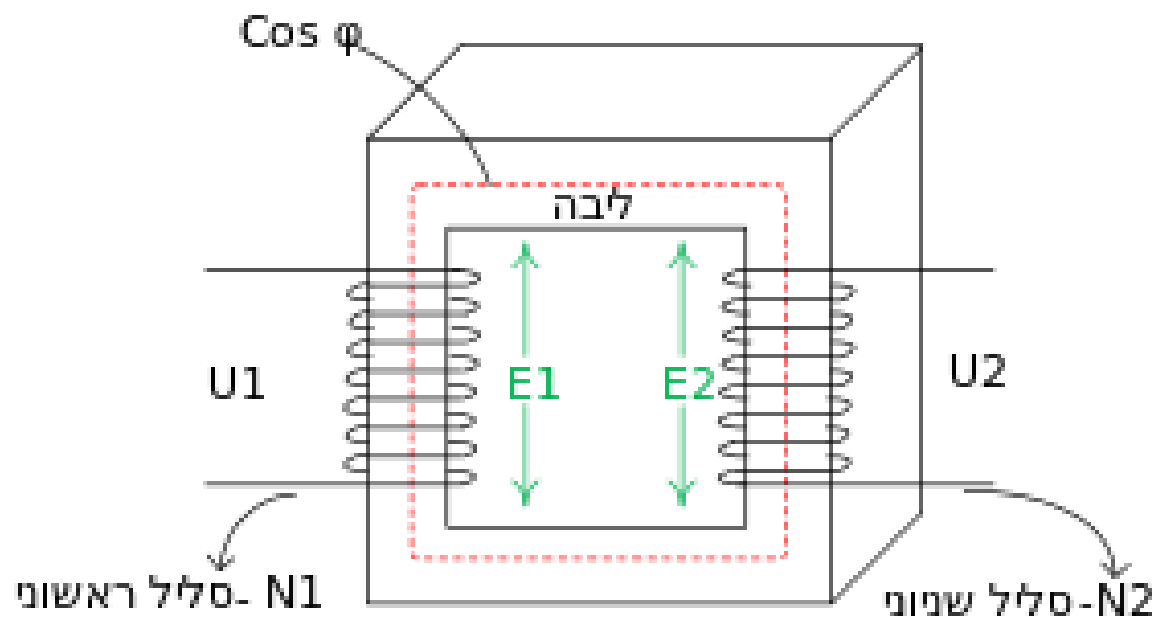


חשמל

ישומים טכנולוגיים



◀ מתח וזרם חילופין

- מוטיבציה (מדוע כדאי השימוש במתחי חילופין).
- מתח ישר אל מול מתח חילופין.
- מתח חילופין סינוסואידלי.
- מחולל גל סינוסואידלי-הגנרטור.
- הכא"מ המושרה במחולל מצח חילופין.
- חיבור מחולל לנגד עומס.
- ההספק הנמסר לנגד העומס.
- ערכים אפקטיביים של הספק, כא"מ וזרם.

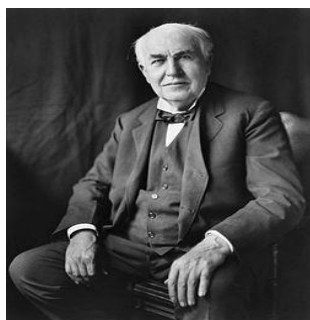
◀ שינוע אנרגיה

- שיקולי כא"מ.
- שיקולי הספק.
- הנחתת כא"מ בכניסה לאזור מיושב.

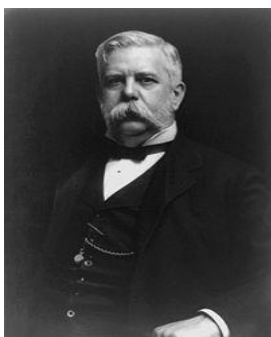
◀ בשנות השמונים של המאה התשע עשרה, ניטש בארצות הברית ויכוח מקצועי בדבר הדרך היעילה ביותר להעברת אנרגיה על פני מרחקים גדולים.

שני "שחקנים" מרכזיים -תומס אלווה אדיסון (ממציא הנורה החשמלית) וג'ורג' ווסטינגהאוס, התנצחו ביניהם כשהנימוקים המרכזיים היו כדלקמן :

Thomas Alva Edison



George Westinghouse



➤ תומס אלווה אדיסון צידד בהעברת אנרגיה באמצעות מתח ישר וקבוע.

לטענתו דרך זו מסוכנת פחות.

➤ ג'ורג' ווסטינגהאוס צידד בשינוע אנרגיה חשמלית באמצעות מתח חילופין,

שיטה המאפשרת שימוש בשנאים* ולכן תוזיל באופן ניכר את

עלויות השינוע.

לבסוף, גברו טיעוניו של ווסטינגהאוס שאף קיבל על כך, למרבית האירוניה

את מדליית...אדיסון.

* כפי שיובהר בהמשך-שנאי(טרנספורמטור) מאפשר שינוע אנרגיה חשמלית במתח גבוה מאוד ולכן בזרם חלש. הפסדי האנרגיה לטובת חום/קרינה מצטמצמים באופן דרמטי.

◀ המתקנים הראשונים שיועדו להפקת מתח וזרם היו מתקנים המבוססים על מצבורי או פילוגי מטען אלקטרוסטטיים כגון סוללות או מחולל ואן דה גראף ודומיהם. מתקנים אלה סיפקו מתח ישר וזרם ישר : (**Direct Current.=D.C**). ספקי הזרם הישר הזרימו זרם דרך תיילי נחושת מהמחולל אל בתי הצרכנים. מאחר ותיילי הנחושת היו ארוכים ובעלי התנגדות משמעותית, הולכת הזרם היתה יקרה מאד בגין הפסדי אנרגיה (זיכרו כי הספק מתבזבז על נגד פרופורציוני לזרם בריבוע : $p_R = i^2 R$).

◀ כפי שנראה בהמשך-מחולל מתח חילופין, **Alternating Current = A.C** (הגורם ליצירת מתח וזרם על בסיס שטף המשתנה בכריכה מסתובבת בתוך שדה מגנטי), מאפשר להקטין משמעותית את הזרם הזורם בתיילי ההולכה המשתרעים מספקי החשמל אל הצרכנים ולכן - להקטין את הפסדי האנרגיה.

