נוסחאון מה"ט לבחינה

תורת החשמל
לטכנאים והנדסאים

מגמת הנדסת חשמל

מקצועות:

תורת החשמל - 3959

תאריך	מהדורה מספר	מספר
01/25	1	97160

נוסחאון תורת החשמל - 97160

ראשי פרקים

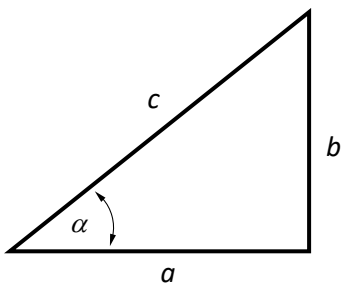
תורת החשמל

1. ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות 3
2. מושגים בסיסיים בחשמל 6
3. מעגלי זרם ישר..... 8
4. מגנטיות ואלקטרומגנטיות..... 15
5. אלקטרודינמיקה..... 21
6. אלקטרוסטטיקה..... 24
7. תופעות מעבר מסדר ראשון, תגובה לאות מדרגה..... 27
8. אותות..... 29
9. מעגלי זרם חילופין..... 35
10. הספקים במתח חילופין..... 38
11. מעגלי תהודה..... 40
12. רשתות תלת פאזיות..... 43

1. ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות

מס	כינוי	סימון	יחידות במערכת SI	יחידות במערכת SI - עברית
1	מרחק, רדיוס, אורך	l, r, d	m	מטר
2	זווית	ϕ, α	rad	רדיאן, מעלה
3	שטח חתך, שטח	S, A	m^2	מטר מרובע
4	זרם חשמלי	I, i	A	אמפר
5	צפיפות זרם חשמלי	J	$\frac{A}{m^2}$ $\frac{A}{mm^2}$	אמפר למטר מרובע או לממ"ר
6	מטען חשמלי	Q	C	קולון
7	פוטנציאל חשמלי	V	V	וולט
8	מתח, כוח אלקטרומניע	E,V,U	V	וולט
9	הספק פעיל	P	W	ווט
10	הספק מדומה (נדמה)	S	kVA	קילו - וולט-אמפר
11	הספק היגבי	Q	VAR	וולט-אמפר ראקטיבי
12	עבודה, אנרגיה	E,W	J, kWh	קילו ווט שעה, גאול
13	התנגדות	R, r	Ω	אוהם
14	היגב	X, x	Ω	אוהם
15	עכבה	Z, z	Ω	אוהם
16	מוליכות	G, g	S, mho	מוא, סימנס
17	מוליכות הגבית - מניחות	b	S, mho	מוא, סימנס
18	מתירות	Y, y	S, mho	מוא, סימנס
19	טמפרטורה	T	$°K, °C$	מעלות קלוין, צלזיוס
20	זמן	t	sec	שנייה
21	זמן מחזור	T	sec	שנייה
22	תדירות	f	Hz	הרץ

קשרים במשולש ישר זווית



$$\cos\alpha = \frac{\text{ניצב ליד הזווית}}{\text{יתר}} = \frac{a}{c}$$

$$\sin\alpha = \frac{\text{ניצב ממול הזווית}}{\text{יתר}} = \frac{b}{c}$$

$$\tan\alpha = \frac{\text{ניצב ממול הזווית}}{\text{ניצב ליד הזווית}} = \frac{b}{a}$$

משפט פיתגורס: $c^2 = a^2 + b^2$

מס	כינוי	סימון	יחידות במערכת SI	יחידות במערכת SI - עברית
23	תדירות זוויתית	ω	rad/sec	רדיאן לשנייה
24	כוח	F	N	ניוטון
25	מומנט	M	Nm	ניוטון מטר
26	קיבול	C	F	פארד
27	עוצמת שדה חשמלי	E	V/m	וולט למטר
28	קבוע דיאלקטרי	ε	F/m	פארד למטר
29	עוצמת שדה מגנטי	T, H	$\frac{AT}{m}; \frac{A}{m}$	אמפר כריכות למטר ; אמפר למטר
30	מספר כריכות	N	T	כריכות
31	כוח מגנטומניע (במ"מ)	Fmm	AT ; A	אמפר כריכות ; אמפר
32	שטף מגנטי	Φ	Wb	וובר
33	השראה מגנטית (צפיפות שטף מגנטי)	B	$\frac{T}{m^2}^{Wb}$	טסלה (וובר למטר מרובע)
34	מיאון, התנגדות מגנטית	R_m	$\frac{1}{\text{H}}$	אחד חלקי הנרי
35	השראות עצמית	L	H	הנרי
36	השראות הדדית	M	H	הנרי
37	חדירות מגנטית	μ	H/m	הנרי למטר
38	מתח מגנטי	$H \cdot l, U_m$	A, AT	אמפר כריכות, אמפר

<u>כופלי יחידות</u>

כינוי		סימון	ערך
עברית	אנגלית		
מגה	Mega	M	10^6
קילו	kilo	k	10^3
סנטי	centi	c	10^{-2}
מילי	milli	m	10^{-3}
מיקרו	micro	μ	10^{-6}
ננו	nano	n	10^{-9}
פיקו	pico	p	10^{-12}

נוסחאון תורת החשמל - 97160

מעברים בין יחידות מדידה שונות:

$$cm \xrightarrow{\times 10^{-2}} m$$

$$cm^2 \xrightarrow{\times 10^{-4}} m^2$$

$$mm \xrightarrow{\times 10^{-3}} m$$

$$mm^2 \xrightarrow{\times 10^{-6}} m^2$$

Physical Constants - קבועים פיזיקליים

תאור	סימון	יחידות	ערך
מטען אלקטרון	e, q	C	$1.602 \cdot 10^{-19}$
מסת מנוחה של אלקטרון	m_e	kg	$9.1066 \cdot 10^{-31}$
חדירות מגנטית של חלל ריק	μ_0	H/m	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = \\ = 12.56 \cdot 10^{-7}$
קבוע דיאלקטרי של חלל ריק	ε_0	F/m	$\varepsilon_0 = \frac{1}{36} \cdot 10^{-9} \\ = 8.85 \cdot 10^{-12}$

מתמטיקה

שטח חתך של מוליך בעל קוטר D או רדיוס r:	$S=\pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$
היקף מעגל :	$P=2 \cdot \pi \cdot r$

2. מושגים בסיסיים בחשמל

צפיפות זרם במוליך

$$J = \frac{I}{A}$$

J - צפיפות הזרם במוליך $[\frac{A}{mm^2}]$

I - עוצמת הזרם במוליך $[A]$

A - שטח חתך של מוליך $[mm^2]$

המטען החשמלי

$$I = \frac{Q}{t}$$

I - הזרם העובר במוליך $[A]$

Q - כמות המטען החשמלי $[c]$

t - משך הזמן $[sce]$

תלות התנגדות בתכונות החומר ומידותיו

$$R = \rho\frac{\ell}{A}$$

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית $[\Omega]$

ℓ - אורך המוליך (m)

A - שטח חתך של מוליך (mm^2)

ρ - התנגדות סגולית, סוג החומר ממנו עשוי המוליך$(\frac{\Omega mm^2}{m})$

תלות ההתנגדות בטמפרטורה

$$R_{(T)} = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

$R_{(T)}$- התנגדות המוליך בטמפרטורה מסוימת (Ω).

R_0- התנגדות המוליך בטמפרטורה התחלתית (Ω).

α- מקדם טמפרטורה של המוליך (בטמפרטורה T0 ,בדרך כלל - 20 °c) תלוי בסוג החומר.

מוליכות חשמלית

$$G = \frac{1}{R}$$

G - מסמן את מוליכות חשמלית $[S]$.

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית $[\Omega]$.

נוסחאון תורת החשמל - 97160

חוק אוהם

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

U- מסמן את המתח החשמלי ביחידות$[V]$

I - מסמן את הזרם החשמלי ביחידות אמפר$[A]$

R - מסמן את ההתנגדות החשמלית ביחידות אום$[\Omega]$

הספק חשמלי

$$P = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$$

P - הספק ביחידות וואט או ג'אול חלקי שניה$[W] = [\frac{J}{s}]$

I – הזרם במעגל, ביחידות אמפר[A]

R - ההתנגדות החשמלית ביחידות אום$[\Omega]$

U - מתח המעגל $[V]$

נצילות - נסמן את הנצילות על-ידי האות היוונית (אטא). נהוג לציין ערך זה באחוזים.

$$\eta_{\%} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100$$

נצילות מוגדרת כיחס בין ההספק המופק במערכת להספק המושקע.

אנרגיה/עבודה חשמלית

$$W=P\cdot t = U\cdot I\cdot t = \left(\frac{U^2}{R}\right) \cdot t$$

W – האנרגיה החשמלית $[J]$ (נהוג לסמנה גם באות **E**)

P – הספק החשמלי [W]

U - מתח המעגל $[V]$

I - הזרם במעגל $[A]$

R -התנגדות המעגל $[\Omega]$

t - הזמן בו נמשכת זרימת הזרם $[sec]$

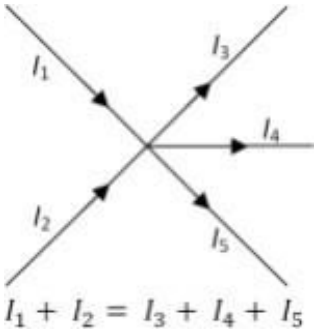
יחידות אנרגיה ועבודה נוספות: וואט-שעה [Wh], קילוואט-שעה [kWh]

1 Wh = 3,600 J ; 1 kWh = 3,600,000 J

3. מעגלי זרם ישר

חוק הזרמים של קירכהוף Kirchhoff's Current Law (KCL)

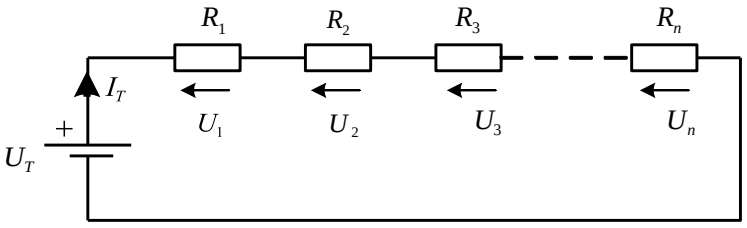
חוק הצומת קובע שסכום הזרמים בצומת שווה לאפס. המשמעות היא: סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.



צומת היא נקודה שאליה מחוברים אחד הקצוות של שלושה ענפים לפחות.

חיבור טורי

מעגל טורי הוא מעגל חשמלי שבו הנגדים מחוברים אחד אחרי השני, בנקודת חיבור אחת. הזרם במעגל זה שווה בין כל רכיבי המעגל.



סכום המתחים של קירכהוף: סכום מפלי המתח בחוג סגור שווה ל -0.

$$U_T - U_1 - U_2 - U_3 - U_n = 0$$

חוג: הוא מסלול רציף, שמתחיל או מסתיים באותה נקודה.

