

מקום למציאת נבחן

אין להעביר נוסחאון זה
מנבחן אחד למשנהו!

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(14 עמודים)

זמן התנעה וזמן עצירה

(בהנחה שהמומנט הדינמי ו- GD^2 קבועים)

- מומנט תנופה — GD^2 [kgf · m²]
- מהירות סיבוב התחלתית — n_1 [r.p.m.]
- מהירות סיבוב סופית — n_2 [r.p.m.]
- מומנט סיבובי — M [kgf · m]
- מומנט סטטי (נגדי) — M_s [kgf · m]

$$t = \frac{GD^2}{375} \frac{n_2 - n_1}{M - M_s} \quad \text{בהתנעה:}$$

$$t = \frac{GD^2}{375} \frac{n_1 - n_2}{M + M_s} \quad \text{בבלימה:}$$

מנוע לזרם ישר

אופיין מכני של מנוע בעירור מקבילי

- מהירות סיבוב — n [r.p.m.]
- התנגדות מעגל העוגן — R_a [Ω]
- מומנט — M [N · m]
- מתח ההדקים — U [V]
- שטף — ϕ [Wb]
- מקדמים — C_e, C_m

הערה: כאשר השטף קבוע:

$$\frac{C_e}{C_m} = 0.1047$$

מומנטים

מומנט	M	[N · m]
הספק	P	[W]
מהירות זוויתית	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מהירות סיבוב	n	[r.p.m.]
מומנט אלקטרומגנטי	M_{EM}	[N · m]
שטף	ϕ	[Wb]
מקדם	C_m	
זרם הרוטור	I_a	[A]
מומנט בלימה	M_b	[N · m]
מומנט ההפסדים (בריקם)	ΔM_0	[N · m]

$$M = \frac{P}{\omega}$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60}$$

$$M_{EM} = C_m \phi I_a$$

$$M = M_{EM} - \Delta M_0$$

$$M_b = M_{EM} + \Delta M_0$$

מנוע השראתי תלת-מופעי

הספק מכני המתפתח על ציר המנוע	P_{mech}	[W]
מקדם החליקה	s	
הספק אלקטרומגנטי	P_{em}	[W]
הפסדי נחושת ברוטור	ΔP_{cu_2}	[W]

$$P_{mech} = (1 - s) P_{em}$$

$$\Delta P_{cu_2} = s P_{em}$$

הספק ריקם	P_o	[W]
מתח הקו (בין מופעים)	U_L	[V]
זרם ריקם קווי	I_{oL}	[A]
מקדם הספק בריקם	$\cos \phi_o$	
מהירות סיבוב סינכרונית	n_S	[r.p.m.]
מהירות סיבוב הרוטור	n	[r.p.m.]

$$P_o = \sqrt{3} U_L I_{oL} \cos \phi_o$$

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

- I_2' [A] – זרם הרוטור משוקף לסטטור
 U_{ph} [V] – מתח מופעי
 R_1 [Ω] – התנגדות הסטטור (למופע)
 R_2' [Ω] – התנגדות הרוטור
 המשוקפת לסטטור (למופע)
 s – מקדם החליקה
 X_T [Ω] – היגב כולל
 M_n [N·m] – מומנט נקוב
 ω_n [$\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$] – מהירות זוויתית נקובה
 n_s [r.p.m.] – מהירות סינכרונית
 p – מספר זוגות קטבים
 n_n [r.p.m.] – מהירות סיבוב נקובה (נומינלית)
 X_2' [Ω] – היגב השראתי של הרוטור
 המשוקף לסטטור (למופע)
 M [N·m] – מומנט
 s_K – מקדם החליקה הקריטי

$$I_2' = \frac{U_{ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

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

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

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

$$X_T = X_1 + X_2'$$

$$M = 9.55 \frac{3U_{ph}^2 \frac{R_2'}{s}}{n_s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_T^2 \right]}$$

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

כאשר $R_1 \ll X_T$:

$$s_K \cong \frac{R_2'}{X_T}$$

$$M_K \approx \frac{9.55 \cdot 3U_{ph}^2}{2n_s X_T}$$

מומנט קריטי – M_K [N·m]