◀ מומלץ מאוד לקרוא או להקשיב להרצאתו (הקצרה) של רן לוי :

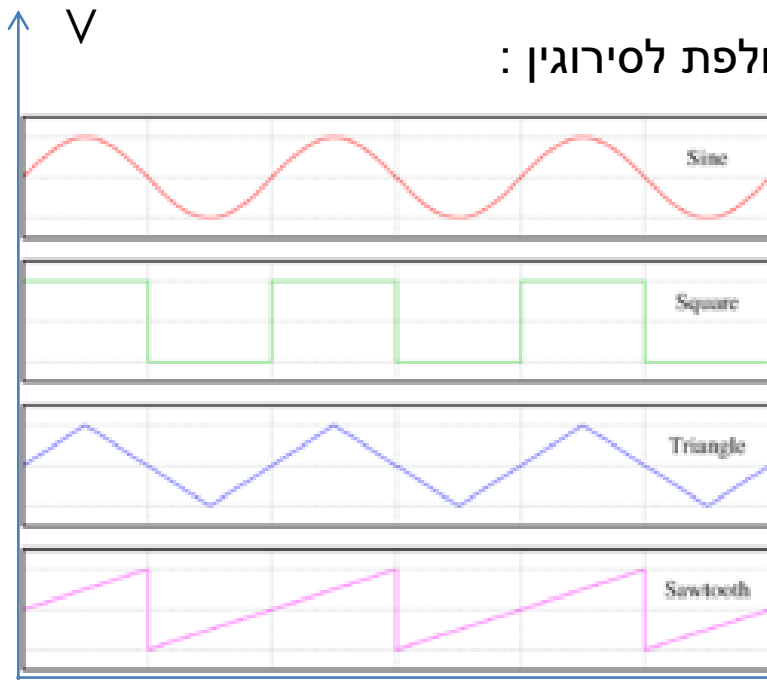
http://www.ranlevi.com/2007/10/12/ep3_the_war_of_currents/

▶ מתח חילופין הוא מתח הדקים משתנה של מקור המתח. בדרך כלל משתנה הקטביות של מקור המתח בתדירות קבועה מסוימת. בתיילי ההולכה זורם שכיוונו משתנה באותה תדירות.

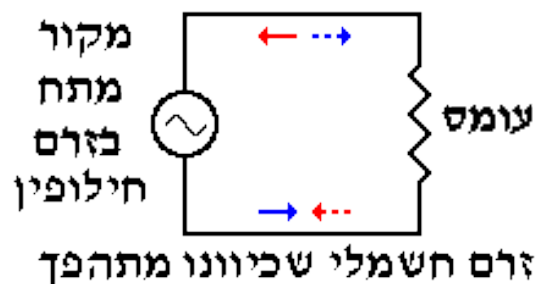


▶ תזכורת : מקור מתח ישר מספק מתח קבוע בעל קטביות אחידה :

▶ מקור מתח חילופין מספק מתח משתנה בעל קטביות מתחלפת לסירוגין :

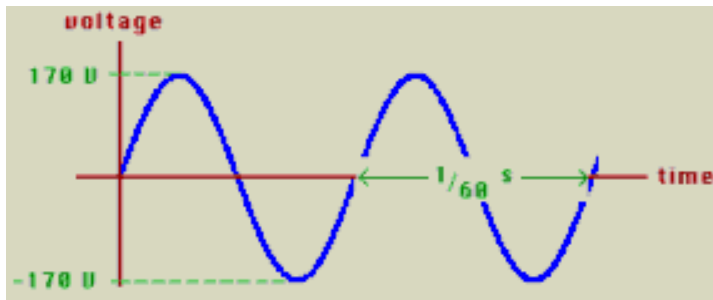


▶ סימון סכימטי של מקור מתח חילופין :



▶ צפו בהדמיה : <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/generator>

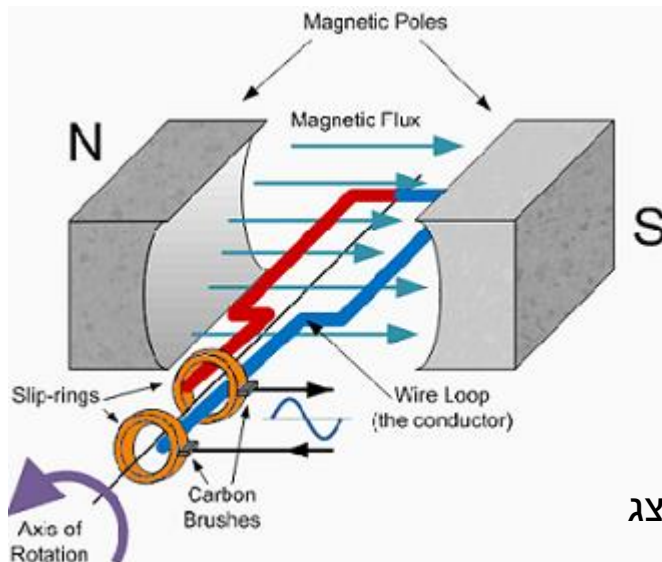
מהיבט הטכנולוגי מחולל גל סינוסואידלי הוא הפשוט ביותר מבין מחוללי מתח החילופין. גל סינוסואידלי משרת צרכים רבים באופן מספק וביחוד ניתן להזרים באמצעותו חשמל למרחקים ארוכים ובעלות נמוכה יחסית.



זו הסיבה שנתמקד בדיוננו במחולל גל סינוסואידלי.
(ראו איור עליון).

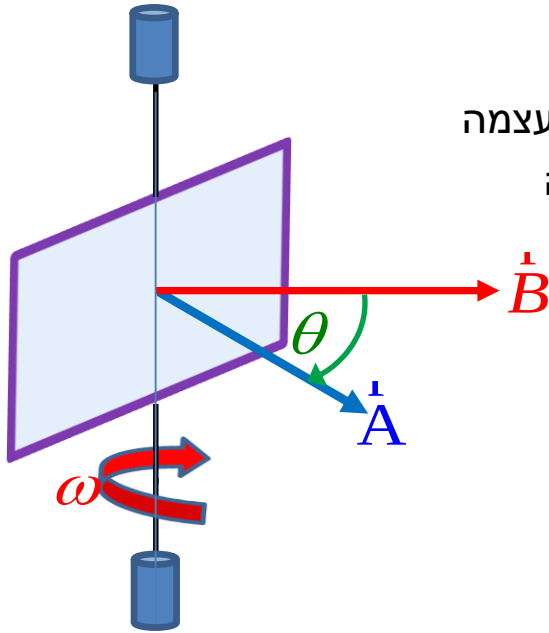
מחולל (גנרטור) גל סינוסואידלי

מחולל בסיסי של גל סינוס עשוי מכריכה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה ω (רוטור), בתוך שדה מגנטי אחיד $\vec{B}$ הנוצר בין שני קטבי מגנט (סטטור).
(ראו איור תחתון).



השטף המגנטי העובר דרך הכריכה המסתובבת-משתנה כל העת ולכן נוצר בכריכה כ"מ מושרה תנועתית. כ"מ זה, כפי שנראה בשקופית הבאה, הוא כ"מ סינוסואידלי. כשנחבר נגד עומס אל הטבעות (הכתומות) באמצעות מברשות פחם המחליקות על הטבעות-יזרום דרך הנגד זרם חילופין המיוצג ע"י פונקצית סינוס.

הכא"מ המושרה במחולל גל סינוסואידלי (1)



◀ כריכה מלבנית ששטחה A (השטח מיוצג באמצעות וקטור שטח $\vec{A}$),

מסתובבת במהירות זוויתית ω סביב ציר סיבוב העובר דרך מרכזה.