ההתנגדות שקולה

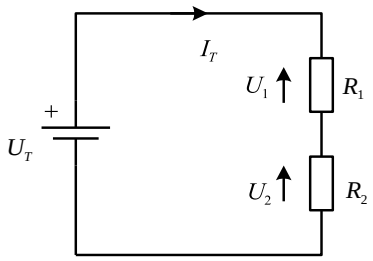
$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n$$

<u>באשר הנגדים הינם בעלי התנגדות זהה</u>

$$R_T = n \cdot R$$

n - מספר נגדים המחוברים בטור.

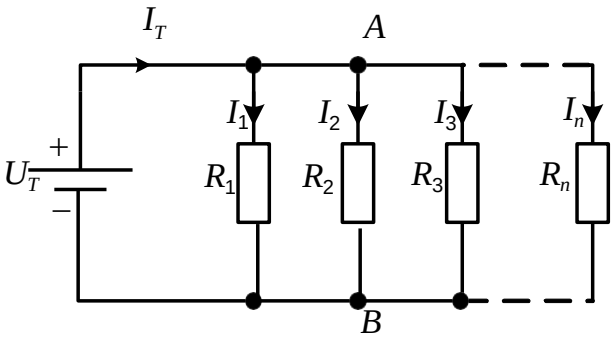
מחלק מתח שני נגדים בטור



$U_1 = U_T \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$	$U_2 = U_T \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

חיבור מקבילי

רכיבים חשמליים מחוברים זה לזה בשתי נקודות חיבור, מתח זהה שורר בין הדקי הרכיבים.



חוק הזרמים של קירכהוף (חוק הצומת): סכום הזרמים בצומת שווה לאפס.
המשמעות היא: סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים שיוצאים מהצומת.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + ... I_n$$

התנגדות שקולה

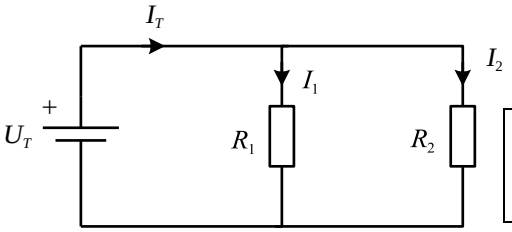
$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \frac{1}{R_n}}$$

חיבור מקבילי של נגדים זהים

$$R_T = \frac{R}{n}$$

n - מספר נגדים המחוברים במקביל.

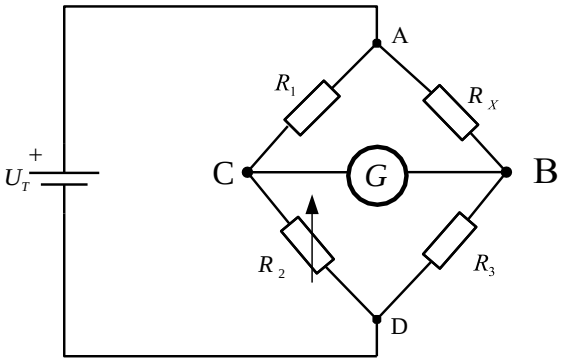
מחלק זרם



$I_1 = I_T \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$I_2 = I_T \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

גשר ויטסטון

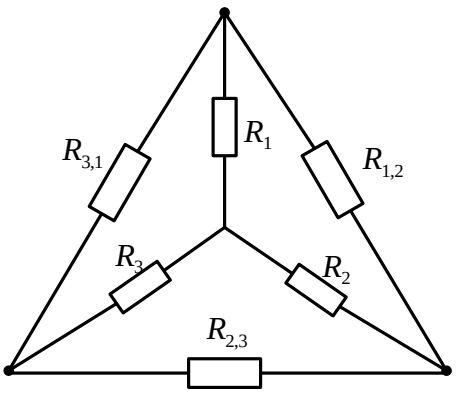
באשר הגשר מאוזן , הגלוונומטר (G) מראה $(0A)$ מאחר ולא זורם בו זרם. במקרה זה ניתן למצוא את ערכו של הנגד הלא ידוע R_X . הגלוונומטר יכול להיות מוחלף ע"י מד מתח.



באשר הגשר מאוזן:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_X}{R_3}$$

המרת כוכב משולש



$$R_{1,2} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_3}$$

$$R_{2,3} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_1}$$

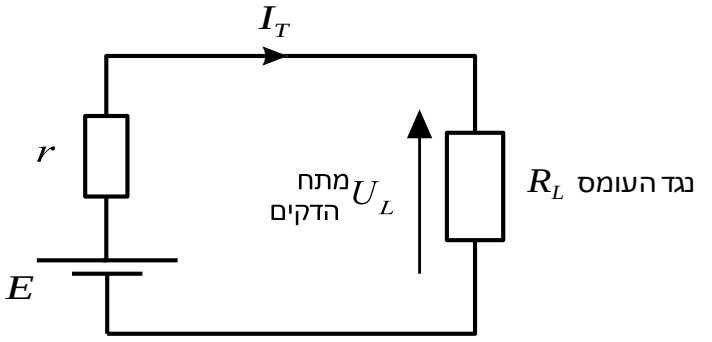
$$R_{1,3} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

המרת משולש כוכב

$$R_1 = \frac{R_{3,1} \cdot R_{1,2}}{R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,1}}$$
$$R_2 = \frac{R_{1,2} \cdot R_{2,3}}{R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,1}}$$
$$R_3 = \frac{R_{2,3} \cdot R_{3,1}}{R_{1,2} + R_{2,3} + R_{3,1}}$$

חיבור תאים ומקורות מתח

מתח ההדקים של סוללה ממנה לא צורכים זרם נקרא כוח אלקטרו מניע (כא"מ), והוא מבטא את העבודה המושקעת להעברת המטען מההדק השלילי לחיובי בתוך מקור המתח. כוח האלקטרו מניע מסומן באות E.



לפי חוק המתחים של קירכהוף:

$$E = \Delta U_r + U_L = I \cdot r + I \cdot R_L$$

מפל המתח על ההתנגדות הפנימית — מפל מתח על הצרכן

הזרם במעגל:

$$I = \frac{E}{r + R_L}$$

I - הזרם החשמלי ביחידות אמפר$[A]$

E - כא"מ- כוח אלקטרומניע $[V]$.

U_L- מתח הדקים, המתח בין הדקי מקור המתח כאשר זורם דרכו זרם $[V]$.

r - התנגדות פנימית של מקור המתח $[\Omega]$.

נוסחאון תורת החשמל -

חישוב מתח הדקים:

$$U_L = E - I \cdot r$$

הספקים במעגל

הספק שמייצרת הסוללה

$$\boxed{P_T = I_T \cdot E_T = P_r + P_{R_L}}$$

הספק שמתבזבז בסוללה

$$\boxed{P_r = I_T^2 \cdot r_T}$$

הספק שנצרך ע"י הצרכן

$$\boxed{P_{R_L} = I_T^2 \cdot R_L = \frac{U^2}{R_L} = U_L \cdot I}$$

קיבול של תא חשמלי

Q - קיבול הסוללה (נמדד באמפר שעה) Ah

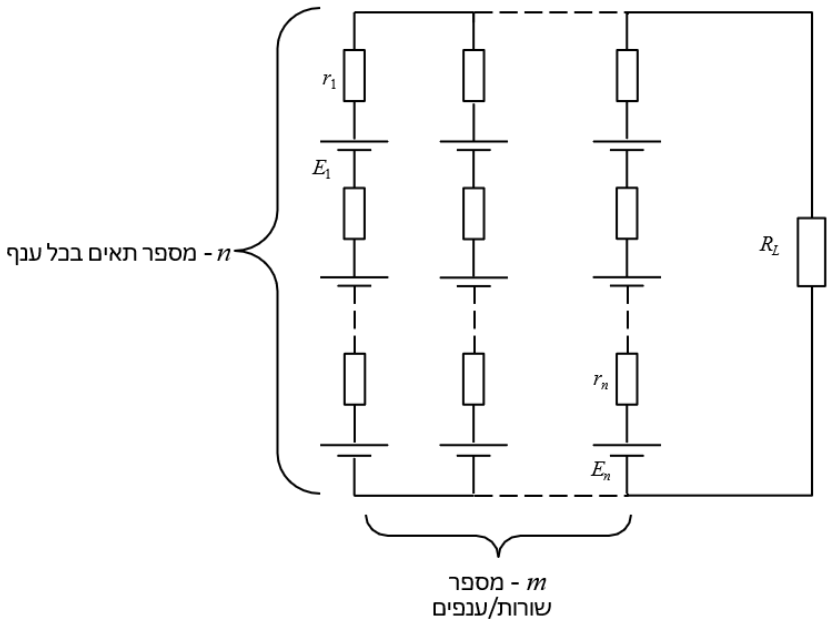
I - זרם הסוללה (נמדד באמפר) A

t - זמן פעולת הסוללה (נמדד בשעות) h

$$\boxed{Q = I \cdot t}$$

חיבור תאים במעורב

כאשר אנו מעוניינים בסוללה בעלת כוח אלקטרו מניע שקול, גבוהה מזו של תא בודד, ובעלת יכולת לספק זרם בעל עוצמה גבוהה מזו של תא בודד, עלינו להשתמש בסוללה בה מחוברים התאים בחיבור מעורב.



נוסחאון תורת החשמל -

בא"מ שקול

$$E_T = n \cdot E_1$$

התנגדות פנימית שקולה

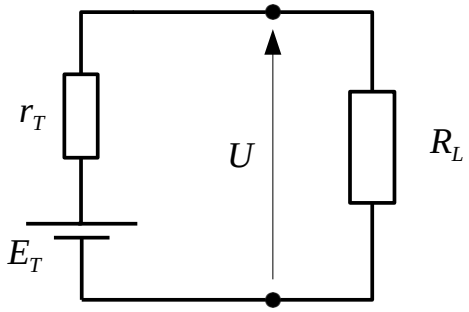
$$r_T = \frac{r_1 \cdot n}{m}$$

n - מספר תאים בכל שורה/ענף
m - מס' שורות/ענפים

הקיבול השקול

$$Q_T = Q_1 \cdot m$$

<u>הזרם במעגל השקול</u>



$$I_T = \frac{E_T}{r_T + R_L} = \frac{n \cdot E_1}{\frac{n \cdot r_1}{m} + R_L}$$

נצילות

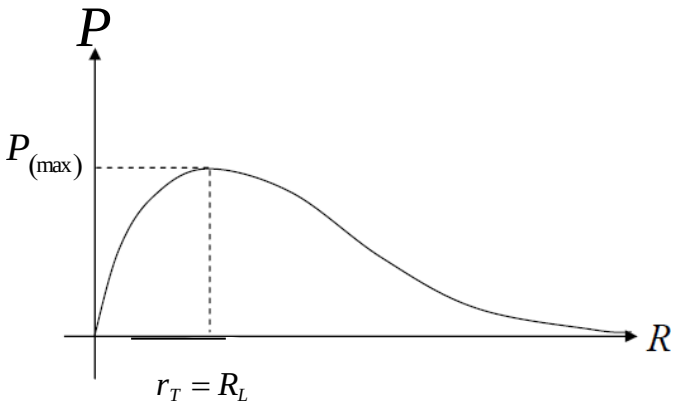
$$\eta_{\%} = \frac{P_{RL}}{P_T} \cdot 100$$

<u>התנאי לקבלת הספק מקסימלי</u>

התנאי לקבלת הספק מקסימלי הוא שההתנגדות הפנימית השקולה של הסוללה תהיה **<u>שווה</u>** להתנגדות העומס.