נוסחת קלוס (נוסחה מקורבת)

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$$

התנעה

- I'_{2k} [A] — זרם הרוטור בקצר המשוקף לסטטור
- U_{ph} [V] — מתח מופעי
- X_1 [Ω] — היגב השראתי של הסטטור (למופע)
- X_2' [Ω] — היגב השראתי של הרוטור המשוקף לסטטור (למופע)
- R_1 [Ω] — התנגדות של הסטטור (למופע)
- R_2' [Ω] — התנגדות של הרוטור המשוקפת לסטטור (למופע)

$$I'_{2k} = \frac{U_{ph}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

ויסות מהירות מנוע השראתי עם רוטור מלופף

- R_x [Ω] — התנגדות הנגד שיש להוסיף במעגל הרוטור (למופע)
- R_2 [Ω] — התנגדות הרוטור (למופע)
- M_n [N·m] — מומנט נקוב
- M [N·m] — מומנט
- s — מקדם החליקה
- s_n — מקדם החליקה בתנאי עבודה נקובים

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

קביעת הספק מנוע בטמפרטורת סביבה לא תקנית

- P_T [W] — הספק העמסה מותר
- P_n [W] — הספק נומינלי
- $\tau_{\infty T}$ [$^{\circ}\text{C}$] — הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה, בטמפרטורה לא תקנית
- τ_{∞} [$^{\circ}\text{C}$] — הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה, בטמפרטורה תקנית
- K_1 — קבוע ההפסדים הקבועים
- K_2 — קבוע ההפסדים המשתנים

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

טמפרטורת המקסימום לפי קבוצת חומר הבידוד

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

חימום וקירור של מנוע חשמלי

הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע
t = 0 בזמן t = 0

$$\tau = \tau_0 + (\tau_\infty - \tau_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע
t = ∞ בזמן t = ∞

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

זמן — t [s]

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

קבוע זמן חימום — T [s]

הפסדי ההספק — ΔP [W]

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

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

בהנחת $\tau_0 = 0$

שטח פיזור החום — A_T [m²]

$$\tau = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot A_T} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

משקל — G [kg]

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

מקדם האוורור — K

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

ויסות מהירות

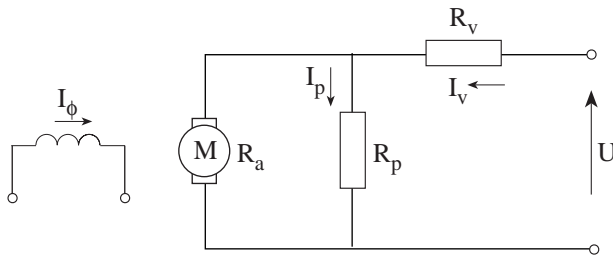
1. ויסות מהירות של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

א. שינוי התנגדות במעגל העוגן

- מתח הזינה – U [V]
- מהירות סיבוב – n [r.p.m]
- מהירות סיבוב בריקס – n_o [r.p.m]
- מקדמים – C_e, C_m
- זרם הרוטור – I_a [A]
- התנגדות סליל העוגן – R_a [Ω]
- התנגדות נוספת במעגל העוגן – R_r [Ω]
- מומנט – M [N · m]

$n = \frac{U - I_a (R_a + R_r)}{C_e \phi}$
$n = \frac{U}{C_e \phi} - M \frac{(R_a + R_r)}{C_e C_m \phi^2}$
$\frac{C_e}{C_m} = 0.1047$

ב. חיבור פוטנציומטרי



- זרם העוגן – I_a [A]
- זרם דרך נגד מקבילי – I_p [A]
- זרם דרך נגד טורי – I_v [A]
- התנגדות העוגן – R_a [Ω]
- זרם בסליל העירור – I_ϕ [A]