בזמן $t=0$ מתלכד וקטור השטח עם וקטור השדה המגנטי כשהכריכה עצמה

מאונכת לשדה המגנטי ($\theta=0$). במצב זה השטף החודר דרך הכריכה

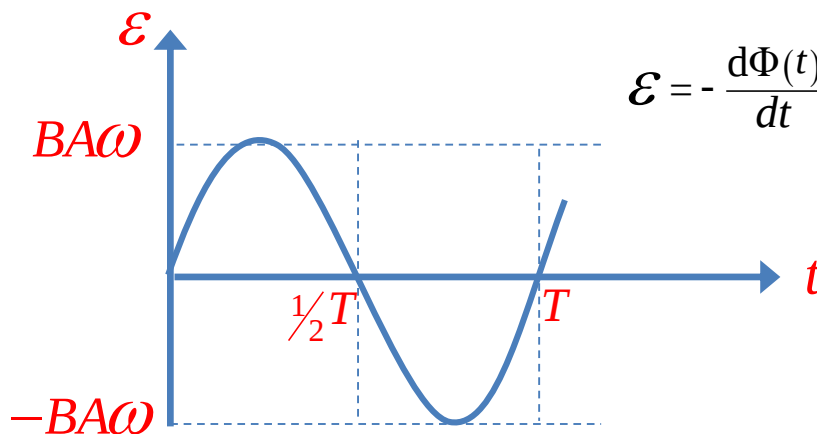
מקסימלי: $\Phi_{\max} = BA$.

◀ לאחר זמן t נוצרת זווית: $\theta = \omega t$ בין וקטור השטח לוקטור השדה

המגנטי והשטף החודר דרך הכריכה הוא: $\Phi(t) = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta$.

◀ על פי חוק פרדיי: $\mathcal{E} = - \frac{d\Phi(t)}{dt}$.

◀ נגזור את השטף לפי משתנה הזמן ונקבל:



$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi(t)}{dt} = - \frac{d[BA \cos(\omega t)]}{dt} \Rightarrow$$

$$\mathcal{E} = BA\omega \sin(\omega t)$$

הכא"מ המושרה במחולל גל סינוסואידלי (2)

◀ כדי לקבל כא"מ בעל אמפליטודה גדולה יותר-נוכל ללפף מספר כריכות במקום כריכה בודדת.

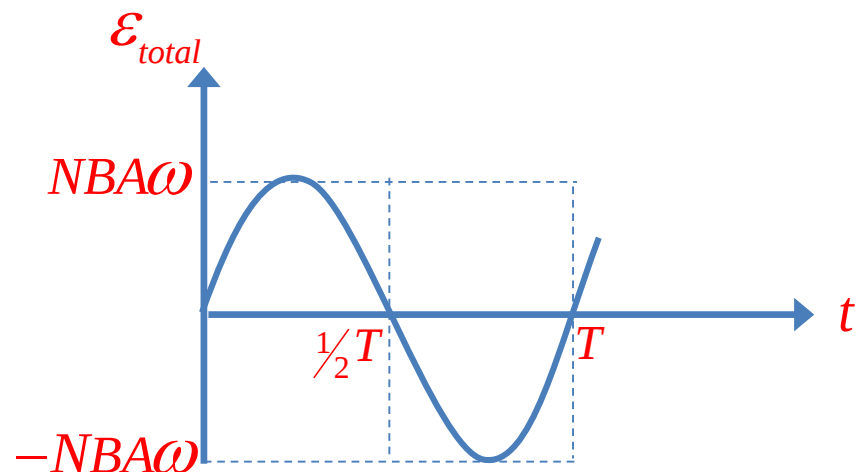
כל כריכה תיצור כא"מ לפי: $\mathcal{E} = BA\omega \sin(\omega t)$ והכא"מים יתחברו.

◀ אם תהיינה N כריכות צמודות-הכא"מ הכולל יהיה לפיכך :

$$\mathcal{E}_{total} = NBA\omega \sin(\omega t)$$

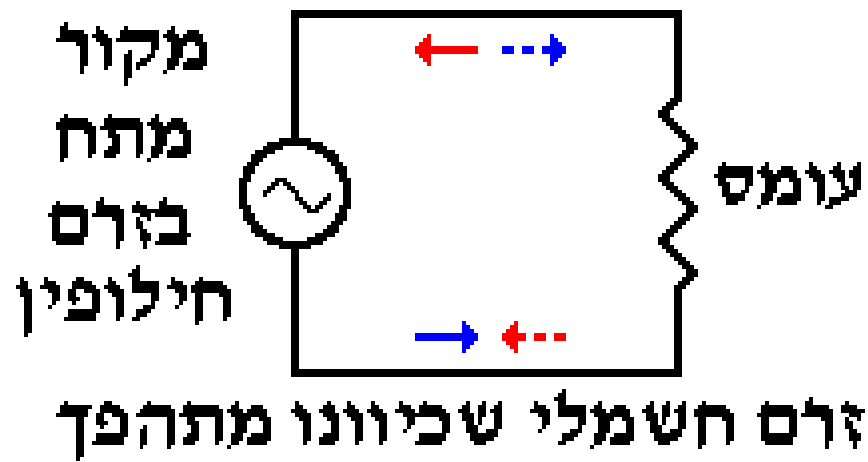
$$\mathcal{E}_{total} = \underset{1}{(NBA)} \underset{2}{\omega} \underset{3}{\sin(\omega t)}$$

NBA? גם בליגה הטובה בעולם דרוש גנרטור?



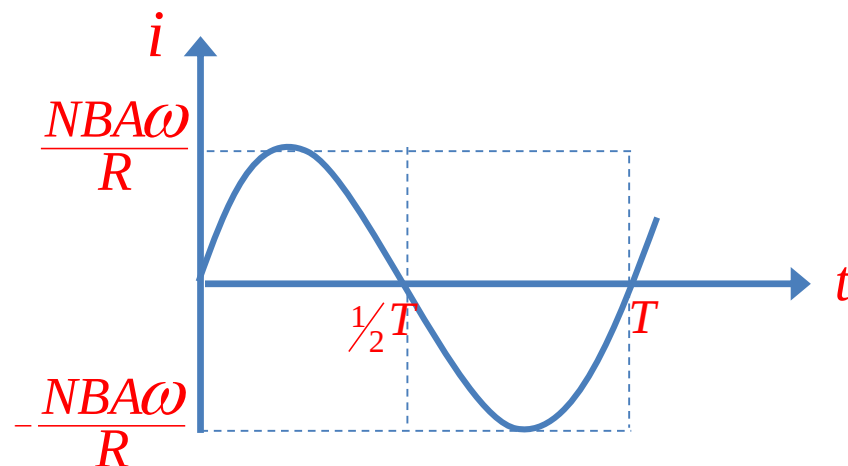
◀ כשנחבר את המחולל לנגד חיצוני (הנקרא בדרך כלל "נגד עומס")

יזרום בנגד זרם חילופין לפי :