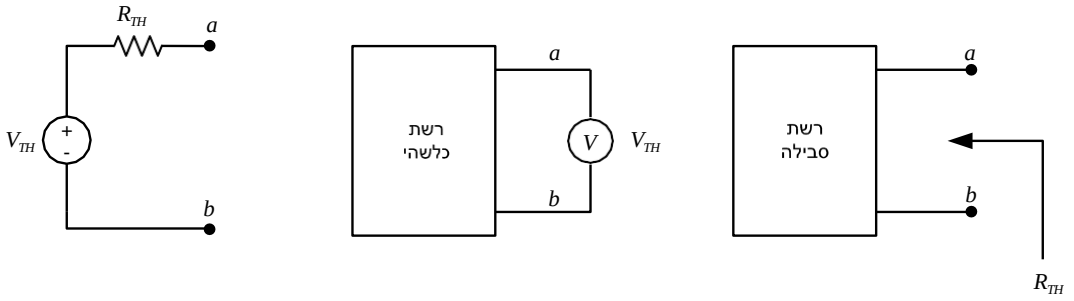
$$r_T = R_L \qquad \frac{n \cdot r_1}{m} = R_L$$

הגרף שלהלן, מציג את תלות ההספק בהתנגדות העומס



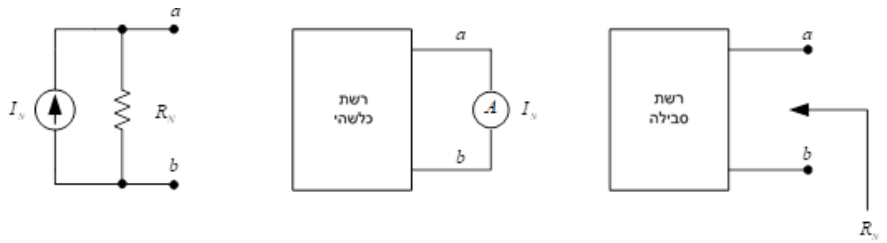
בסידור הסוללה לקבלת הספק מקסימלי , $r_T = R_L$ הנצילות במעגל תהיה שווה ל- 50%

משפט תבנין – Thevenin's Theorem



מתח V_{th} הוא מתח הנמדד על הדקי העומס כאשר העומס מנותק (לא זורם דרכו זרם).
התנגדות R_{th} היא התנגדות שרואים מהדקי העומס (ללא העומס) כאשר כל המקורות מבוטלים.

משפט נורטון – Norton Theorem



זרם I_N הוא זרם הזורם דרך הדקי העומס כאשר העומס מקוצר.
התנגדות R_N היא התנגדות שרואים מהדקי העומס (ללא העומס) כאשר כל המקורות מבוטלים

הקשר בין מעגל תבנין ומעגל נורטון: $R_{TH}= R_N$, $V_{TH} = R_{TH} \cdot I_N$

משפט ההרכבה (סופרפוזיציה)

מחשבים זרמים בכל ענפי המעגל מכל מקור מתח/זרם **לחוד**. הזרם השקול בכל ענף הוא סכום הזרמים החלקיים מכל מקור.

4. מגנטיות ואלקטרומגנטיות

כוח מגנטו מניע

F_{mm}- כוח מגנטו מניע $[AT]$

I - הזרם העובר בסליל $[A]$

N - מספר כריכות הסליל $[T]$

$$F_{mm} = N \cdot I$$

צפיפות השטף המגנטי (ההשראה המגנטית)

$$B = \frac{\phi}{A}$$

B - צפיפות השטף המגנטי $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

ϕ- השטף המגנטי $[Wb]$

A - שטח חתך $[m^2]$

חדירות של חומר μ

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r H$$

B - צפיפות השטף המגנטי $[T = \frac{Wb}{m^2}]$

H - עוצמת השדה המגנטי $\left[\frac{AT}{m}\right]$

μ_0 - *חדירות (חלחלות) הריק ביחידות* $\left[\frac{H}{m}\right]$

μ_r - *החדירות (חלחלות)* היחסית של הליבה.

עוצמת השדה המגנטי סביב מוליך נושא זרם

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

I - הזרם העובר במוליך $[A]$

r - המרחק מהמוליך $[m]$

H - עוצמת השדה המגנטי במרחק r מהמוליך $[\frac{A}{m}]$

החדירות (חלחלות) המגנטית היחסית μ_r

לחומרים שונים יש חלחלות מגנטית שונה. חלחלות היא תכונת המוליכות המגנטית של החומר ומהווה מדד למידת הקלות או הקושי בו קווי השדה המגנטי מחלחלים בתוכו ועוברים דרכו. ניתן להציג את ה"מגנוט" של חומרים שונים באמצעות החדירות היחסית.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

μ - החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת ביחידות $(\mathrm{H/m})$

μ_0 - חדירות *(חלחלות)* הריק ביחידות $(\mathrm{H/m})$

נוסחאון תורת החשמל -

μ_r - *החדירות (חלחלות)* היחסית של הליבה.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m}\right]$ - *בקירוב טוב. ניתן להשתמש בערך זה גם כמידת החדירות של האוויר*

עוצמת השדה המגנטי במרכז הסליל

כאשר מחברים את הסליל למקור מתח, עם החיבור מתחיל לזרום זרם ונוצר שדה מגנטי בתוך הסליל.

$$\boxed{H = \frac{I \cdot N}{l}}$$

I - הזרם העובר בסליל ביחידות אמפר $[A]$

N - מספר כריכות הסליל $[T]$

l - אורך הסליל ביחידות מטר $[m]$

H - עוצמת השדה המגנטי ביחידות אמפר כריכה למטר $\left[\frac{AT}{m}\right]$

השראות עצמית של הסליל על פי השטף והזרם

$$\boxed{L = \frac{N \cdot \phi}{I}}$$

I - הזרם העובר בסליל ביחידות אמפר $[A]$

N - מספר כריכות הסליל $[T]$

ϕ- השטף המגנטי $[Wb]$

הכא"מ המושרה בסליל כתוצאה משינוי השטף המגנטי בכריכות שבו

$$\boxed{E = -N\frac{d\phi}{dt}}$$

הכא"מ המושרה בסליל כתוצאה משינוי הזרם החשמלי הזורם בכריכות

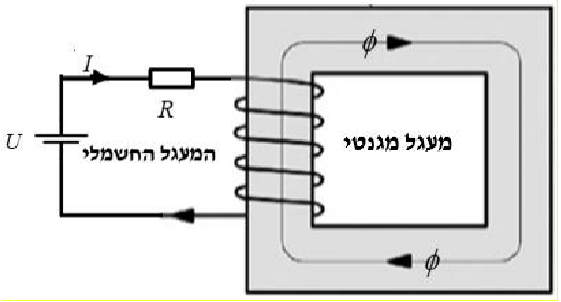
$$\boxed{E = -L\frac{di}{dt}}$$

נוסחאון תורת החשמל -

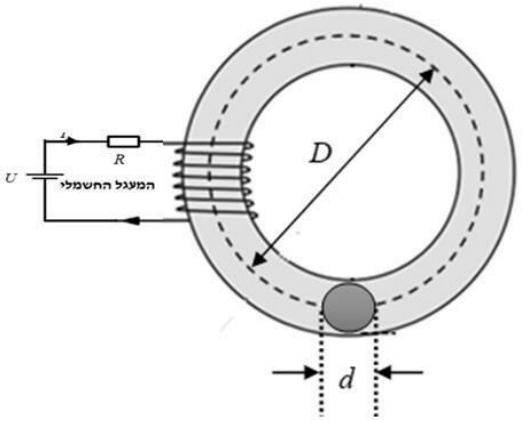
המעגל המגנטי

כאשר זורם זרם במעגל החשמלי, נוצר שדה מגנטי על ידי הסליל המלופף על המעגל המגנטי. השדה המגנטי מורכב מקווי שדה המכונים שטף מגנטי. התחום בו עובר השטף המגנטי קרוי מעגל המגנטי.

מעגל מגנטי בצורת מלבנית



מעגל מגנטי בצורת טבעת



האורך הממוצע של טבעת

$$\ell = 2\pi \cdot r = \pi \cdot D$$

ℓ – אורך המסלול המגנטי הממוצע ביחידות מטר $[m]$

D - הקוטר הממוצע של הטבעת r $[m]$ -

הוא רדיוס המעגל

שטח החתך של הטבעת

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \left(\mathrm{m}^2\right)$$

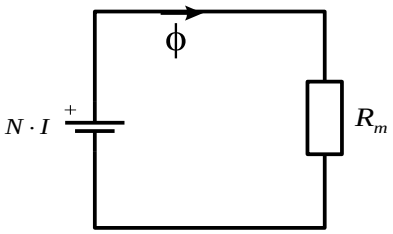
A- שטח החתך של המעגל המגנטי ביחידות מטר רבוע $[m^2]$

d - הקוטר הממוצע של **שטח החתך** $[m]$

r - הוא רדיוס המעגל

נוסחאון תורת החשמל -

מעגל מגנטי אנלוגי



מיאון מגנטי אנלוגי

$$R_m = \frac{F_{mm}}{\Phi} = \frac{\ell}{\mu_0 * \mu_r * A}$$

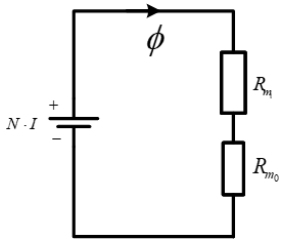
R_m - המיאון (התנגדות מגנטית) $[\frac{1}{H}]$

