}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U_a}{K_e \Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$$

$$n = \frac{U_a \cdot D}{K_e \Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e \Phi)^2}$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

ייסות מהירות של מנוע לזרם ישר בעירור מעורב

$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi}$$

הכנסת נגד למעגל הרוטור:

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_s + R_x)}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_s + R_x}{(K_e \Phi)^2}$$

הכנסת נגד למעגל העירור:

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_s}{(K_e \Phi)^2}$$

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{(NI)_1}{(NI)_2} \left(\begin{array}{l} \text{עבור} \\ \text{מעגל מגנטי} \\ \text{בתחום הליניארי} \end{array} \right)$$

שינוי מתח העוגן באמצעות בקרת מחזור הפעולה (Duty Cycle):

$$n = \frac{U_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi} = \frac{U \cdot D - I_a R_a}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U \cdot D}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_s}{(K_e \Phi)^2}$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

בלימה של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/זר

זרמים

זרם העוגן בבלימה	-	I_b	[A]	בבלימה דינמית:	$I_b = \frac{E_b}{R_a + R_b}$
התנגדות העוגן	-	R_a	[Ω]		
התנגדות נוספת במעגל העוגן בבלימה	-	R_b	[Ω]		
הכא"מ בבלימה	-	E_b	[V]	בבלימה בחיבור נגדי:	$I_b = \frac{E_b + U}{R_a + R_b}$
מתח	-	U	[V]		

בבלימה גנטורית:

$$I_b = \frac{E_b - U}{R_a + R_b}$$

* המתח במעגל העירור קבוע

מומנט בלימה

מומנט אלקטרו-מגנטי נומינלי	-	$M_{em(n)}$	[Nm]	$M_{em(b)} = K_m \Phi \cdot I_b$
מומנט אלקטרו-מגנטי בבלימה	-	$M_{em(b)}$	[Nm]	$M_{em(n)} = K_m \Phi \cdot I_{a(n)} = \frac{P_{em(n)}}{\omega_n}$
מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]	$M_{(n)} = \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_{(n)}}{n_{(n)}}$
איבודי מומנט בריקם	-	ΔM_o	[Nm]	$\Delta M_o = M_{em(n)} - M_{(n)}$
מומנט בלימה	-	M_b	[Nm]	$M_b = M_{em(b)} + \Delta M_o$
הספק נומינלי	-	P_n	[W]	
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]	$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$
מהירות נקובה	-	n_n	[rpm]	
מהירות זוויתית	-	ω_n	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$	

זמני בלימה והתנעה

זמן התנעה	-	t_s	[sec]
זמן בלימה	-	t_b	[sec]
מומנט תנופה כולל המועבר לציר המנוע	-	GD_T^2	[kgf · m ²]
מהירות סיבוב התחלתית	-	n_1	[rpm]
מהירות סיבוב סופית	-	n_2	[rpm]
מומנט סיבובי שקול בבלימה/בהתנעה	-	M	[Nm]
מומנט סטטי (נגדי)	-	M_s	[Nm]

$$t_s = \frac{GD_T^2}{38.2} \left(\frac{n_2 - n_1}{M - M_s} \right)$$

$$t_b = \frac{GD_T^2}{38.2} \left(\frac{n_1 - n_2}{M + M_s} \right)$$

ד. מנוע השראה תלת מופעי

זרמים:

זרם נומינלי קווי	-	I_{1n}	[A]
גורם ההספק	-	$\cos \varphi$	
נצילות	-	η	
זרם נומינלי פאזי בסטטור	-	I_{1phn}	[A]
זרם נומינלי פאזי ברוטור משוקף לסטטור	-	I'_{2phn}	[A]
מתח פאזי בסטטור	-	U_{ph1}	[V]
התנגדות סליל הסטטור	-	R_1	[Ω]
התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	R'_2	[Ω]
ההיגב הכולל של סלילי המנוע	-	X_T	[Ω]
זרם נומינלי פאזי ברוטור	-	I_{ph2}	[A]
כא"מ פאזי ברוטור ניח	-	$E_{ph2(0)}$	[V]
יחס התמסורת	-	a_{ph}	
מהירות סיבוב בעומס	-	n	[rpm]
מהירות סינכרונית	-	n_s	[rpm]
גורם החליקה	-	s	
תדירות	-	f	[Hz]
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]
חליקה נומינלית	-	s_n	
חליקה קריטית	-	s_K	
היגב סליל הסטטור	-	X_1	[Ω]
היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור	-	X_2	[Ω]

