

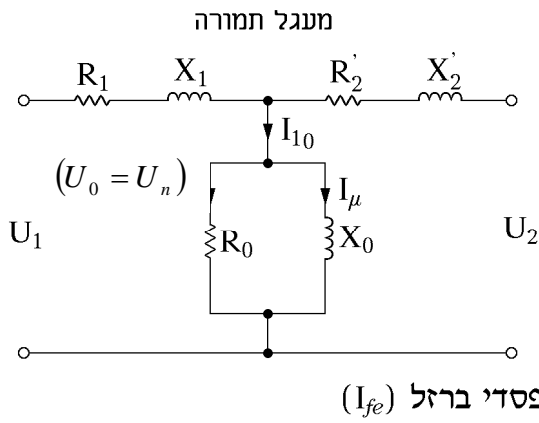


משרד התעשייה המסחר והתעסוקה
 אגף בכיר להכשרה ולפיתוח כח-אדם
 תחום בחינות

נוסחאון במכונות חשמל

$$1[\text{Nm}] = \frac{1}{9.81}[\text{Kgm}]$$

נוסחה	תיאור	גדלים	יחידות
שנאים			
$E = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \phi_{max}$	כא"מ מושרה אפקטיבי	E	[V]
$\phi_{max} = B_{max} \cdot A$	מספר כריכות	N	[T]
	תדירות	f	[Hz]
	השטף המגנטי המירבי בגרעין	ϕ_{max}	[Wb]
	השראה מגנטית מירבית	B_{max}	$\left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right]$
שנאי אידיאלי			
$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$	כא"מ מושרה אפקטיבי בראשוני	E_1	[V]
	כא"מ מושרה אפקטיבי בשניוני	E_2	[V]
	מספר הכריכות בראשוני	N_1	[T]
	מספר הכריכות בשניוני	N_2	[T]
	סנאי מעשי		
$K = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{I_{2n}}{I_{1n}}$	מתח נקוב בראשוני	U_{1n}	[V]
	מתח נקוב בשניוני	U_{2n}	[V]
$S_n = U_n \cdot I_n$	חד-מופעי		
$S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n$	תלת-מופעי		
$E_\sigma = I \cdot X$	זרם נקוב בראשוני	I_{1n}	[A]
$K = \frac{U_1 Ph}{U_2 Ph} = \frac{I_2 PH}{I_1 PH}$	זרם נקוב בשניוני	I_{2n}	[A]
	תמסורת השנאי, מקדם השנאה	K	
$A = \frac{\pi d^2}{4}$	שטח חתך המוליך	A	mm^2
$\frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$	כא"מ פיזור	E_σ	[V]
	זרם בליפוף	I	[A]
$J = \frac{I}{A}$	צפיפות זרם	J	$\left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]$
	יחס שטחי חתך לקוטר המוליך		



היגב השראתי של שטף הפיזור בליפוף

השראות הפיזור

תדירות זוויתית

זרם ריקם בראשוני

זרם מיגנוט

זרם ריקם אקטיבי נקרא גם זרם הפסדי ברזל (I_{fe})

X [Ω]

L_0 [Hz]

ω [rad/sec]

I_{10} [A]

I_μ [A]

I_{10a} [A]

$(U_o = U_n)$ פעולת שנאי בריקם

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu10} \approx \Delta P_{fe}$$

הספק יעיל בריקם

P_0 [W]

$$P_0 = U_{1n} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10}$$

הפסדי ברזל

ΔP_{fe} [W]

$$I_{10a} = \frac{P_0}{U} = I_{10} \cdot \cos \varphi_{10}$$

הפסדי נחשת בראשוני בריקם

ΔP_{cu10} [W]

$$I_\mu = I_{10} \cdot \sin \varphi_{10}$$

מקדם הספק בראשוני בריקם

$\cos \varphi_{10}$

$$I_{10}^2 = I_{10a}^2 + I_\mu^2$$

$(I_{1k} = I_{1n})$ פעולת שנאי בקצר

זרם הקצר

I_{1K} [A]

$$P_K = \Delta P_{cu1n} + \Delta P_{cu2n} = \Delta P_{cun}$$

הספק הקצר של השנאי

P_K [W]

$$\Delta P_{cu1n} = I_{1n}^2 \cdot R_1 \quad \Delta P_{cu} = \beta^2 \cdot \Delta P_{cun}$$

הפסדי נחשת בעומס נקוב

ΔP_{cun} [W]

$$\Delta P_{cu2n} = I_{2n}^2 \cdot R_2 \quad \Delta Uk\% = \beta \cdot \Delta Uk_n\%$$