ℓ – אורך המסלול המגנטי הממוצע ביחידות מטר $[m]$

μ – החדירות (חלחלות) המגנטית המוחלטת ביחידות $\left[\frac{H}{m}\right]$

A – שטח החתך של המעגל המגנטי ביחידות מטר רבוע $[m^2]$

מעגל מגנטי אנלוגי עם חריץ אוויר



שטף מגנטי:

$$\boxed{\phi = \frac{F_m}{R_{mT}} = \frac{N \cdot I}{R_{mT}}}$$

חוק אמפר

$$\boxed{\sum N \cdot I = \sum H \cdot \ell}$$

I - הזרם העובר בסליל ביחידות אמפר $[A]$

N – מספר כריכות הסליל $[T]$

l – אורך קטע מהמעגל הסגור, שלאורכו עצמת השדה המגנטי קבועה ביחידות מטר $[m]$

H- עוצמת השדה המגנטי ביחידות אמפר כריכה $\frac{[AT]}{m}$

לדוגמה: $N \cdot I = H_1 \cdot \ell_1 + H_2 \cdot \ell_2$

נוסחאון תורת החשמל -

המיאון השקול של מעגל טורי, שווה לסכום המיאונים של הקטעים המרכיבים את המעגל המגנטי.

$$R_{mT} = \frac{\ell_1}{\mu_0 \cdot \mu_{r1} \cdot A_1} + \frac{\ell_2}{\mu_0 \cdot \mu_{r2} \cdot A_2}$$

השטף המגנטי במעגל הטורי:

$$\phi = \frac{F_m}{R_{mT}} = \frac{N \cdot I}{R_{mT}}$$

השראות עצמית של סליל המותקן על מעגל מגנטי

במעגל מגנטי השראות הסליל המלופף על הגרעין המרכזי תלויה במספר הכריכות ובהתנגדות המגנטית של המעגל.

$$L = \frac{N^2}{Rm_T}$$

L- השראות עצמית של הסליל ביחידות הנרי $[H]$

N – מספר כריכות הסליל $[\mathrm{T}]$

Rm_T - המיאון *(התנגדות מגנטית)* ביחידות אמפר כריכה לובר $[1/H]$

האנרגיה המגנטית האגורה בסליל

$$W_L = \frac{I^2 \cdot L}{2}$$

השראות הדדית שבין שני סלילים

$$M = K \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

M - השראות הדדית בין שני סלילים $[H]$

K - מקדם צימוד השראי בין שני סלילים.

L_1 - השראות הסליל הראשון $[H]$

L_2 - השראות הסליל השני $[H]$

מקדם הצימוד ההשראי (K) שבין שני סלילים

מקדם צימוד יכול לקבל את הערכים הבאים $0 < K < 1$

כאשר $K = 1$ - המשמעות היא, השטף המיוצר על ידי סליל אחד עובר כולו דרך הסליל השני (צימוד אידיאלי).

כאשר $K = 0$ - השטף המיוצר על ידי סליל אחד אינו מקושר כלל לסליל השני ולכן הסלילים אמורים להיות מבודדים מבחינה מגנטית.

5. <u>אלקטרודינמיקה</u>

חוקי אלקטרודינמיקה מתייחסים לזרמים חשמליים אשר נוכחותם יוצרת שדה מגנטי.

שדה מגנטי סביב תיל ישר ארוך מאוד שנושא זרם חשמלי

התיל נושא הזרם, המטענים שנעים בתיל יוצרים שדה מגנטי. קווי השדה הם מעגלים, שמרכזם בציר התיל וצפיפותם הולכת ופוחתת עם התרחקות מהתיל.



$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

B - צפיפות השדה המגנטי מחוץ למוליך(T).

r - המרחק מתיל אינסופי שדרכו זורם זרם (m).

I - הזרם במוליך$[A]$.

μ_0 - חדירות (חלחלות) הריק $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ [\frac{H}{m}]$.

μ_r - החדירות (חלחלות) היחסית של הליבה.

כאשר המוליך נמצא באוויר, ניתן להניח $\mu = 1$

חישוב הכוח ליחידת אורך בין שני מוליכים מקבילים נושאי זרם

כאשר שני מוליכים ישרים ארוכים ומקבילים זה לזה **(אינסופיים),** הכוח שהם מרגישים אינסופי. ולכן, במקרה זה נחשב את הכוח ליחידת אורך.

F - *הכוח הפועל בין שני תיילים* $[N]$

μ_0 - חדירות (חלחלות) הריק $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ [\frac{H}{m}]$.

μ_r - החדירות (חלחלות) היחסית של האויר 1 .

ℓ - אורך המוליכים ביחידות מטר $[m]$

d - המרחק בין המוליכים ביחידות מטר $[m]$

I_1 - הזרם העובר במוליך הראשון *ביחידות אמפר* [A]

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2\pi \cdot d}[N]$$

הכוח האלקטרומניע (כא"מ) מושרה

כאשר מניעים מוליך בתוך שדה מגנטי בניצב לקווי הכוח המגנטי, יופיע בין קצוות המוליך כוח אלקטרו-מניע, ואם המוליך מהווה חלק ממעגל חשמלי סגור, יזרום בו זרם. פעולה זו קרויה השראה אלקטרומגנטית והכא"מ המתעורר בין קצוות המוליך נקרא כא"מ מושרה.

הכא"מ המושרה במוליך, הנע במהירות קבועה בתוך שדה מגנטי:

$$\boxed{E = B \cdot V \cdot \ell \cdot \sin\alpha}$$

B - צפיפות השטף המגנטי $[\frac{Wb}{m^2}]$

E - כא"מ מושרה במוליך $[V]$

ℓ - אורך המוליך בתוך השדה המגנטי $[m]$

V - מהירות תנועת המוליך $[\frac{m}{sec}]$

α - הזווית בין כיוון תנועת המוליך לשטף המגנטי $[\circ]$

חוק פרדיי

התנאי ליצירת מתח מושרה במעגל חשמלי הוא שינוי בשטף המגנטי במרחב בו נמצא המוליך. ערך הכא"מ המושרה שיוצר את הזרם המושרה פרופורציונלי לקצב השינוי של השטף המגנטי, ובמשך הזמן בו משתנה השטף המגנטי.

$$\boxed{E = -\frac{\triangle\phi}{\triangle t} = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{t_2 - t_2}}$$

E - כא"מ מושרה במוליך $[V]$

$\triangle\phi$ - שינוי השטף המגנטי $[Wb]$

$\triangle t$ - הזמן בו שינוי השטף מתקיים $[sec]$

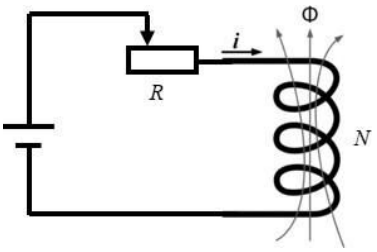
חוק לנץ

חוק לנץ הוא חוק הקובע את כיוון המתח המושרה, ומכאן גם את קוטביות הכא"מ המושרה.
חוק לנץ קובע שכוח אלקטרו-מניע מושרה יתנגד לסיבת היווצרותו, כלומר "ישאף" להקטין את עצמו.
הסימן מינוס מציין את העובדה שכיוון המתח המושרה מתנגד בפעולתו המגנטית לסיבת היווצרו.

$$\boxed{E = -\frac{\triangle\phi}{\triangle t}}$$

השראות עצמית

אם נתבונן על סליל מוליך בו זורם זרם חשמלי, נראה כי הזרם החשמלי הזורם בסליל יוצר שדה מגנטי. בזכות המבנה, קווי השדה המגנטי שבתוך הסליל מתרכזים ומצטופפים ויוצרים יחד שדה מגנטי משמעותי בחלל הפנימי, הבלוא על ידי הסליל. לכן מחוץ לסליל השדה המגנטי חלש מאוד.



$$L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 n^2 A}{\ell}$$

n - מספר הכריכות

A - שטח חתך של כל אחת מהכריכות $[m]$

ℓ - אורך הסליל $[m]$

L - השראות הסליל $[H]$

הכוח הפועל על תיל הנע במהירות קבועה בתוך שדה מגנטי

מוליך נושא זרם הנמצא בשדה מגנטי, "מרגיש" כוח מגנטי כתוצאה מתנועה של מטענים (אלקטרונים) הנעים **בתוכו**. כוח זה הפועל על המוליך יגרום לתנועתו.

$$F = BI\ell\sin\alpha$$

F - הכוח הפועל על מוליך נושא זרם $[N]$

B - צפיפות השטף המגנטי $\frac{Wb}{m^2}$

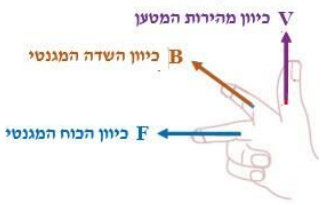
I - עוצמת הזרם דרך הכריכה $[A]$

ℓ - אורך המוליך בתוך השדה המגנטי $[m]$

α - הזווית בין המוליך לשטף המגנטי $^\circ$

קביעת כיוון הכוח על מטען חשמלי

למציאת כיוון הכוח המגנטי, הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי, ניתן להשתמש בכלל היד הימנית השני.



חישוב מומנט הסיבוב

בבריכה הנמצאת בשדה מגנטי וזורם דרכה זרם, פועל מומנט סיבובי

$$\boxed{M = B \cdot I \cdot A \cdot \cos}$$

M - מומנט הסיבוב הפועל על הבריכה $[Nm]$

I - עוצמת הזרם דרך הבריכה $[A]$

A - שטח הבריכה $[m^2]$

B - עוצמת השדה המגנטי $\frac{Wb}{m^2}$

α - הזווית בין מישור הבריכה לבין קווי השדה המגנטי $^\circ$

6. <u>אלקטרוסטטיקה</u>

גודל שדה חשמלי סביב מטען נקודתי

$$E = k\frac{q}{r^2}$$

$\boldsymbol{E}$ - שדה חשמלי

q - המטען החשמלי $[c]$

r - המרחק מהמטען $[m^2]$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

<u>קיבול</u>

$$\boxed{C = \frac{Q}{U}}$$

Q - המטען החשמלי $[c]$

U - המתח בין הדקי הקבל $[V]$

C - קיבוליות הקבל $[F]$

<u>האנרגיה האגורה בקבל</u>

$$\boxed{W = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C}}$$

W - האנרגיה האגורה בקבל $[J]$

Q - המטען החשמלי $[c]$

C - קיבוליות הקבל $[F]$

קבל לוחות (2 לוחות)

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

A – שטח הלוחות $[m^2]$

d – המרחק בין הלוחות $[m]$

ε_r – המקדם הדיאלקטרי היחסי של החומר בין לוחות הקבל

ε_0 – הקבוע הדיאלקטרי בריק: $8.854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$.