מוקיפדיה

$$i(t) = \frac{\varepsilon(t)}{R} = \frac{NBA\omega}{R} \sin(\omega t)$$



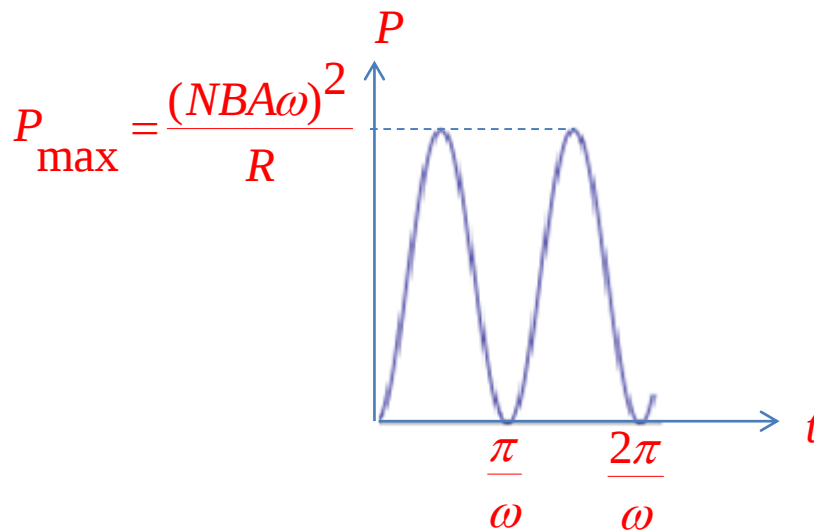
ההספק הנמסר לנגד העומס ע"י מחולל גל סינוסואידלי

◀ כזכור - הספק הנמסר לנגד נתון על פי : $P_R = \frac{\varepsilon^2}{R}$

◀ לפיכך ההספק הנמסר לנגד העומס ע"י מחולל זרם חילופין סינוסואידלי, הוא :

$$P_R = \frac{\varepsilon^2}{R} = \frac{(NBA\omega)^2}{142R43} \sin^2(\omega t) = \underbrace{P_{\max}}_{P_{\max}} \sin^2(\omega t)$$

◀ הגרף המתאר את ההספק הנמסר לנגד העומס:



הספק אפקטיבי (הספק R.M.S)-הגדרה כללית.

מאחר וההספק הנמסר לנגד העומס, בו זורם זרם חילופין, משתנה כל העת ונתון לתנודות מחזוריות-ישנם רגעים בהם ההספק הוא מקסימלי וישנם רגעים בהם ההספק הינו אפס.

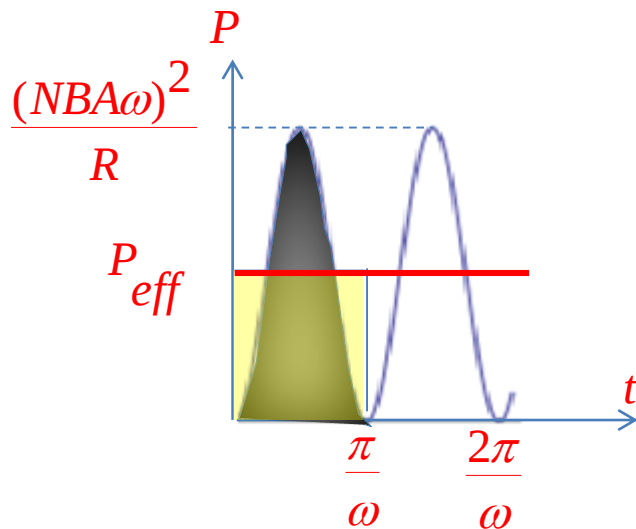
נגדיר הספק ממוצע עבור גל מחזורי. ההגדרה תתבסס על העבודה המתבצעת על נגד העומס במשך מחזור אחד של ההספק המשתנה.

הספק ממוצע זה נקרא הספק אפקטיבי : P_{eff} או הספק R.M.S : $P_{R.M.S}$ (ROOT MEAN SQUARE).

ההספק האפקטיבי מוגדר כהספק קבוע אשר עבודתו על פני מחזור אחד של ההספק שווה לעבודת

ההספק המקורי המשתנה. העבודה מתבטאת ב"שטח" מתחת לגרף ההספק. ה"שטח" השחור מבטא את העבודה המתבצעת על נגד העומס במהלך מחזור אחד של ההספק.

ה"שטח" הצהוב מייצג את העבודה שהיתה מתבצעת על נגד העומס אילו ההספק היה קבוע.



ההספק האפקטיבי הוא ההספק הקבוע עבורו שני ה"שטחים" שווים.

אם במקום ההספק המשתנה היינו מזרימים דרך הנגד זרם קבוע היה מתקבל עליו הספק קבוע. הספק זה נקרא אפקטיבי אם לאורך מירווח זמן המכיל מספר שלם של מחזורים -עבודתו שווה לעבודת ההספק "האמיתי" על פני אותו מירווח זמן. כלומר ההספק האפקטיבי הוא אכן ההספק הממוצע.

חישוב ההספק האפקטיבי-עבור גל סינוסואידלי (1)

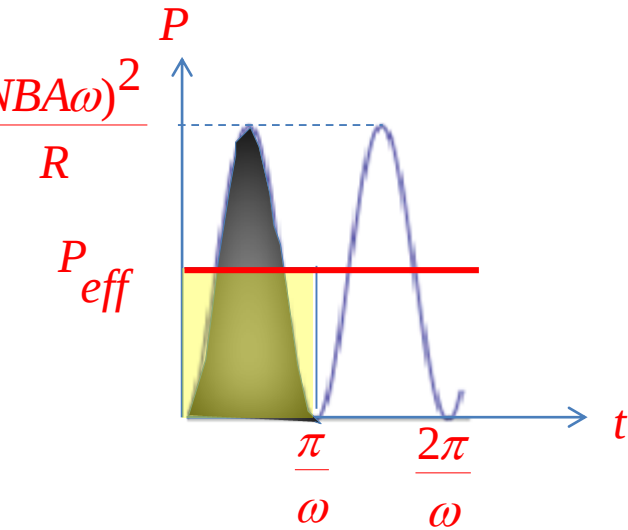
◀ בשקופית הקודמת הגדרנו את ההספק האפקטיבי של גל מחזורי כלשהו.

◀ כעת נרצה לחשב באמצעות הגדרה זו את ההספק האפקטיבי של גל סינוס (או קוסינוס).

◀ בשקופית 10 קיבלנו :

$$P_R = \frac{\varepsilon^2}{R} = \frac{(NBA\omega)^2}{142R43} \sin^2(\omega t) = P_{\max} \sin^2(\omega t)$$

$P_{\max}$



◀ הגדרת העבודה המתקבלת עבור הספק נתון :

$$W_{t_1 \rightarrow t_2} = \int_{t_1}^{t_2} p dt$$

◀ עבודת ההספק האפקטיבי על פני מחזור אחד של ההספק :

$$\left(\frac{\pi}{\omega} \right)$$

(1) $W_{peff} = p_{eff} \cdot \frac{\pi}{\omega}$

◀ עבודת ההספק "האמיתי" על פני מחזור אחד של ההספק :

$$\left(\frac{\pi}{\omega} \right)$$

שימו לב :

$$\int_0^1 \sin^2 x dx = \frac{1}{2}$$

(הסבר בנספח)

(2) $W_{preal} = \int_0^{\pi/\omega} p(t) dt = \int_0^{\pi/\omega} p_{\max} \cdot \sin^2(\omega t) dt = p_{\max} \cdot \frac{\pi}{2\omega}$

המשך בשקופית הבאה...