התנגדות הסליל הראשוני

R_1 [Ω]

$$R_K = R_1 + R_2' \quad X_k = X_1 + X_2'$$

התנגדות הסליל השניוני

R_2 [Ω]

$$R_K = R_1 + R_2 \cdot K^2$$

התנגדות הקצר

R_K [Ω]

$$X_K = X_1 + X_2 \cdot K^2$$

היגב הסליל הראשוני

X_1 [Ω]

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

היגב הסליל השניוני

X_2 [Ω]

$$\begin{cases} R_K = R_1 + R_2 K^2 = R_1 + R_2' \\ X_K = X_1 + X_2' \end{cases}$$

היגב הקצר

X_K [Ω]

עכבת הקצר

Z_K [Ω]

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{V_K \cdot I_K}$$

מתח הקצר

U_K [V]

מתח הקצר באחוזים

$U_K\%$

$$P_K = U_K \cdot I_K \cdot \cos \varphi_K$$

מפלי מתח ומתחי עבודה

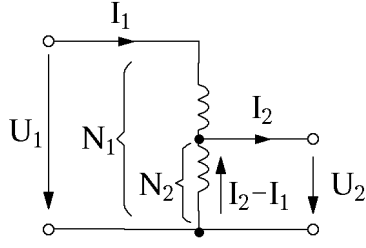
$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{cun}}{S_n} \cdot 100$	מפל מתח התנגדותי באחוזים	$\Delta U_{R\%}$
$\Delta U_{R\%} = \frac{I_{1n} \cdot R_K}{U_{1n}} \cdot 100$	מפל מתח היגבי באחוזים	$\Delta U_{X\%}$
$\Delta U_{X\%} = \frac{I_{1n} \cdot X_K}{U_{1n}} \cdot 100$	מפל מתח באחוזים	$\Delta U\%$
$\Delta U_{K\%} = \sqrt{(\Delta U_{R\%})^2 + (\Delta U_{X\%})^2}$	מקדם העמסה	β
$\beta = \frac{S}{S_n}$	מקדם ההספק של הצרכן	$\cos \rho_2$
$\Delta U\% = \beta (\Delta U_{R\%} \cdot \cos \rho_2 + \Delta U_{X\%} \cdot \sin \rho_2)$	מקדם העמסה לקבלת נצילות מירבית	β_{max}
$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cun}}}$		
$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100} \right)$		
$U_2 = U_{20} [1 - \beta U_{Kn} \cos(\varphi_K - \varphi_2)]$, $\Delta UK\% = \beta \Delta UK_n\%$		

נצילות השנאי

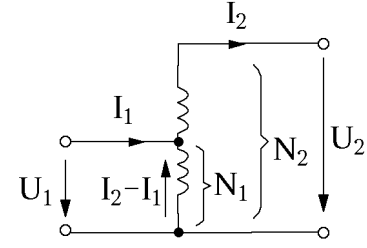
$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	נצילות השנאי	η
$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu}}$		
$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \rho_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \rho_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 \cdot \Delta P_{cun}}$		

שנאי עצמי

$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$	יחס תמסורת	K
$S = U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot I_1 + U_2(I_2 - I_1)$	הספק מדומה	S [VA]
$S = \frac{U_1 \cdot I_1}{K} + \frac{U_1 \cdot I_1}{K} \cdot (K - 1)$		



שנאי עצמי מוריד מתח



שנאי עצמי מעלה מתח

שנאים במקביל

$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{S_{nI}}{S_{nII}} \cdot \frac{U_{K\%II}}{U_{K\%I}}$	הספק מדומה של שנאי I	S_I	[VA]
$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}}$	הספק מדומה של שנאי II	S_{II}	[VA]
$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}}$	הספק מדומה ששנאי כלשהו A מוסר לצרכנים	S_A	[VA]
$S_A = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{K\%A}}}$	אינדקס - מתייחס לשנאי כלשהו	m	
	אינדקס - מספר השנאים המחוברים במקביל	n	
שני שנאים במקביל $S_t = S_1 + S_2$	הספק מדומה נקוב של שנאי כלשהו m	S_{nm}	[VA]
	ההספק המדומה שמספקים כל השנאים יחד לצרכן	S_t	[VA]