$n^* = \frac{U - I_a R_a - I_v R_v}{C_e \phi}$
$I_v = I_a + I_p$

מהירות סיבוב בחיבור פוטנציומטרי	—	n^*	[r.p.m.]
מהירות סיבוב בריקם בחיבור פוטנציומטרי	—	n_o^*	[r.p.m.]
מהירות סיבוב בריקם	—	n_o	[r.p.m.]
מקדם	—	k	
התנגדות טורית בחיבור פוטנציומטרי	—	R_v	[Ω]
התנגדות מקבילית בחיבור פוטנציומטרי	—	R_p	[Ω]
מומנט	—	M	[N · m]
מתח ההדקים	—	U	[V]

$n^* = n_o k - \frac{I_a}{C_e \phi} (R_a + kR_v)$
$k = \frac{R_p}{R_p + R_v} = \frac{n_o^*}{n_o}$
$R_v = \frac{C_e \phi \frac{n_o^* - n^*}{I_a} - R_a}{k}$
$R_p = R_v \frac{k}{1 - k}$
$n^* = n_o k - \frac{M}{C_e C_m \phi^2} (R_a + kR_v)$

ג. שינוי זרם העירור (שטף)

מהירות סיבוב	—	n	[r.p.m.]
מתח הדקים	—	U	[V]
מומנט על הציר	—	M	[N · m]
שטף	—	ϕ	[Wb]
התנגדות העוגן	—	R_a	[Ω]
זרם העוגן	—	I_a	[A]
מקדמים	—	C_e, C_m	

$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{M R_a}{C_e C_m \phi^2}$
$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \phi}$

2. ויסות מהירות של מנוע זרם ישר בעירור טורי

א. שינוי התנגדות מעגל העוגן

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_e + R_r)}{C_e \phi}$$

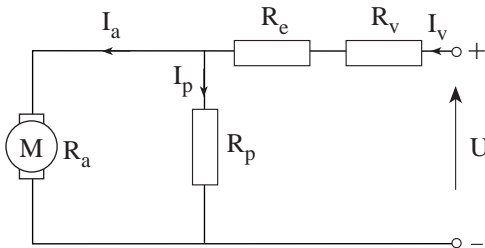
R_r [Ω] – התנגדות נוספת

במעגל העירור הטורי

R_e [Ω] – התנגדות סליל העירור הטורי

R_a [Ω] – התנגדות סליל העוגן

ב. חיבור פוטנציומטרי



$n^* = \frac{U - I_a R_a - I_v (R_v + R_e)}{C_e \phi}$
$I_v = I_e = I_a + I_p$
$n^* = n_o k - \frac{I_a}{C_e \phi} (R_a + kR_v)$
$k = \frac{R_p}{R_p + R_v + R_e}$
$n^* = n_o k - \frac{M}{C_m C_e \phi^2} (R_a + kR_v)$

n^* [r.p.m.] – מהירות סיבוב בחיבור פוטנציומטרי

n_o [r.p.m.] – מהירות סיבוב בריקס

k – מקדם

R_v [Ω] – התנגדות טורית

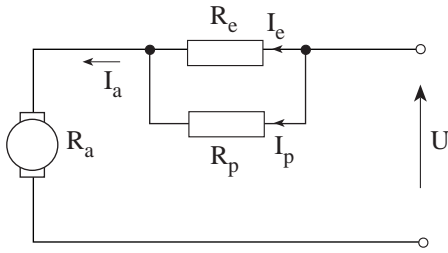
בחיבור פוטנציומטרי

R_p [Ω] – התנגדות מקבילית

בחיבור פוטנציומטרי

R_e [Ω] – התנגדות סליל העירור

M [N · m] – מומנט



- I_e [A] – זרם דרך סליל העירור
- I_p [A] – זרם דרך נגד המיצד
- I_a [A] – זרם דרך סליל העוגן
- R_e [Ω] – התנגדות סליל העירור הטורי
- R_p [Ω] – התנגדות נגד המיצד

ג. שינוי זרם העירור (שטף)

$I_a = I_e + I_p$
$n = \frac{U - I_a \left(R_a + \frac{R_e R_p}{R_e + R_p} \right)}{C_e \phi}$
$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{M \left(R_a + \frac{R_e R_p}{R_e + R_p} \right)}{C_e C_m \phi^2}$