קבל כדורי :

$$C = \frac{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot R \cdot r}{R - r}$$

R - רדיוס הכדור החיצוני $[m]$

r - רדיוס הכדור הפנימי $[m]$

ε_0 - קבוע דיאלקטרי של חלל ריק $8.85 \cdot 10^{-12}$

ε_r - מקדם דיאלקטרי היחסי של החומר בין לוחות הקבל

קבל גלילי

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \ell}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

ℓ – אורך הגליל $[m]$

R – רדיוס הגליל החיצוני $[m]$

r – רדיוס הגליל הפנימי $[m]$

עוצמת השדה החשמלי בקבל לוחות

$$E = \frac{U}{d}$$

הקיבול השקול של קבלים בטור

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n}}$$

הקיבול השקול של שני קבלים בטור

$$C_T = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

הקיבול השקול של קבלים במקביל

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n$$

קיבול השקול של קבלים בתור $C_T = \frac{C}{n}$

כלל מחלק המתח לשני קבלים המחוברים בטור:

$$U_{C_1} = \frac{U_T \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

כלל מחלק המטען לשני קבלים המחוברים במקביל:

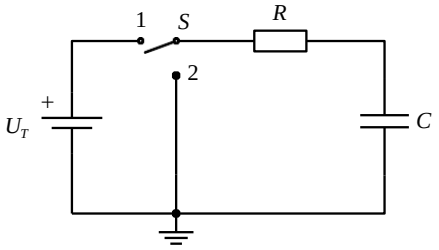
$$Q_{C_1} = \frac{Q_T \cdot C_1}{C_1 + C_2}$$

כלל מחלק המתח לשני סלילים המחוברים בטור:

$$U_{L_1} = \frac{U_T \cdot L_1}{L_1 + L_2}$$

7. תופעות מעבר מסדר ראשון – תגובה לאות מדרגה

טעינה ופריקה של קבל



חישוב מתח הקבל בטעינה - מפסק במצב 1:

$$U_{C(t)} = U_{C(\infty)} - \left(U_{C(\infty)} - U_{C(0)}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

קבוע הזמן:

$$\tau = R \cdot C$$

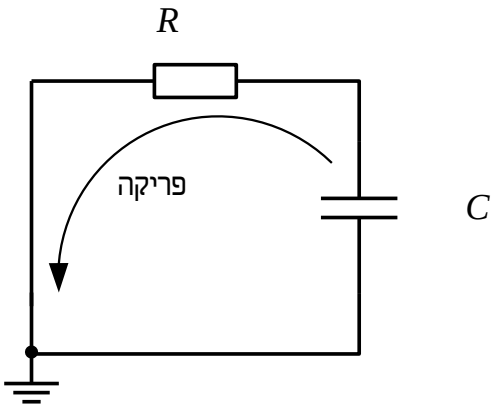
$U_{C(t)}$- מתח הקבל בתלות הזמן.

$U_{C(\infty)}$- המתח הסופי של הקבל.

$U_{C(0)}$- המתח ההתחלתי של הקבל.

τ- קבוע הזמן של המעגל]Sec[(קובע את קצב טעינת הקבל).

מפסק במצב 2-מצב פריקה



משוואת מתח הקבל (מפסק במצב 2):

$$U_{C(t)} = U_{C(0)} \cdot e^{-(\frac{t}{\tau})}$$

קבוע הזמן בפריקה:

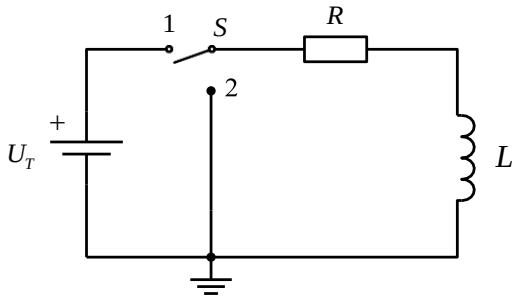
$$\tau = R \cdot C$$

$U_{C(t)}$- מתח הקבל בתלות הזמן.

$U_{C(0)}$- המתח ההתחלתי של הקבל ברגע מעבר מפסק למצב 2

τ- קבוע הזמן של המעגל במצב פריקה]Sec[

טעינה ופריקה של סליל



חישוב זרם הסליל מפסק במצב 1:

$$I_{L(t)} = I_{L(\infty)} - (I_{L(\infty)} - I_{L(0^+)}) \cdot e^{-(\frac{t}{\tau})}$$

קבוע זמן

$$\tau = \frac{L}{R}$$

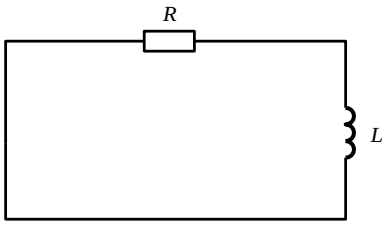
$I_{(t)}$ - זרם הסליל בתלות הזמן.

$I_{L(\infty)}$ - הזרם הסופי של הסליל.

$I_{L(0^+)}$- הזרם ההתחלתי של הסליל.

τ- קבוע הזמן של המעגל]Sec[.

<u>מפסק במצב 2-מצב פריקה:</u>



משוואת זרם הסליל –מפסק במצב 2

$$i_{L(t)} = I_{L(0^+)} \cdot e^{-(\frac{t}{\tau})}$$

קבוע זמן

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$I_{(t)}$ - זרם הסליל בתלות הזמן.

$I_{L(0^+)}$- הזרם ההתחלתי של הסליל ברגע מעבר המפסק למצב 2.

τ- קבוע הזמן של המעגל[Sec]

8. <u>אותות</u>

<u>זמן מחזור</u>

$$T = \frac{1}{f}$$

T- זמן מחזור $[sec]$

f - תדר $[H_Z]$

<u>תדר תדירות</u>

$$f = \frac{1}{T}$$

<u>זוויתית</u>

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

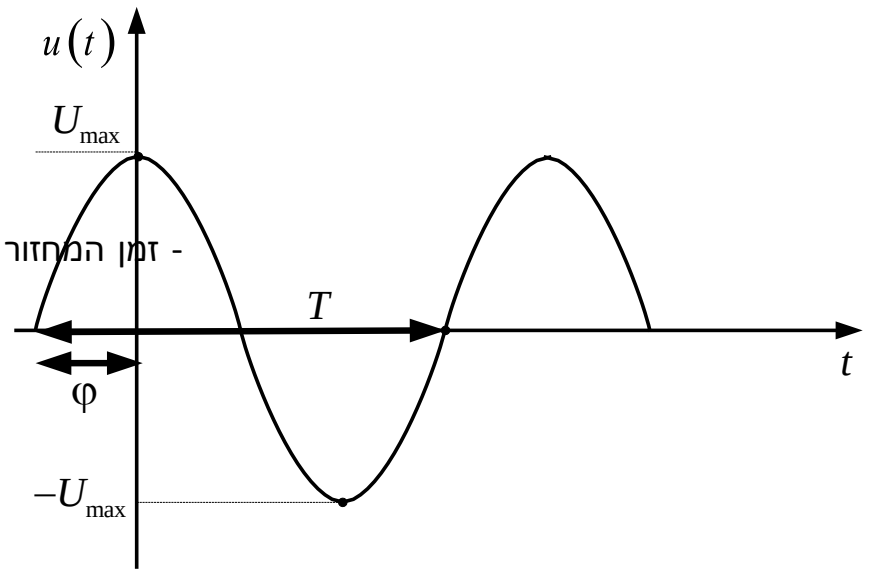
ω - המהירות הזוויתית $\left[{}^{rad}/_{\sec}\right]$

f - תדר $[H_Z]$

ערך שיא לשיא

$$U_{ptp} = U_{\max} - U_{\min}$$

תיאור אות מתח חילופין סימטרי



$$u(t) = U_{\max}\sin(\omega t + \varphi)$$

$u(t)$ - הערך הרגעי של האות $[V]$

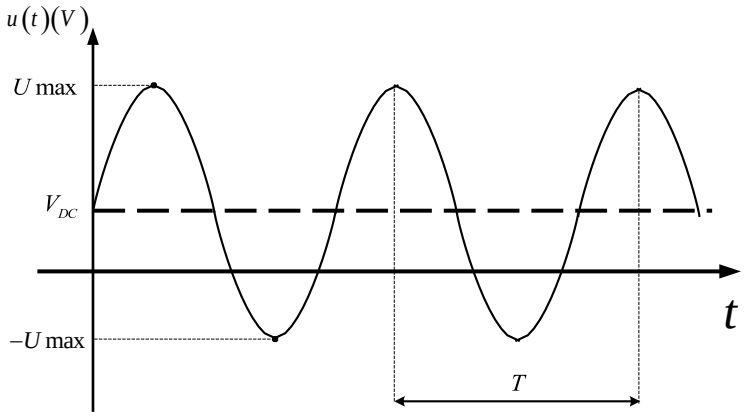
$U_{\max}$- הערך המקסימאלי של האות $[V]$

ω - תדירות זוויתית $[rad/\sec]$

f - תדירות האות $[Hz]$

φ - זווית המופע $[rad]$

תיאור אות מתח חילופין לא סימטרי סביב ציר הזמן



נוסחאון תורת החשמל

$$u(t) = U_{DC} + (U_{\max} - U_{DC}) \text{ x } \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$u(t)$ - הערך הרגעי של האות $[V]$

U_{DC} - ערך המתח הישר של האות $[V]$

$U_{\max}$ - הערך המקסימלי של האות $[V]$

ω - התדירות הזוויתית $[rad/\text{sec}]$

φ - זווית המופע $[rad]$

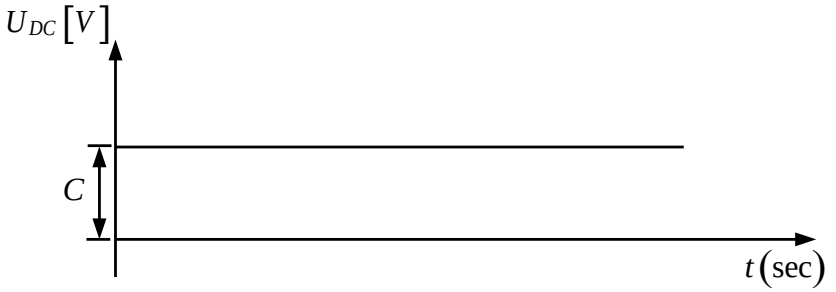
הפרש המופע

$\Delta\varphi$ - הפרש המופע (במעלות) $\Delta\phi = \frac{360°}{T} \cdot \Delta t$

T - זמן מחזור $[\text{sec}]$

Δt - משך הזמן המותאם להפרש המופע $[\text{sec}]$

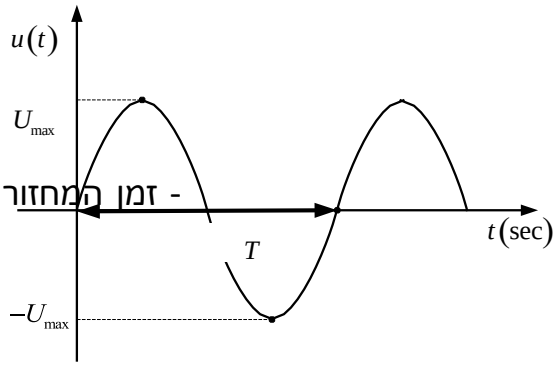
מתח ישר *DC*



הערך הממוצע של אות מתח ישר $U_a = C$

הערך האפקטיבי של אות מתח ישר $U_{ef} = C$

חישוב הערך הממוצע והיעיל (אפקטיבי)