מנוע השראתי תלת-מופעי

מהירויות

$n_1 = \frac{60f}{P}$	מהירות השדה המסתובב	n_1	[rpm]
$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$	מהירות הרוטור	n_2	[rpm]
$f_2 = f_1 \cdot s$	תדירות הרשת	f_1	[Hz]
	מספר זוגות הקטבים	p	
$n_2 = n_1(1 - S)$	חליקה	s	
	תדירות מושרית ברוטור	f_2	[Hz]

זרמים

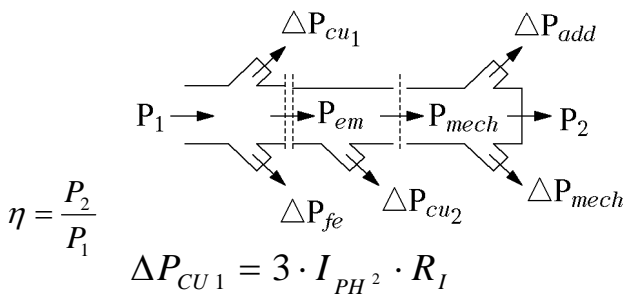
$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1}$	זרם קוי בסטטור	I_1	[A]
$I_{2ph} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_t^2}}$	מתח שלוב בסטטור	U_1	[A]
	גורם הספק	$\cos \varphi_1$	
$I'_{2ph} = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_t^2}}$	זרם ברוטור למופע	I_{2ph}	[A]
	התנגדות למופע של הרוטור	R_2	[Ω]

$$U_L = \sqrt{3}U_{PH} \quad I_L = I_{PH} \quad \text{- בכוכב}$$

$$U_L = U_{PH} \quad I_L = \sqrt{3}I_{PH} \quad \text{- במשולש}$$

יחידות	גדלים	תיאור	נוסחה
[Ω]	X_{20}	היגב למופע של הרוטור כאשר הרוטור ניח	$X_t = X_1 + X_{20}'$
[A]	I_{2ph}'	זרם מופעי ברוטור משוקף לסטטור	
[V]	E_{20ph}	כא"מ מושרה ברוטור למופע כאשר הרוטור ניח	
[Ω]	R_2'	התנגדות למופע של הרוטור משוקפת לסטטור	
[Ω]	X_{20}'	היגב למופע של הרוטור המשוקף לסטטור כאשר הרוטור ניח	
[Ω]	X_t	היגב למופע כולל	

הספקים ומומנטים



הספק כניסה	P_1	[W]
הספק יציאה	P_2	[W]
הספק אלקטרומגנטי	P_{em}	[W]
הספק מכני	P_{mech}	[W]
הפסדי נחשת בסטטור	ΔP_{cu1}	[W]
הפסדי ברזל	ΔP_{fe}	[W]
הפסדי נחשת ברוטור	ΔP_{cu2}	[W]
הפסדים מכניים	ΔP_{mech}	[W]
הפסדים נוספים	ΔP_{add}	[W]
הפסדי הספק כוללים	ΔP	[W]
הספק נקוב ביציאה	P_n	[W]
מומנט נומינלי	M_n	[Nm]
מהירות זוויתית	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
מומנט אלקטרומגנטי	M_{em}	[Nm]
חליקה קריטית	S_K	

$$M_{em} = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{1ph}^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_{20}')^2 \right]}$$

$S_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + (X_1 + X_{20}')^2}} \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_{20}'}$	מומנט קריטי	M_K [Nm]
---	-------------	------------

$$M_K = \frac{9.55 \cdot 3 \cdot U_{1ph}^2}{2 \cdot n_1 \cdot (X_1 + X_{20}')}$$

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

נוסחת קלאוס

התנעה בכוכב משולש

$I_Y = \frac{I_{L\Delta}}{3}$	זרם קוי בחיבור כוכב	I_Y [A]
-------------------------------	---------------------	-----------

	זרם קוי בחיבור משולש	I_{Δ} [A]
--	----------------------	------------------

התנעה עם שנאי עצמי

$I_{\text{מנע}} = K^2 \cdot I_{\text{קו}}$	זרם ההתנעה ברוטור למופע המיוחס לסטטור	I_{2st}' [A]
--	---------------------------------------	----------------