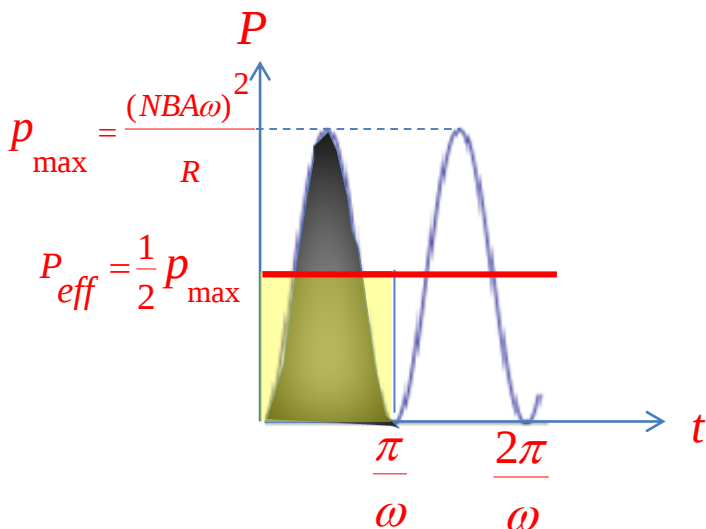
חישוב ההספק האפקטיבי-עבור גל סינוסואידלי (2)

◀ קיבלנו (בשקופית הקודמת) :

$$(1) W_{peff} = p_{eff} \cdot \frac{\pi}{\omega}$$

$$(2) W_{preal} = \int_0^{\pi/\omega} p(t) dt = \int_0^{\pi/\omega} p_{max} \cdot \sin^2(\omega t) dt = p_{max} \cdot \frac{\pi}{2\omega}$$

◀ מדרישת השוויון בין שתי העבודות נקבל : $p_{max} \cdot \frac{\pi}{2\omega} = p_{eff} \cdot \frac{\pi}{\omega} \Rightarrow p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max}$



$$p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max}$$

$$p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max} = \frac{(NBA\omega)^2}{2R}$$

חישוב הכא"מ האפקטיבי-עבור גל סינוסואידלי

◀ קיבלנו (בשקופית הקודמת) :

$$p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max} = \frac{(NBA\omega)^2}{2R}$$

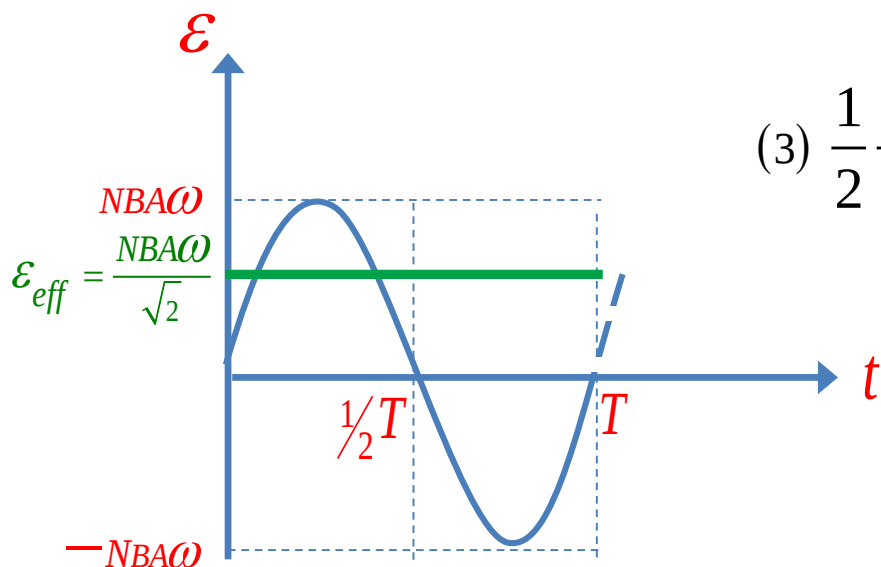
◀ לכן הכא"מ המושרה האפקטיבי (הכא"מ הקבוע שיגרום לאותו הספק ממוצע) :

$$(1) \quad p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_{max}^2}{R}$$

$$(2) \quad p_{eff} = \frac{\epsilon_{eff}^2}{R} \quad \text{והרי מתחייב :} \quad \text{◀}$$

$$(3) \quad \frac{1}{2} \frac{\epsilon_{max}^2}{R} = \frac{\epsilon_{eff}^2}{R} \quad \text{ומתוך משוואות (1) ו (2) נקבל :} \quad \text{◀}$$

◀ ונקבל לבסוף :



$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{NBA\omega}{\sqrt{2}}$$

חישוב הזרם האפקטיבי-עבור גל סינוסואידלי

◀ קיבלנו (בשקופית הקודמת) :

$$p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max} = \frac{(NBA\omega)^2}{2R}$$

◀ לכן הזרם המושרה האפקטיבי (הזרם הקבוע שיגרום לאותו הספק ממוצע) :

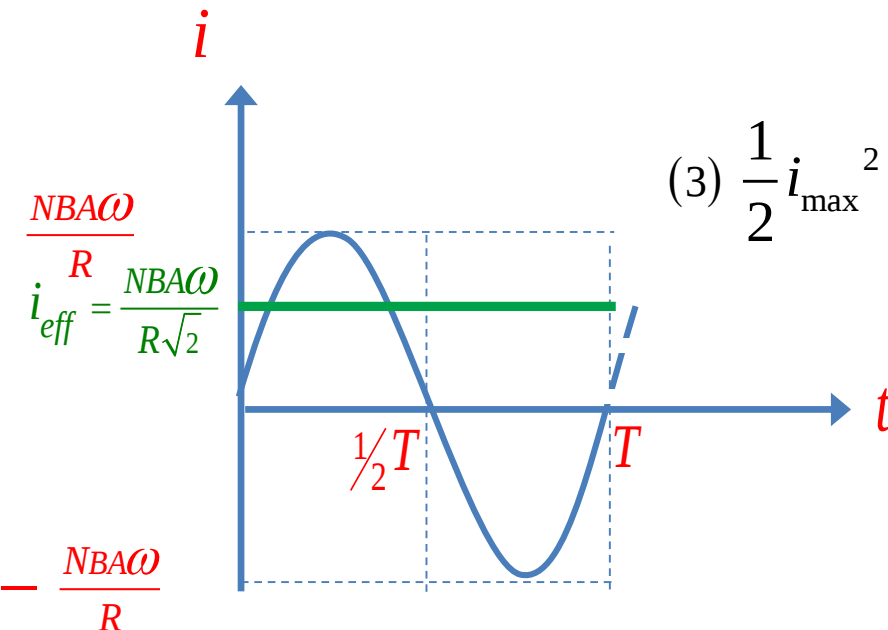
$$(1) \quad p_{eff} = \frac{1}{2} p_{max} = \frac{1}{2} i_{max}^2 \cdot R$$

$$(2) \quad P_{eff} = i_{eff}^2 \cdot R \quad \text{◀ והרי מתחייב :}$$

$$(3) \quad \frac{1}{2} i_{max}^2 \cdot R = i_{eff}^2 \cdot R \quad \text{◀ ומתוך משוואות (1) ו (2) נקבל :}$$

◀ ונקבל לבסוף :

$$i_{eff} = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{NBA\omega}{R\sqrt{2}}$$



א. רשת החשמל הישראלית משנעת אנרגיה חשמלית באמצעות מתח חילופין סינוסואידלי. המתח המרבי הוא $V_{\max}=311V$. מהו אם כך ערכו של המתח האפקטיבי (R.M.S) ?