הערך הממוצע של אות סינוס - סימטרי

$$Uav = \frac{1}{T}\int_0^{T} U(\omega t)_{max}$$

הערך האפקטיבי של אות סינוס - סימטרי

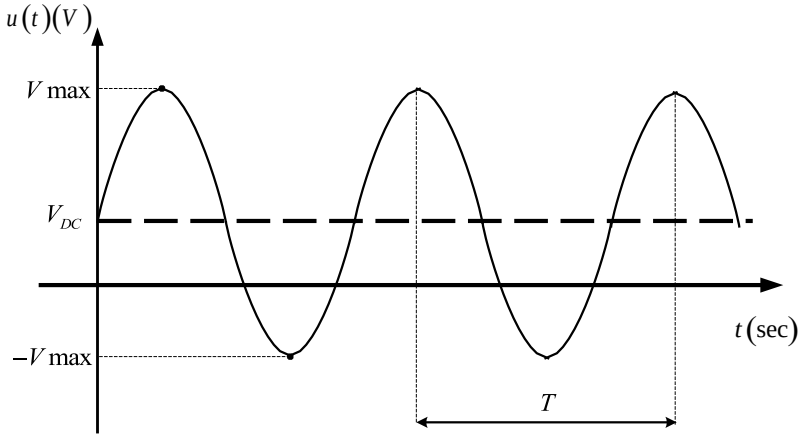
$$Ueff = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T} (U(\omega t)_{max}()^2)}$$

ההספק הממוצע שצורך נגד R

$$P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^{T} P(t) = R \cdot I_{eff}^{\ 2} = \frac{U_{eff}^{\ 2}}{R} = U_{\ eff} \cdot I_{eff}$$

אות המורכב מ- AC עם DC Offset

תיאור אות מתח חילופין לא סימטרי סביב ציר הזמן



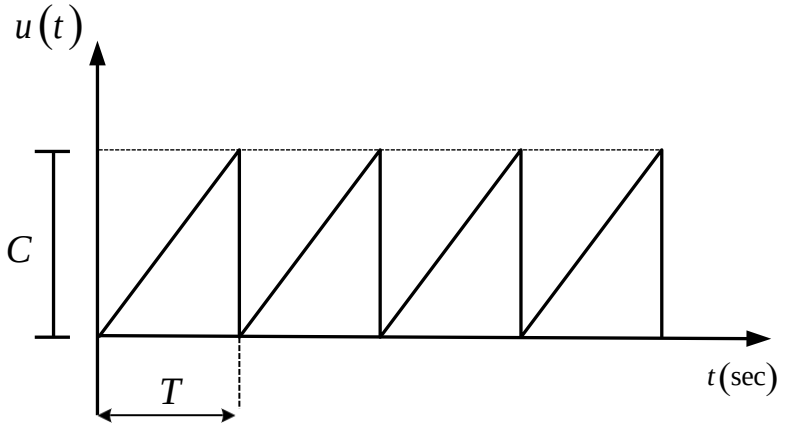
הערך היעיל של המתח המורכב משני האותות:

$$\boldsymbol{U_{eff_{(T)}} = \sqrt{U^2_{eff(AC)} + U^2_{(DC)}}}$$

הערך הממוצע של אות המתח מורכב משני האותות:

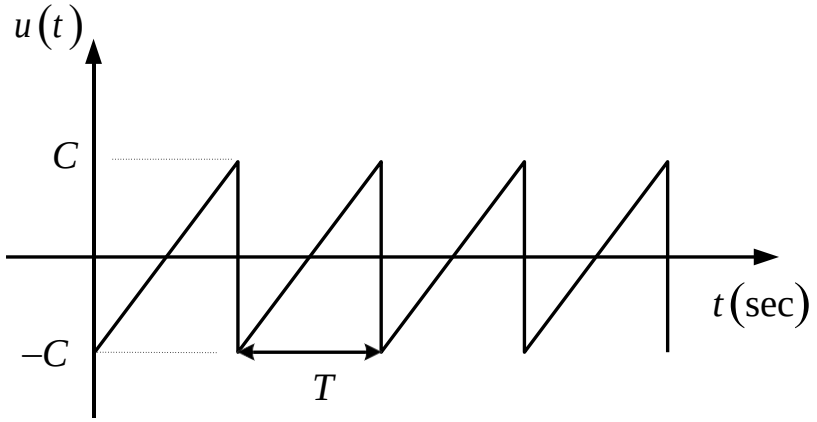
$$U_{av_{(T)}} = U_{av(DC)} + U_{av(AC)}$$

<u>אות עם שיפוע קבוע - שן מסור</u>



$$U_{av} = \frac{1}{2} \cdot C \qquad U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot C$$

אות שן מסור מחזורי סימטרי



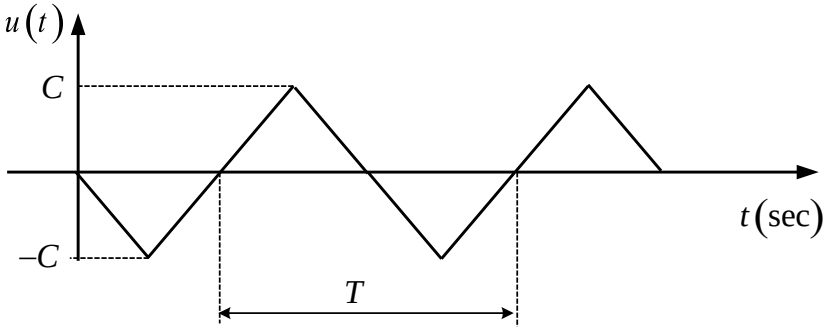
הערך הממוצע של אות שן מסור סימטרי:

$$\boxed{U_{av}=0}$$

הערך האפקטיבי של אות שן מסור סימטרי:

$$\boxed{U_{eff}=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot C}$$

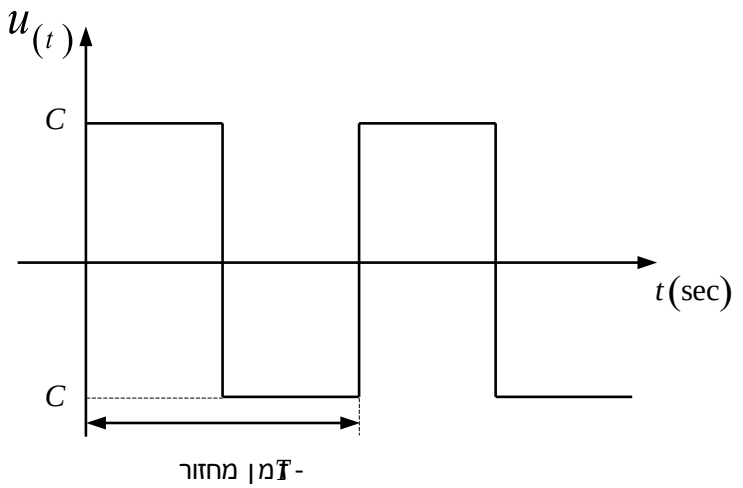
אות משולש מחזורי סימטרי



הערך הממוצע של אות משולש סימטרי: הערך $\boxed{U_{av}=0}$

האפקטיבי של אות משולש סימטרי: $\boxed{U_{eff}=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot C}$

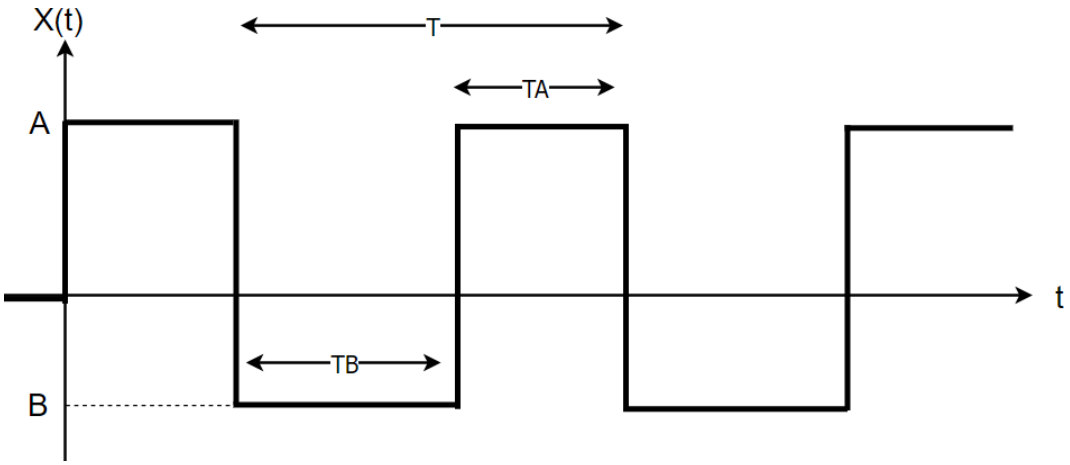
אות ריבועי מחזורי סימטרי



הערך הממוצע של אות ריבועי-סימטרי $\boxed{U_{av} = 0}$

הערך האפקטיבי של אות ריבועי-סימטרי $\boxed{U_{eff} = C}$

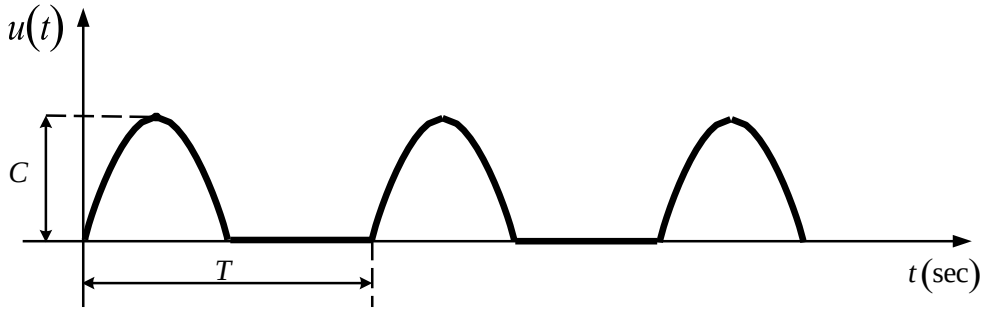
אות ריבועי מחזורי אסימטרי



$$X_{avg} = \frac{A \cdot T_A + B \cdot T_B}{T}$$

$$X_{eff} = \sqrt{\frac{(A^2 \cdot T_A + B^2 \cdot T_B)}{T}}$$

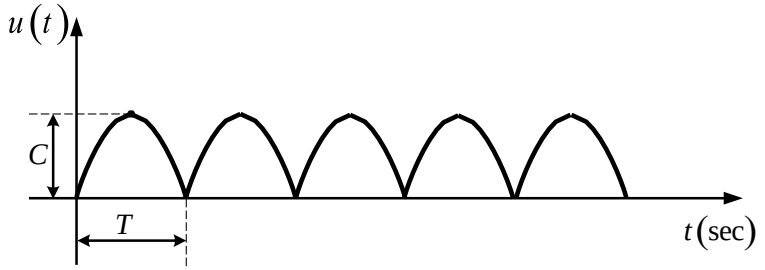
<u>אות סינוס מיושר חצי גל</u>



הערך היעיל של האות $\boxed{U_{eff}=\frac{1}{2}\cdot C}$

הערך הממוצע של האות $\boxed{U_{av}=\frac{1}{\pi}\cdot C}$

<u>אות סינוס מיושר גל</u>

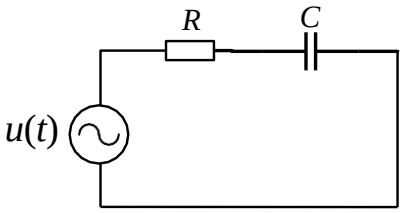


הערך היעיל של האות $\boxed{U_{eff}=\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot C}$