K-מקדם השנאה

זרם התנעה

$$I_{2st}' = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_{20}')^2}}$$

ויסות מהירות מנוע השראתי עם רוטור מלופף

	התנגדות נוספת במעגל הרוטור לויסות מהירות	R_V [Ω]
--	--	--------------------

$$R_V = R_2 \left(\frac{M_n \cdot s_V}{M_V \cdot s_n} - 1 \right)$$

	החליקה במהירות V	s_V
--	------------------	-------

	מומנט במהירות V	M_V [Nm]
--	-----------------	------------

מכונות לזרם ישר

כא"מ

$E = K_e \cdot \phi \cdot n$		כא"מ מושרה ברוטור	E	[V]
$K_e = \frac{2 \cdot p \cdot N}{2 \cdot a \cdot 60}$		שטף לזוג קטבים	ϕ	[Wb]
$p = a$	עבור ליפוף עניבה פשוט:	קבוע של כא"מ	K_e	
$a = 1$	עבור ליפוף גלי פשוט:	מספר המוליכים ברוטור	N	
		מספר זוגות קטבים	p	
		מספר זוגות ענפים מקבילים בליפוף הרוטור	a	

הספקים ומומנטים

$P = U \cdot I$	הספק חשמלי	P	[W]
$P_{em} = E \cdot I_a$	הספק אלקטרומגנטי	P_{em}	[W]
$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n}$	מהירות זוויתית	ω	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
$M_{em} = K_m \cdot \phi \cdot I_a$	מומנט	M	[Nm]
$K_m = \frac{N \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a}$	מומנט אלקטרומגנטי	M_{em}	[Nm]
$K_m = K_e \cdot \frac{60}{2\pi}$	קבוע של המומנט	K_m	

גנרטור לזרם ישר

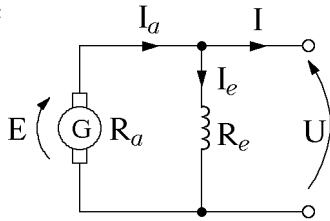
עירור מקבילי

$$U = E - I_a \cdot R_a$$

$$I_a = I + I_e$$

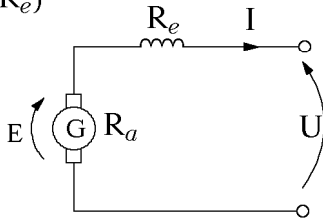
$$I_e = \frac{U}{R_e}$$

$$I = \frac{P_2}{U}$$



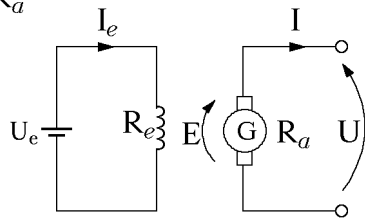
עירור טורי

$$U = E - I(R_a + R_e)$$



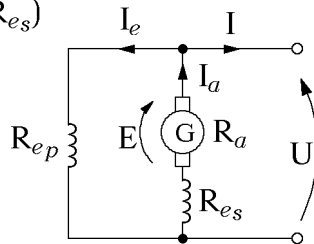
עירור זר

$$U = E - I \cdot R_a$$



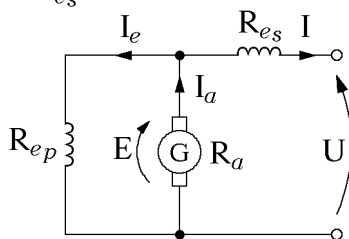
עירור מעורב ארוך

$$U = E - I_a \cdot (R_a + R_{es})$$



עירור מעורב קצר

$$U = E - I_a \cdot R_a - I \cdot R_{es}$$



מתח על הדקי המכונה

$$U \quad [V]$$

מפל מתח על המברשות

$$\Delta U_b \quad [V]$$

התנגדות סליל העירור

$$R_e \quad [\Omega]$$

התנגדות העוגן

$$R_a \quad [\Omega]$$

התנגדות סליל העירור הטורי

$$R_{es} \quad [\Omega]$$

התנגדות סליל העירור המקבילי

$$R_{ep} \quad [\Omega]$$

הערה:

המשוואות הן בהזנחת מפל מתח

בין המברשות לצובר ($\Delta U_b = 0$).

כאשר $\Delta U_b > 0$ יש להתחשב

ולתאים את המשוואות.