ב. רשת החשמל של ארצות הברית משנעת אף היא אנרגיה חשמלית באמצעות מתח חילופין סינוסואידלי. -המתח האפקטיבי שם הוא : $V_{\text{eff}}=120V$. מהו לפיכך ערך המתח המרבי $V_{\max}$ בארצות הברית?

ג. מתח חילופין אפקטיבי של $V=220V$ שתדירותו 50Hz "נופל" על נגד שהתנגדותו $R=100\Omega$.

1. חשבו את ההספק הממוצע הנצרך בנגד.

2. רשמו ביטוי להספק הרגעי.

3. חשבו את ההספק הרגעי המרבי.

4. חשבו את ההספק הרגעי המינימאלי.

ד. כמה אנרגיה הופכת לחום בנגד במשך דקה אחת?

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220_V \quad \text{א.}$$

$$V_0 = V \cdot \sqrt{2} = 120 \cdot \sqrt{2} = 170_V \quad \text{ב.}$$

$$P = I \cdot V = \frac{V^2}{R} = \frac{220^2}{100} = 484_W \quad \text{ג. 1. ההספק הממוצע הנצרך בנגד:}$$

$$P_{(t)} = I_0 V_0 \sin(\omega t) = \frac{V_0^2}{R} \sin^2(\omega t) = \frac{(V \cdot \sqrt{2})^2}{R} \sin^2(\omega t) \quad \text{2. מצאו ביטוי להספק הרגעי.}$$

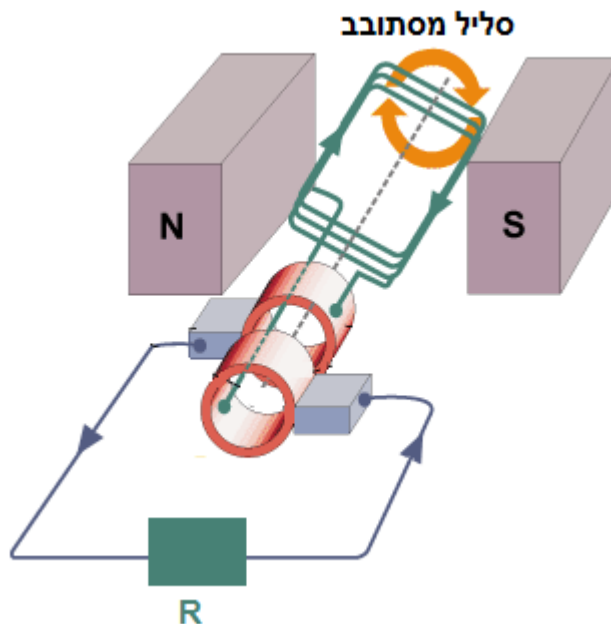
$$P_{(t)} = \frac{(220 \cdot \sqrt{2})^2}{100} \sin^2(314t) = 968 \sin^2(314t)_W \quad \omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 100\pi \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right]$$

$$P_{(\max)} = \frac{(V \cdot \sqrt{2})^2}{R} = \frac{(220 \cdot \sqrt{2})^2}{100} = 968_W \quad \text{3. ההספק הרגעי המרבי:}$$

4. ההספק הרגעי המינימאלי הוא אפס.

$$W = P \cdot t = 484 \cdot 60 = 29040_J \quad \text{ד. כמות האנרגיה ההופכת לחום בנגד במשך דקה אחת:}$$

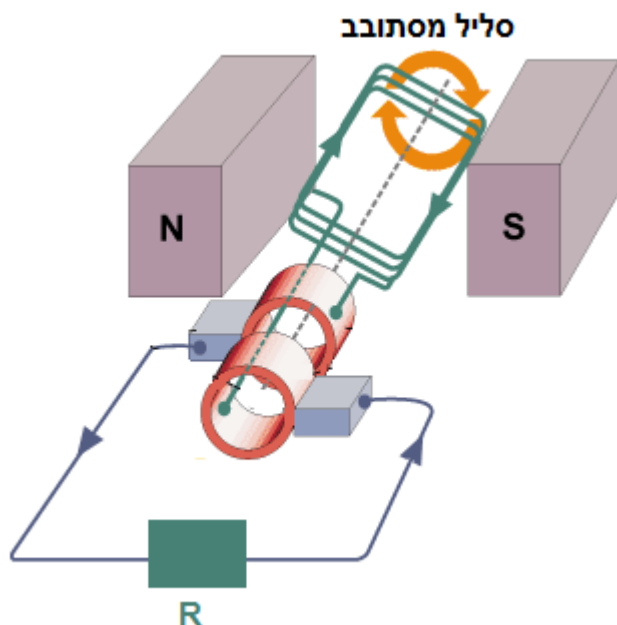
בגנרטור לזרם חילופין סינוסואידלי יש סליל ובו 180 כריכות. הסליל מבצע 50 סיבובים בשנייה. נתון שעצמת השדה המגנטי $B=1.2\tau$, והשטח $A=0.5\text{ m}^2$. למעגל מחובר נגד שהתנגדותו היא $R=12\text{ k}\Omega$. הזניחו את התנגדות יתר חלקי המעגל.



א. מצאו את המתח המרבי ε_0 ואת הזרם המרבי I_0 .

ב. רשמו ביטויים למתח ולזרם כתלות בזמן.

ג. כל כמה שניות יתקבל זרם מקסימלי בנגדי ?



$$\varepsilon_{(t)} = NBA\omega \sin(\omega t) \quad \text{א.}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 100\pi \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$$

$$\varepsilon_0 = NBA\omega = 180 \cdot 1.2 \cdot 0.5 \cdot 100\pi = 33929.2_V$$

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R} = \frac{33929.2}{12000} = 2.827_A$$

$$\varepsilon_{(t)} = NBA\omega \sin(\omega t) = 33929.2 \sin(314 \cdot t)_V \quad \text{ב.}$$

$$I_{(t)} = NBA\omega \sin(\omega t) = 2.827 \sin(314 \cdot t)_A$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02_{\text{sec}}$$

$$\Delta t = \frac{T}{2} = \frac{0.02}{4} = 0.01_{\text{sec}}$$

ג. מרווח הזמן בין זרם מקסימלי למשנהו הוא מחצית זמן מחזור:

(זה יקרה בכל פעם שמישור הכריכות יהיה מקביל לקווי השדה)