3. ויסות מהירות במנוע השראה

- n [r.p.m.] – מהירות סיבוב הרוטור
- n_s [r.p.m.] – מהירות סיבוב סינכרונית
- s – מקדם החליקה
- f [Hz] – תדירות מתח ההזנה
- p – מספר זוגות קטבים

$$n = n_s (1-s) = \frac{f \cdot 60}{p} (1-s)$$

מערכת ציר חשמלי

1. מומנט המפותח על-ידי מנוע העזר

- s – מקדם החליקה במנוע עזר
- s_K – מקדם החליקה הקריטי במנוע העזר
- M_K [N·m] – מומנט קריטי
- θ [rad] – זווית הפיתול
- M_1^* [N·m] – מומנט מנוע עזר ראשון
- M_2^* [N·m] – מומנט מנוע עזר שני
- M [N·m] – מומנט מנוע עזר בעבודה רגילה

$M_1^* = \frac{M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \left[(1 - \cos \theta) - \frac{s}{s_K} \cdot \sin \theta \right]$
$M_2^* = \frac{M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \left[(1 - \cos \theta) + \frac{s}{s_K} \cdot \sin \theta \right]$
$M = \frac{2 M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$

2. מומנט המנוע הראשי

בעבודה מתמדת:

- מומנט מנוע ראשי 1 — M_1 [N · m]
- מומנט מנוע ראשי 2 — M_2 [N · m]
- מומנט סטטי על ציר 1 — M_{S1} [N · m]
- מומנט סטטי על ציר 2 — M_{S2} [N · m]
- מומנט מנוע עזר בעבודה רגילה — M [N · m]
- מקדם החליקה במנוע עזר — s
- מקדם החליקה הקריטי במנוע עזר — s_K
- מומנט מנוע עזר ראשון — M_1^* [N · m]
- מומנט מנוע עזר שני — M_2^* [N · m]

$M_1 = M_2$
$M_1 = M_2 \approx \frac{M_{S1} + M_{S2}}{2}$
$M_{S1} = M_1 + M_1^*$
$M_{S2} = M_2 + M_2^*$
$\sin \theta = \frac{M_{S2} - M_{S1}}{M \frac{s}{s_K}}$

3. מומנט ההשוואה

- מומנט ההשוואה — M' [N · m]

$M' = M_2^* - M_1^*$
$M' = M \frac{s}{s_K} \cdot \sin \theta = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \cdot \frac{s}{s_K} \cdot \sin \theta$

4. חלוקת ההספק הפעיל בין מנועי העזר

- מומנט מנוע עזר ראשון — M_1^* [N · m]
- ההספק הנצרך מהרשת על-ידי מנוע עזר 1 — P_1 [W]
- ההספק המועבר ממנוע עזר 1 למנוע הראשי 1 — P_2 [W]
- ההספק המועבר ממנוע עזר 1 לציר מנוע עזר 2 — P_2^* [W]

כאשר $M_1^* > 0$:
$P_2 = P_1 (1 - s)$
$P_2^* = P_1 s$

תופעות מעבר

1. מצבי מעבר בהתנעת מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מהירות סיבוב בריקם	n_o	[r.p.m.]
שטף בסליל העירור	ϕ	[Wb]
מתח הדקים	U	[V]
קבוע זמן אלקטרומכני	T	[sec]
מקדמים	C_e, C_m	
מומנט תנופה	GD^2	[kgf · m ²]
ההתנגדות הכוללת של מעגל העוגן	R	[Ω]
התנגדות סליל העוגן	R_a	[Ω]
התנגדות המתנע במעגל העוגן	R_s	[Ω]
שינוי מהירות כתוצאה מעומס	Δn_L	[r.p.m.]
זמן	t	[sec]
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	n_{st}	[r.p.m.]
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L	n_L	[r.p.m.]
זרם המתאים לעומס נגדי M_L	I_L	[A]
זרם המנוע בהתנעה	I_{st}	[A]
זרם רגעי של המנוע	i	[A]
מומנט המתפתח על-ידי המנוע בזמן התנעה	M_{st}	[N · m]
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	M_L	[N · m]