הערך הממוצע של האות $\boxed{U_{av}=\frac{2}{\pi}\cdot C}$

9. מעגלי זרם חילופין

מעגל טורי הכולל נגד וקבל



היגב קיבולי $$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

עכבת הקבל $Z_C = -jX_C = X_C\angle -90^\circ$

עכבה במעגל טורי הכולל נגד וקבל

$$Z = R - jX_C$$

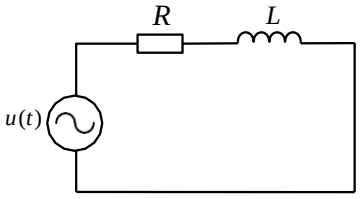
$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(-\frac{X_C}{R}\right)$$

R - מייצג את הרכיב ההתנגדותי של העכבה $[\Omega]$

X_C - מייצג את הרכיב ההיגבי של העכבה $[\Omega]$

מעגל טורי הכולל נגד וסליל



היגב השראי $$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

עכבת הסליל $Z_L = jX_L = X_L\angle 90^\circ$

עכבה במעגל טורי הכולל נגד וסליל $Z_L = R + jX_L$

$$|Z_L| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

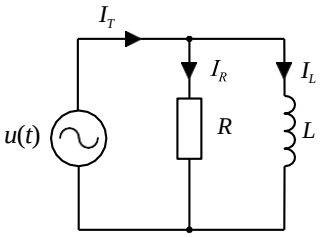
נוסחאון תורת החשמל -

$$\boxed{\varphi = tan^{-1} \cdot (\frac{X_L}{R})}$$

R - מייצג את הרכיב ההתנגדות של העכבה $[\Omega]$.

X_L - מייצג את הרכיב ההגיבי של העכבה $[\Omega]$.

מעגל מקבילי הכולל נגד וסליל



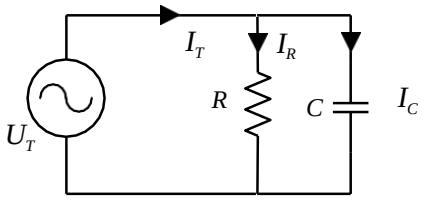
עכבה במעגל מקבילי הכולל נגד וסליל

$$\boldsymbol{Z_T} = \frac{Z_R \cdot Z_L}{Z_R + Z_L} = \frac{R \cdot (-jX_L)}{R - jX_L}$$

המתירות במעגל מקבילי הכולל נגד וסליל

$$Y_T = \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} - j\omega L$$

מעגל מקבילי הכולל נגד וקבל



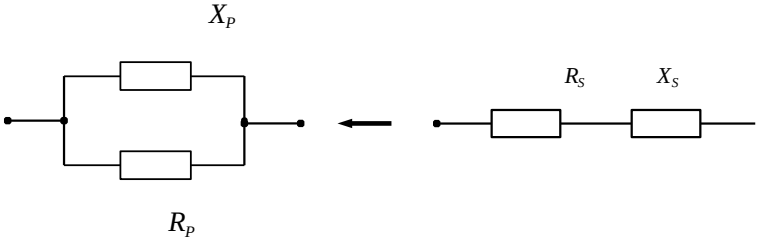
עכבה במעגל מקבילי הכולל נגד וקבל

$$\boldsymbol{Z_T} = \frac{Z_R \cdot Z_C}{Z_R + Z_C} = \frac{R \cdot (-jX_C)}{R - jX_C}$$

המתירות במעגל מקבילי הכולל נגד וקבל

$$Y_T = \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} - j\omega C$$

המרת חיבור טורי למקבילי

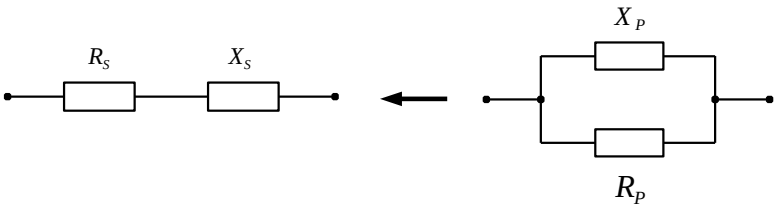


מעבר מחיבור טורי לחיבור מקבילי לפי הנוסחאות:

$$R_P = \frac{R_S^{\,2} + X_S^{\,2}}{R_S}$$

$$X_P = \frac{R_S^{\,2} + X_S^{\,2}}{X_S}$$

<u>המרת חיבור מקבילי לטורי</u>



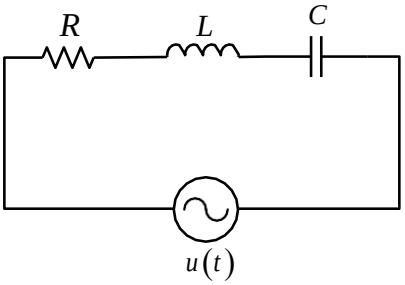
מעבר מחיבור מקבילי לחיבור טורי בעזרת הנוסחאות:

$$R_S = \frac{R_P \cdot X_P^{\,2}}{R_P^{\,2} + X_P^{\,2}}$$

$$X_S = \frac{X_P \cdot R_P^{\,2}}{R_P^{\,2} + X_P^{\,2}}$$

10. <u>הספקים בזרם חילופין סינוסואידי</u>

<u>מעגל טורי הכולל נגד, סליל וקבל</u>



העכבה השקולה של מעגל טורי

$$Z = R + j\left(X_L - X_C\right)$$

בחישוב הספקים <u>חובה</u> להשתמש בערכים אפקטיביים בלבד של הזרם והמתח

$\left(P\right)$ - ההספק הפעיל **(Active power)**

ההספק נמדד ביחידות וואט $\left(W\right)$.

ההספק הפעיל של המעגל מתפתח על הנגד (הנגד ממיר אנרגיה חשמלית לאנרגיה של חום).

$$P = \frac{\left|U_{R\,eff}\right|^2}{R} \qquad P = \left|\overline{I_{eff}}\right|^2 \cdot R \qquad P = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \cos\varphi$$

(Q) - ההספק ההיגבי (Reactive Power)

הספק היגבי נמדד ביחידות וולט אמפר ריאקטיבי $[VAr]$

ההספק ההיגבי הוא הספק הנאגר במשרן ומוחזר למקור.

$$Q = \frac{|Ueff|^2}{X} \qquad Q = |Ieff|^2 \cdot X \qquad Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin\varphi$$

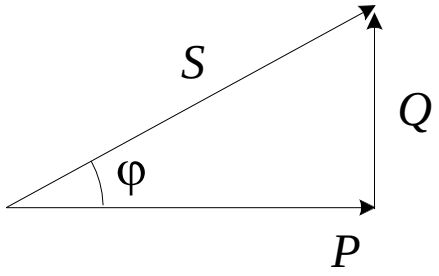
(S) - ההספק המדומה (Apparent Power)

ההספק המדומה נמדד ביחידות וולט אמפר (VA).

$$\overline{S} = \left|\overline{I_{eff}}\right|^2 \cdot \overline{Z} \qquad \overline{S} = \frac{\left|U_{eff}\right|^2}{Z^*} \qquad S = U_{eff} \cdot I_{eff}^* = P + jQ$$

<u>ההספק במעגל בעל אופי השראי</u>

באשר $X_C > X_L$ המעגל בעל **אופי השראי**



משולש ההספקים במעגל בעל אופי השראי

ההספק המדומה של המעגל:

$$S = U \cdot I \cdot cos\,\varphi + jU \cdot I \cdot sin\varphi = P + jQ$$

$$P = S\,cos\,\varphi$$

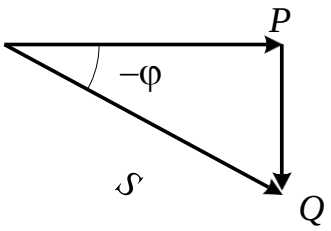
$$Q = S\,sin\,\varphi$$

$$cos\,\varphi = \frac{P}{S}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

ההספק במעגל בעל אופי קיבולי

באשר $X_L > X_C$ המעגל בעל **אופי קיבולי**



משולש ההספקים במעגל בעל אופי קיבולי

ההספק המדומה של המעגל:

$$\boxed{S = U \cdot I \cdot cos\,\varphi - jU \cdot I \cdot sin\varphi = P - jQ}$$

$$\boxed{P = S\,cos\,\varphi}$$

$$\boxed{Q = S\,sin\,\varphi}$$

$$\boxed{cos(-\varphi) = \frac{P}{S}}$$

שיפור גורם ההספק

$$\boxed{C = \frac{P}{\omega \cdot |U|^2}(tan\,\varphi_1 - tan\,\varphi_2)}$$

C - קיבול $[F]$

P - הספק פעיל $[W]$

U - המתח $[V]$

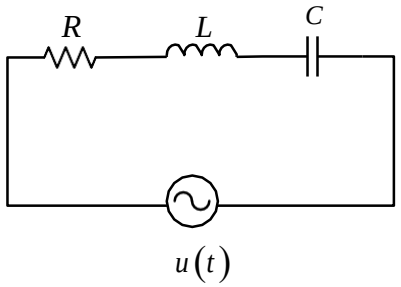
φ_1 - זווית המופע לפני השיפור

φ_2 - זווית המופע אחרי השיפור

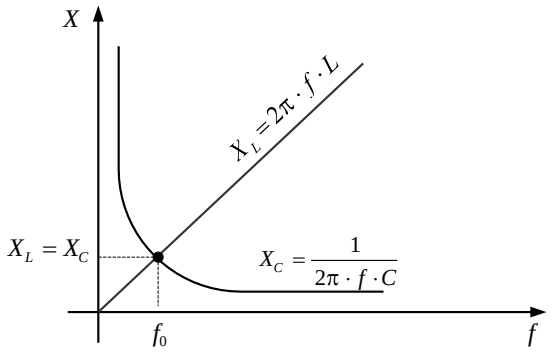
11. מעגלי תהודה

מעגל תהודה טורי

במעגל תהודה טורי, ניתן לשנות את תדר המעגל, או אחד מרכיבי המעגל (למעט הנגד) וע''י כך להגיע למצב שבו החלק המדומה של **העכבה** מתאפס.