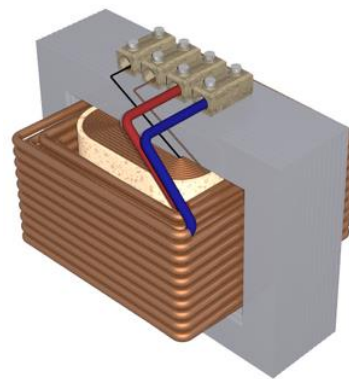
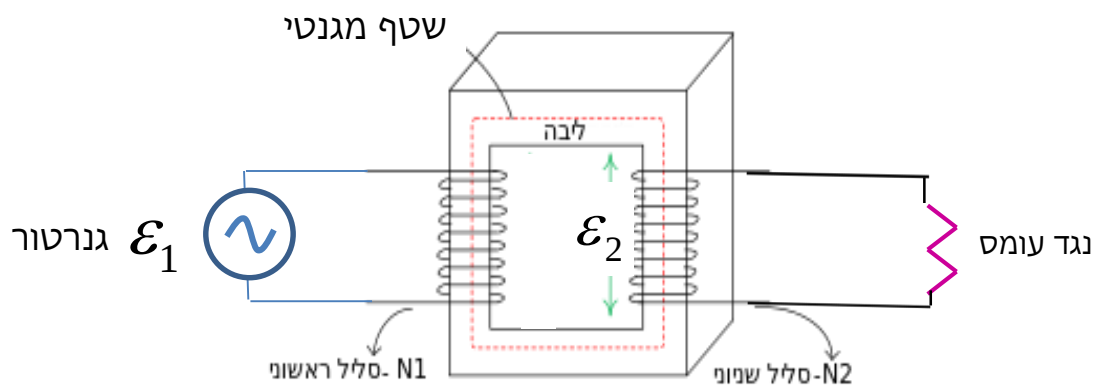
המגנטי משום שאז קצב שינוי השטף הוא מקסימלי).

שינוע אנרגיה למרחקים - שנאי (טרנספורמטור)

בשקופית מספר (4) כתבנו כי מתח חילופין יכול להקטין עלויות שינוע חשמל על פני מרחב גדול. ננסה כאן להסביר מדוע.

הרעיון הבסיסי מתבסס על כך שהכא"מ הנוצר עקב שינוי בזמן של שטף מגנטי בכריכות, פרופורציוני למספר הכריכות - (N).

על בסיס רעיון זה הומצא השנאי :



השנאי הינו מכשיר המעביר אנרגיה אלקטרומגנטית ממעגל חשמלי אחד למשנהו (ראו איור).

הסליל השמאלי נקרא סליל ראשוני והא בעל N₁ כריכות והימני-סליל משני והוא בעל N₂ כריכות.

הגנרטור יוצר כא"מ מושרה $\mathcal{E}_1$ בסליל הראשוני. הסליל הראשוני, בו זורם זרם i_1 המשתנה בזמן-יוצר שטף מגנטי שאף הוא משתנה בזמן. שטף זה מועבר ע"י ליבת ברזל אל הסליל המשני. ליבת הברזל כמעט ואינה מאפשרת שפייה של קווי שדה כך שהשטף מועבר במלואו אל הסליל המשני.

שינוע אנרגיה למרחקים - שנאי-שיקולי כא"מים

כל שינוי שטף בסליל הראשוני מועבר אל הסליל המשני דרך ליבת הברזל המעבירה, דרכה, את כל קווי השדה המגנטי *.

כלומר: $(1) \quad \frac{d\Phi_1}{dt_1} = \frac{d\Phi_2}{dt_2}$

לפי חוק פרדיי: $(2) \quad \mathcal{E}_1 = N_1 \frac{d\Phi_1}{dt_1} \Rightarrow \frac{d\Phi_1}{dt_1} = \frac{\mathcal{E}_1}{N_1}$ $(3) \quad \mathcal{E}_2 = N_2 \frac{d\Phi_2}{dt_2} \Rightarrow \frac{d\Phi_2}{dt_2} = \frac{\mathcal{E}_2}{N_2}$

נציב את משוואות (2) ו (3) במשוואה (1) ונקבל: $\frac{\mathcal{E}_1}{N_1} = \frac{\mathcal{E}_2}{N_2}$ ומכאן: $(4) \quad \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$

כלומר יחס הכא"מים תלוי ביחס מספר הליפופים בסלילים. כל כך אלגנטי. כך למשל ניתן ל"ייצר" בסליל המשני כא"מ הגבוה פי אלף מהכא"מ בסליל הראשוני, פשוט ע"י כך שנלפף בסליל המשני פי אלף ליפופים מאשר בסליל הראשוני.
או כא"מ בסליל המשני נמוך פי אלף מהכא"מ בסליל הראשוני ע"י כך שנלפף בסליל המשני אלפית ממספר הליפופים בסליל הראשוני.

אבל-מדוע לעשות זאת ? מה נרוויח מכך ? -על כך בשקופית הבאה.

* ההתייחסות לכל הגורמים בהם אנחנו דנים ונדון בהמשך-הכא"מ הזרם וההתנגדות (עכבה) הינה בערכים אפקטיביים ולא רגעיים משום הפרשי המופע ביניהם ובין הסליל הראשוני למשני.

שינוע אנרגיה למרחקים - שנאי-שיקולי הספקים (1)

◀ מהי אם כך התועלת שנפיק מכך שניתן לשנות את ערכו של הכא"מ?

התשובה טמונה במאזן הספקים (אנרגיות ליחידת זמן).

ההספק בסליל הראשוני הוא: $P_1 = \mathcal{E}_1 i_1$ ובסליל המשני הוא: $P_2 = \mathcal{E}_2 i_2$

משוויון הספקים (שימור אנרגיה ליחידת זמן) נובע: $(1) \quad P_1 = P_2 \Rightarrow \mathcal{E}_1 i_1 = \mathcal{E}_2 i_2 \Rightarrow \frac{\dot{i}_2}{\dot{i}_1} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$

אבל ראינו גם כי: $(2) \quad \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

ממשוואות (2) ו-(3) נקבל: $(3) \quad \frac{\dot{i}_2}{\dot{i}_1} = \frac{N_1}{N_2}$

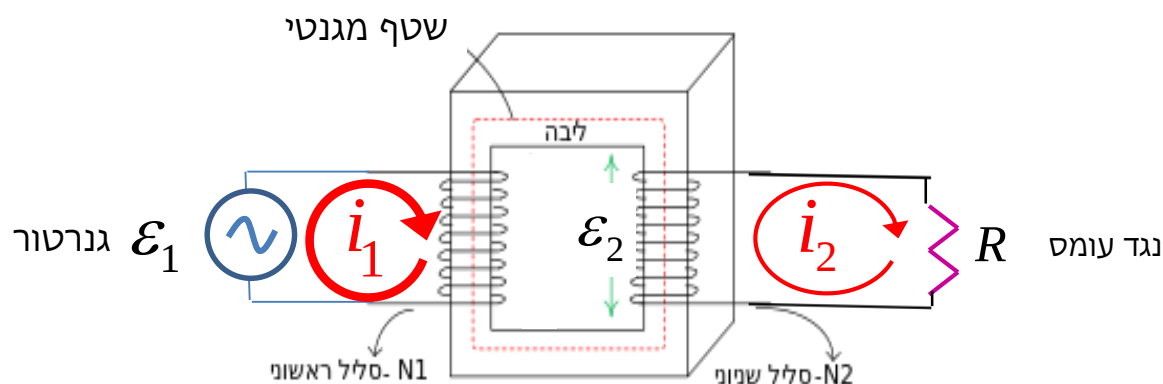
$$k = \frac{\dot{i}_2}{\dot{i}_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

הביטוי האחרון נקרא: "יחס השנאה" ומסומן לעיתים באות k . לפיכך:

◀ על משמעות תוצאה זו-בשקופית הבאה...