$n_o = \frac{U}{C_e \phi}$
$T = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R}{C_e C_m \phi^2}$
$R = R_a + R_s$
$\Delta n_L = \frac{M_L R}{C_e C_m \phi^2}$
$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
$n_L = n_o - \Delta n_L$
$n_L = n_o - \frac{I_L R}{C_e \phi}$
$n_{st} = n_o - \frac{I_{st} R}{C_e \phi}$
$I_L = \frac{M_L}{C_m \phi}$
$i = I_L + (I_{st} - I_L) e^{-\frac{t}{T}}$
$M = M_L + (M_{st} - M_L) e^{-\frac{t}{T}}$

2. בלימה דינמית של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L , בערך מוחלט	Δn_L [r.p.m.]
התנגדות כוללת במעגל העוגן	R [Ω]
התנגדות סליל העוגן	R_a [Ω]
התנגדות נגד הבלימה	R_b [Ω]
מומנט העומס בזמן בלימה (מומנט נגדי)	M_L [$N \cdot m$]
שטף בסליל העירור	ϕ [Wb]
קבוע זמן אלקטרומכני	T [sec]
מומנט תנופה	GD^2 [$kgf \cdot m^2$]
מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)	n_{st} [r.p.m.]
זמן	t [sec]
זרם המתאים לעומס נגדי M_L	I_L [A]
זרם המנוע בתחילת הבלימה	I_{st} [A]
זרם רגעי של המנוע	i [A]

$n = -\Delta n_L + (n_{st} - \Delta n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
$\Delta n_L = \frac{M_L R}{C_e C_m \phi^2} = \frac{I_L R}{C_e \phi}$
$R = R_a + R_b$
$T = \frac{GD^2}{375} \frac{R}{C_e C_m \phi^2}$
$n_{st} = \frac{I_{st} R}{C_e \phi} \quad (U = 0 \text{ : כאשר})$
$i = I_L - (I_{st} + I_L) e^{-\frac{t}{T}}$

3. בלימה על-ידי חיבור נגדי של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

א. ללא הפיכת קוטביות

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

$n = n_L + (n_{st} - n_L) e^{-\frac{t}{T}}$
$n_L = n_n \frac{U - I_a R}{U - I_a R_a}$
$R = R_a + R_b$

ב. עם הפיכת קוטביות

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

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

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

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

מכונה סינכרונית

מומנט המכונה	—	M	[N · m]
כא"מ מופעי	—	E	[V]
מתח מופעי בהדקי המכונה	—	U	[V]
תדירות זוויתית	—	ω_m	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
היגב סינכרוני	—	X_s	[Ω]
הזווית בין הכא"מ למתח	—	θ	[rad]
הספק יעיל תלת-מופעי	—	P	[W]
מהירות סיבוב סינכרונית	—	n_s	[r.p.m.]
תדירות	—	f	[Hz]
מספר הקטבים	—	p	
זרם הסטטור	—	I_s	[A]
הזווית בין מתח מופעי לזרם	—	ϕ	[rad]
הספק יעיל למופע	—	P_{ph}	[W]
הספק היגבי למופע	—	Q_{ph}	[VAr]

$M = \frac{3 EU}{\omega_m X_s} \sin \theta = \frac{P}{\omega_m}$
$\omega_m = \frac{2 \pi n_s}{60} = 2 \pi \cdot \frac{f}{p}$
$M = \frac{9.55}{n_s} \cdot \frac{3UE}{X_s} \sin \theta$

מחולל בעירור יתר

$U = E \cos \theta - I_s \cdot X_s \sin \phi$
$E = \sqrt{(U \cos \phi)^2 + (U \cdot \sin \phi + I_s X_s)^2}$
$P_{ph} = \frac{EU}{X_s} \cdot \sin \theta$
$Q_{ph} = \frac{UE \cos \theta}{X_s} - \frac{U^2}{X_s}$

מחולל בתת-עירור

$U = E \cos \theta + I_s \cdot X_s \sin \phi$
$E = \sqrt{(U \cos \phi)^2 + (U \cdot \sin \phi - I_s X_s)^2}$
$P_{ph} = \frac{EU}{X_s} \cdot \sin \theta$
$Q_{ph} = \frac{U^2}{X_s} - \frac{EU \cos \theta}{X_s}$

בהצלחה!