העכבה השקולה של מעגל טורי $\boxed{Z = R + j\left(X_L - X_C\right)}$



במצב תהודה $\boxed{Z = R}$

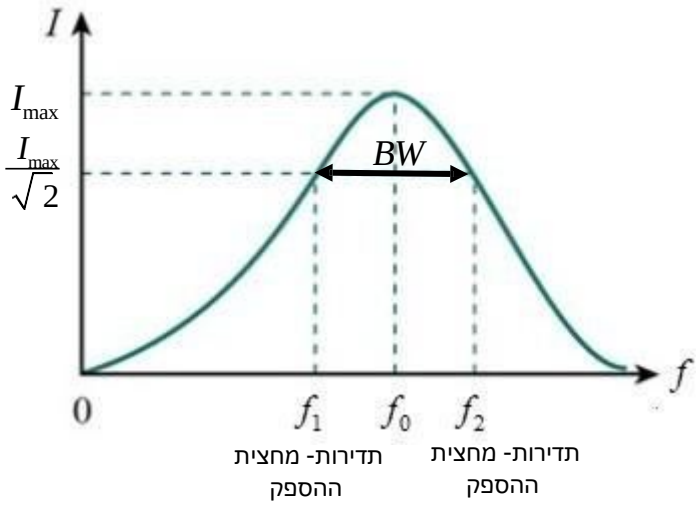
תדירות הזוויתית בתהודה $\boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}}$

ω_0- התדירות הזוויתית בתהודה $\left[{}^{rad}/_{\sec}\right]$

תדירות התהודה $\boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}}$

f_0- תדירות התהודה $\left[Hz\right]$

רוחב הפס



$\boxed{BW = f_1 - f_2}$

$\boxed{f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}}$

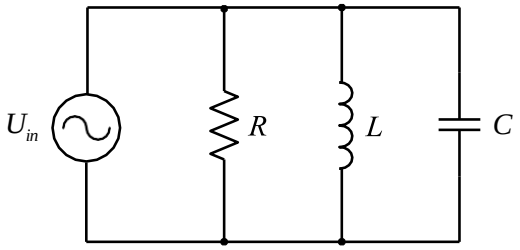
$\boxed{BW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R}{L}}$

גורם הטיב $\boxed{Q_0 = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}}$

נוסחאון תורת החשמל -

מעגל תהודה מקבילי

בדומה למעגל תהודה טורי, במעגל RLC מקבילי, ניתן לשנות את תדר המעגל, או רכיב במעגל וע''י כך להגיע למצב שבו החלק המדומה של **המתירות** מתאפס.



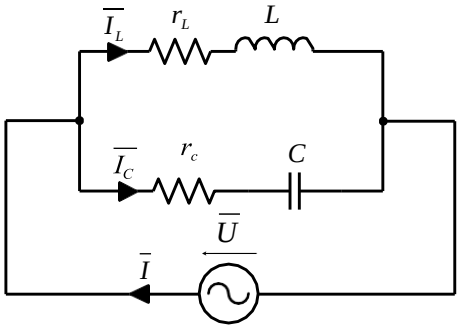
התדירות הזוויתית בתהודה:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

תדר התהודה:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

מעגלי תהודה מקבילים מעשיים



התנאי הכללי לתהודה

$$\frac{X_L}{r_L^2+X_L^2} = \frac{X_C}{r_c^2+X_C^2}$$

תדר התהודה הזוויתי

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{R_0^2 - r_L^2}{R_0^2 - r_C^2}}$$

מקרה פרטי: תדר התהודה הזוויתי כאשר $r_C = 0$ (קבל טהור)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{r_L^2}{L^2}}$$

מקרה פרטי: כאשר $r_L = r_c = 0\Omega$

תדר התהודה הזוויתי

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

גורם הטיב

$$Q = \frac{R}{R_0} = \omega_0 RC = \frac{R}{\omega_0 L}$$

רוחב הסרט

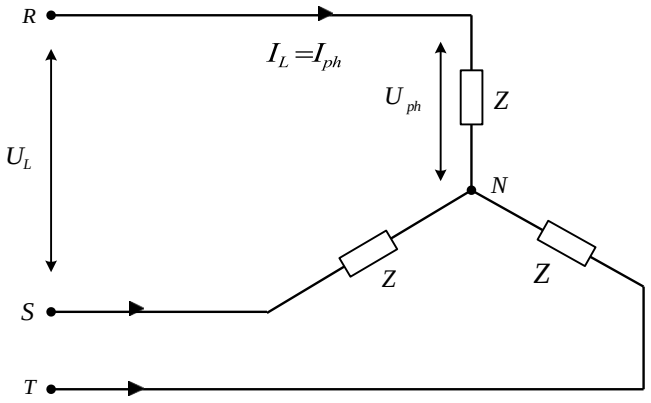
$$BW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = f_2 - f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{RC}$$

התנגדות אופיינית

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

12. רשתות תלת פאזיות

מעגל תלת מופעי (פאזי) מאוזן בחיבור כוכב



זרמים בחיבור כוכב

I_{ph} - הזרם הפאזי העובר בעומס Z ביחידות אמפר $[A]$

I_L - הזרם הקווי העובר בקו האספקה ביחידות אמפר $[A]$

$$I_L = I_{ph}$$

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z}$$

מתחים בחיבור כוכב

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

$|U_L|$- מתח שלוב קווי , המתח בין שני המוליכים בקווי ההזנה, ביחידות וולט .

$|U_{ph}|$- מתח מופעי , מתח בין המוליך המופעי בקו ההזנה למוליך האפס ביחידות וולט .

הספק תלת מופעי

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

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

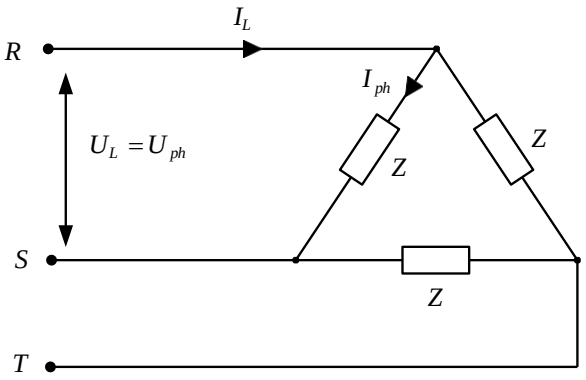
$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi$$

S - ההספק המדומה במעגל ביחידות [VA]

P - ההספק הממשי במעגל ביחידות [W]

Q - ההספק העיוור (הריאקטיבי) במעגל ביחידות [VAr]

<u>מעגל תלת מופעי (פזי) מאוזן בחיבור משולש</u>



זרמים בחיבור משולש

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

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z}$$

$|I_{ph}|$- הזרם הפזי העובר בעומס Z ביחידות אמפר $[A]$

$|I_L|$- הזרם הקווי העובר בקו האספקה ביחידות אמפר $[A]$

מתחים בחיבור משולש

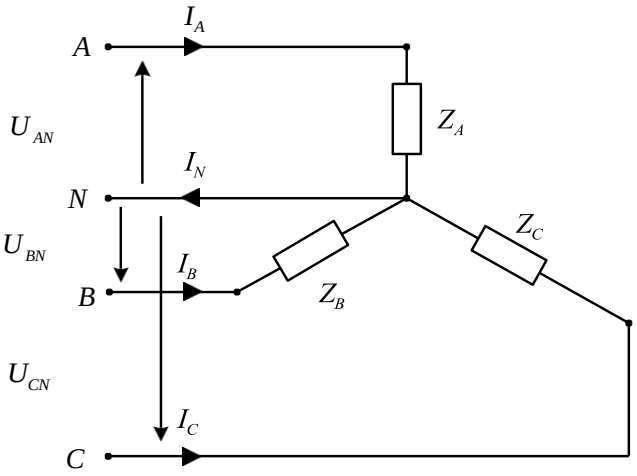
$$U_L = U_{ph}$$

U_L- מתח שלוב קווי , המתח בין שני המוליכים בקווי ההזנה $[V]$

U_{ph}- מתח מופעי , מתח על העבבה מופעית $[V]$

<u>עומס לא מאוזן - בחיבור כוכב של 4 תיילים</u>

כאשר העומס **בלתי מאוזן,** כלומר: העומסים בשלושת המופעים לא זהים, נדרש לרשת של 4 תילים. המתחים על עכבת העומס שווים, זרמי הקוויים **אינם** שווים. משמעות הדבר: ברשת זו יזרום זרם דרך מוליך האפס.



הזרם במוליך האפס:

$$\boxed{I_N = I_R + I_S + I_T}$$

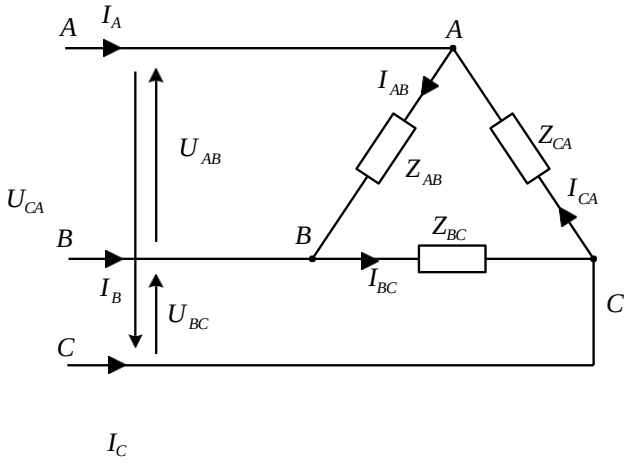
ההספק בכל אחד מהמופעים:

$$P_{Z_A} = {I_S}^2 \cdot R_A$$
$$P_{Z_B} = {I_S}^2 \cdot R_B$$
$$P_{Z_C} = {I_T}^2 \cdot R_C$$

ההספק הכולל:

$$\boxed{P_T = P_{Z_A} + P_{Z_B} + P_{Z_C}}$$

עומס תלת מופעי - בחיבור משולש לא מאוזן



הזרם דרך הפאזה I_{AB}:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}$$

הזרם דרך הפאזה I_{BC}:

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}}$$

הזרם דרך הפאזה I_{CA}:

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}}$$

ההספקים במעגל:

$$P_{AB} = {I_{AB}}^2 \cdot R_{AB}$$
$$P_{BC} = {I_{BC}}^2 \cdot R_{BC}$$
$$P_{CA} = {I_{CA}}^2 \cdot R_{CA}$$

ההספק הכולל:

$$P_T = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$$