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

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

$$a_{ph} = \frac{U_{ph1}}{E_{ph2(0)}} \approx \frac{I_{ph2}}{I_{ph1}}$$

מהירות וגורם החליקה:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad f_2 = f_1 \cdot s$$

$$n = n_s (1 - s) \quad s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{M_K}{M_n} = \left[\frac{s_K}{s_n} + \frac{s_n}{s_K} \right] \cdot \frac{1}{2}$$

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

$$s_K = \frac{R'_2}{R_1 + X_T^2}$$

$$R'_2 = R_2 \cdot a_{ph}^2 \quad X'_2 = X_2 \cdot a_{ph}^2$$

$$X_T = X_1 + X'_2$$

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

מומנט נומינלי	-	M_n	[Nm]	$M_n = 9.55 \frac{P_n}{n_n}$
מומנט אלקטרו-מגנטי	-	M_{em}	[Nm]	$M_{em} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_s}$
מומנט קריטי	-	M_K	[Nm]	
מהירות סיבוב נומינלית	-	n_n	[rpm]	
מהירות סיבוב סינכרונית	-	n_s	[rpm]	$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{\Delta P_{Cu2}}{s}$
גורם החליקה	-	s		
חליקה קריטית	-	s_K		$\Delta P_{Cu2} = P_{mech} \cdot \frac{s}{1-s} = 3 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R_2$
הספק נומינלי (מופק)	-	P_n	[W]	$\Delta P_{Cu1} = 3 \cdot I_{1ph}^2 \cdot R_1$
הספק חשמלי (מושקע)	-	P_{in}	[W]	$P_{mech} = P_n + \Delta P_{mech}$
הספק אלקטרו-מגנטי	-	P_{em}	[W]	$P_{in} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi$
הספק מכני	-	P_{mech}	[W]	$P_n = P_{in} \cdot \eta$
נצילות	-	η		
איבודי הספק מכניים	-	ΔP_{mech}	[W]	$M_K = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{ph}^2}{2 \cdot n_s \cdot X_T}$
איבודי הספק בנחושת בסטטור	-	ΔP_{Cu1}	[W]	
איבודי הספק בנחושת ברוטור	-	ΔP_{Cu2}	[W]	$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$ (נוסחת קלוס) (מקורבת)
זרם נומינלי קווי	-	I_{1n}	[A]	
זרם פאזי ברוטור	-	I_{2ph}	[A]	$M_{em} = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{ph}^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{n_s \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$
				$X_T = X_1 + X'_2$

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס
 במומנט נקוב:

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

R_x [Ω] - התנגדות פאזית נוספת
 ברוטור

R_2 [Ω] - ההתנגדות הפאזית של
 הרוטור

כאשר המנוע מועמס
 במומנט כלשהו (M_x):

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

s_x - גורם החליקה במהירות
 מסוימת

s_n - גורם החליקה במהירות
 נומינלית

M_x [Nm] - מומנט

M_n [Nm] - מומנט נומינלי

n_x [rpm] - מהירות סיבוב

n_s [rpm] - מהירות סיבוב סינכרונית

$$s_x = \frac{n_s - n_x}{n_s}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{M_K}{M_n}$$

שינוי תדירות הרשת:

$$\frac{U^*}{U} = \frac{f^*}{f}$$

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

$$n_s^* = \frac{60 \cdot f^*}{p}$$

ה. תופעות מעבר

מצבי מעבר בהתנעת מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מהירות סיבוב בריקס	-	n_o [rpm]	$n_o = \frac{U}{K_e \phi}$
שטף בסליל העירור	-	ϕ [Wb]	
מתח הדקים	-	U [V]	
קבוע זמן אלקטרומכני	-	T [sec]	$T = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$
מקדמים	-	K_e, K_m	
מומנט תנופה	-	GD^2 [kgf · m ²]	$R = R_a + R_s$
ההתנגדות הכוללת של מעגל העוגן	-	R [Ω]	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2}$
התנגדות סליל העוגן	-	R_a [Ω]	
התנגדות המתנע במעגל העוגן	-	R_s [Ω]	$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
שינוי מהירות כתוצאה מעומס	-	Δn_L [rpm]	$n_L = n_o - \Delta n_L$
זמן	-	t [sec]	
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	-	n_{st} [rpm]	$n_L = n_o - \frac{I_L R}{K_e \phi}$
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L	-	n_L [rpm]	$n_{st} = n_o - \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
זרם המתאים למומנט נגדי M_L	-	I_L [A]	$I_L = \frac{M_L}{K_m \phi}$
זרם המנוע בהתנעה	-	I_{st} [A]	
זרם רגעי של המנוע	-	i [A]	$i = I_L + (I_{st} - I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
מומנט המתפתח על-ידי המנוע בזמן התנעה	-	M_{st} [kgf · m]	
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	-	M_L [kgf · m]	$M = M_L + (M_{st} - M_L) e^{-\frac{t}{T}}$

בלימה דינמית של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

<p>מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L, בערך מוחלט</p>	<p>- Δn_L [rpm]</p>	$n = -\Delta n_L + (n_{st} + \Delta n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
<p>התנגדות כוללת במעגל העוגן</p>	<p>- R [Ω]</p>	$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e K_m \phi^2} = \frac{I_L R}{K_e \phi}$
<p>התנגדות סליל העוגן</p>	<p>- R_a [Ω]</p>	
<p>התנגדות נגד הבלימה</p>	<p>- R_b [Ω]</p>	
<p>מומנט העומס בזמן בלימה (מומנט נגדי)</p>	<p>- M_L [kgf · m]</p>	$R = R_a + R_b$
<p>שטף בסליל העירור</p>	<p>- ϕ [Wb]</p>	$T = \frac{GD^2}{38.2} \frac{R}{K_e K_m \phi^2}$
<p>קבוע זמן אלקטרומכני</p>	<p>- T [sec]</p>	
<p>מומנט תנופה</p>	<p>- GD^2 [kgf · m²]</p>	
<p>מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)</p>	<p>- n_{st} [rpm]</p>	<p>כאשר $U = 0$:</p> $n_{st} = \frac{I_{st} R}{K_e \phi}$
<p>זמן</p>	<p>- t [sec]</p>	
<p>זרם המתאים לעומס נגדי M_L</p>	<p>- I_L [A]</p>	
<p>זרם המנוע בתחילת הבלימה</p>	<p>- I_{st} [A]</p>	$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
<p>זרם רגעי של המנוע</p>	<p>- i [A]</p>	

בלימה על-ידי חיבור נגדי של מנוע זרם ישיר בעירור מקבילי

א. ללא הפיכת קוטביות

מהירות סיבוב	-	n	[rpm]
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L	-	n_L	[rpm]
מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)	-	n_{st}	[rpm]
זמן	-	t	[sec]
קבוע זמן אלקטרומכני	-	T	[sec]
מהירות סיבוב נקובה	-	n_n	[rpm]
מתח הדקים	-	U	[V]
זרם העוגן	-	I	[A]
התנגדות כוללת במעגל העוגן	-	R	[Ω]
התנגדות סליל העוגן	-	R_a	[Ω]
התנגדות נגד הבלימה	-	R_b	[Ω]

$$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$n_L = n_n \frac{U - I_a R}{U - I_a R_a}$$

$$R = R_a + R_b$$

ב. עם הפיכת קוטביות

כא"מ מושרה בתחילת הבלימה	-	E_{st}	[V]
מהירות סיבוב בריקס	-	n_o	[rpm]
מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L , בערך מוחלט	-	Δn_L	[rpm]
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	-	n_{st}	[rpm]
זרם רגעי של המנוע	-	i	[A]
זרם המתאים למומנט נגדי M_L	-	I_L	[A]
זרם המנוע בתחילת הבלימה	-	I_{st}	[A]

$$n = -n_o - \Delta n_L + (n_o + n_{st} + \Delta n_L) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$I_{st} = \frac{U + E_{st}}{R}$$

בהצלחה!