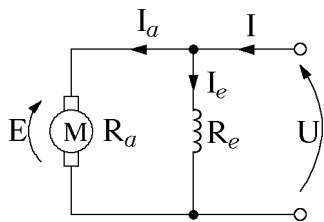
בהזנחת מפל המתח על המברשות ΔU_b

מנוע לזרם ישר
עירור מקבילי

$$E = U - I_a \cdot R_a$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{I_{a2}}{I_{a1}}$$



מתח על הדקי המכונה U [V]

מפל מתח על המברשות ΔU_b [V]

התנגדות סליל העירור R_e [Ω]

התנגדות העוגן R_a [Ω]

התנגדות סליל העירור הטורי R_{es} [Ω]

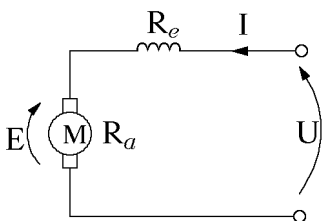
התנגדות סליל העירור המקבילי R_{ep} [Ω]

עירור טורי

$$E = U - I(R_a + R_e)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{I_1}{I_2}$$

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{I_2^2}{I_1^2}$$

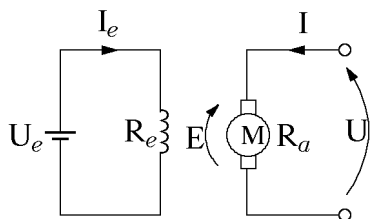


הערות:

- המשוואות הן בהזנחת מפל המתח בין המברשות לצובר $\Delta U_b = 0$. כאשר $\Delta U_b > 0$ יש להתחשב ולהתאים את המשוואות.
- חישוב המהירות והמומנט בעומס במנוע טורי הם בהזנחת תגובת העוגן ובהנחה שהמנוע לא הגיע לרוויה מגנטית.
- האינדקסים 1 ו-2 מציינים את הפרמטרים בעומסים שונים.

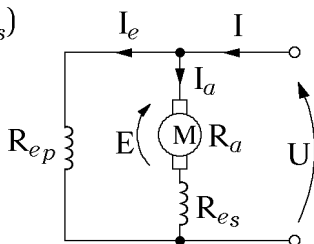
עירור זר

$$E = U - I \cdot R_a$$



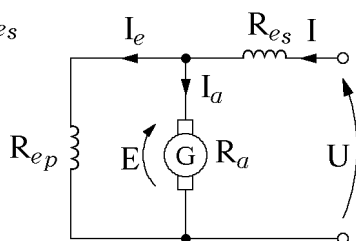
עירור מעורב ארוך

$$E = U - I_a \cdot (R_a + R_{es})$$

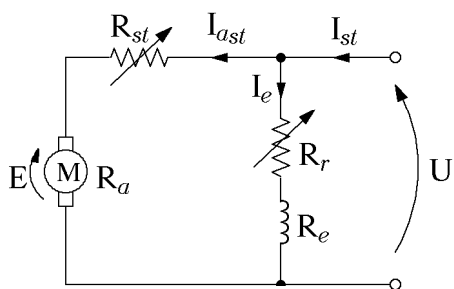


עירור מעורב קצר

$$E = U - I_a \cdot R_a - I \cdot R_{es}$$



זרם התנעה של מנוע מקבילי



זרם העוגן בזמן התנעה	I_{ast}	[A]
התנגדות ווסת ההתנעה	R_{st}	[Ω]
התנגדות ווסת העירור	R_r	[Ω]

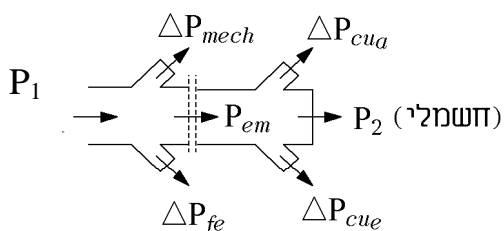
$$I_{ast} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$$

$$E_{St} = 0$$

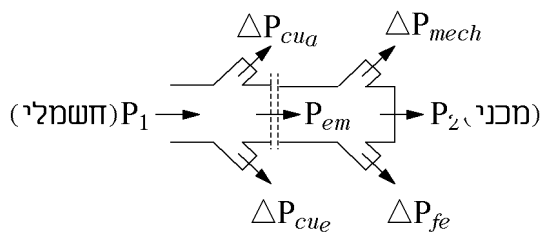
$$I_{St} = I_{ast} + I_e$$

$$I_e = \frac{U}{R_e + R_r}$$

דיאגרמה אנרגטית - גנרטור



דיאגרמה אנרגטית - מנוע



$$\Delta P = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

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

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

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

$$U_2 = U_{2N} \left[1 - \beta U_{kn} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2) \right]$$

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

פעולת שנאי בקצר לא בזרם הנקוב (נספח) ($I_K \neq I_{1N}$)

$$\beta_K = \frac{I_K}{I_{1N}}$$

$$\Delta PCU_N = \frac{P_K}{\beta^2}$$

$$U_{KN} = \frac{U_K}{\beta_K}$$