שינוע אנרגיה למרחקים - שנאי-שיקולי הספקים (2)

◀ נתבונן בשנאי :



◀ קיבלנו (ראו שקופית קודמת) :

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

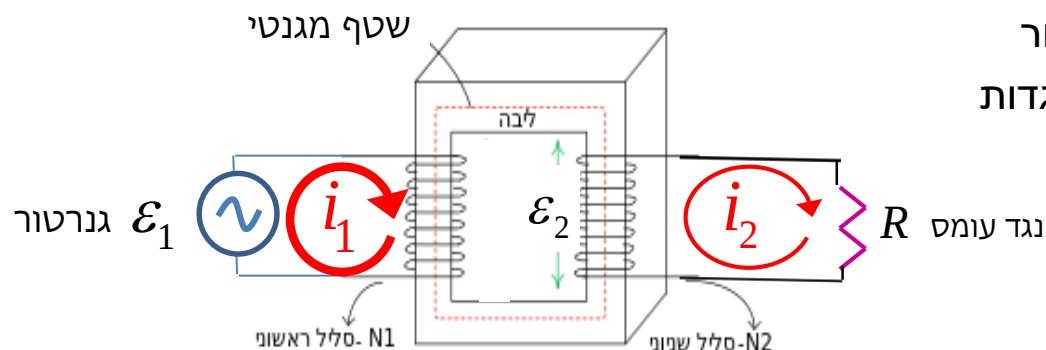
אם בסליל המשני מספר הליפופים גדול מזה שבסליל הראשוני, כלומר : $N_2 > N_1$,

אזי :

$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2$$

כלומר הזרם בסליל המשני (וגם, כמובן על פני נגד העומס R)-קטן יותר מאשר בסליל הראשוני.

שינוע אנרגיה למרחקים - שנאי-שיקולי הספקים (3)



כעת נראה שמצב זה שקול למצב בו הגנרטור מחובר כביכול להתנגדות קטנה יותר מהתנגדות העומס R :

קיבלנו: $(1) \quad i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2$

אבל: $(2) \quad i_2 = \frac{\varepsilon_2}{R}$ וגם: $\frac{\varepsilon_1}{N_1} = \frac{\varepsilon_2}{N_2}$ ולכן: $(3) \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot \frac{N_2}{N_1}$

נציב את ε_2 ממשוואה (3) למשוואה (2) ונקבל: $(4) \quad i_2 = \frac{\varepsilon_1 \cdot \frac{N_2}{N_1}}{R} = \frac{\varepsilon_1}{R} \cdot \frac{N_2}{N_1}$

את משוואה (4) נציב במשוואה (1) ונקבל: $(5) \quad i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\varepsilon_1}{R} \cdot \frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon_1}{R} = \frac{\varepsilon_1}{R \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2}$

המשך בשקופית הבאה...

שינוע אנרגיה למרחקים - שנאי-שיקולי הספקים (4)

◀ קיבלנו אפוא :
$$i_1 = \frac{\varepsilon_1}{R \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2}$$

◀ אילו הגנרטור היה מחובר ישירות לנגד העומס R הזרם היה :
$$i_1^* = \frac{\varepsilon_1}{R}$$

◀ אך השנאי גורם (בתצורה (קונפיגורציה) עבודה $N_2 > N_1$) להתנגדות עומס אפקטיבית על הגנרטור של : $R \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$ שהיא קטנה יותר מ R ולכן איבודי ההספק קטנים יותר (פי יחס הליפופים בריבוע).

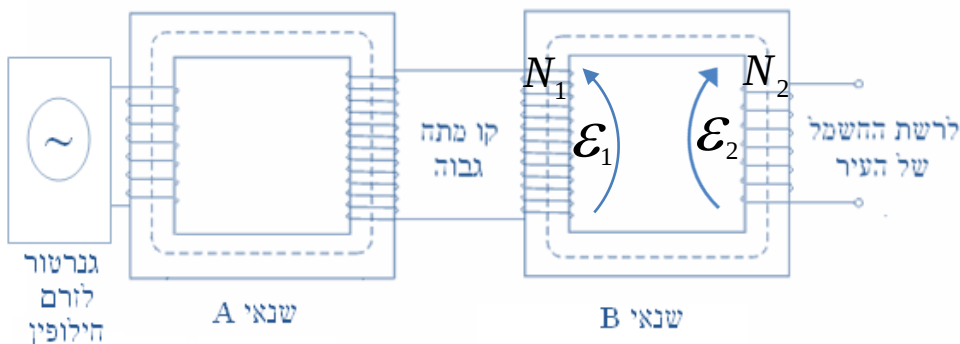
◀ כך ניתן להקטין את עלות שינוע האנרגיה באופן דרמטי.

הערה

תיאורטית ניתן להקטין את התנגדות שינוע האנרגיה ככל שנרצה. אבל אז נאלץ ליצור מתח גבוה מאד בתיילי ההולכה וזה עלול להיות מסוכן. לכן נקבעו תקנים מחמירים בכל מדינה ומדינה.

בשנים האחרונות החלו להטמין את תיילי ההולכה במעבה האדמה כתחליף ל"עמודי החשמל", מה שמאפשר ליצור מתחי הולכה גבוהים מאוד המוזילים משמעותית את שינוע האנרגיה.

הנחתת כא"מ בכניסה לאזור מיושב.



ראינו כי עלות שינוע החשמל באמצעות העלאת

מתח ההולכה ע"י שנאי - מוזלת משמעותית.

שינוע כזה מתאפשר, כאמור, רק בכא"מ חילופין.

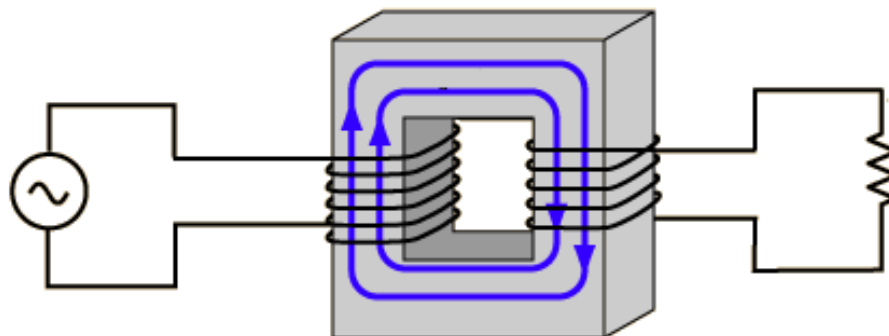
צידו השני של המטבע הוא גורם הסיכון של כא"מ גבוה.

לפיכך עלינו להקטין את הכא"מ באזורים מיושבים.

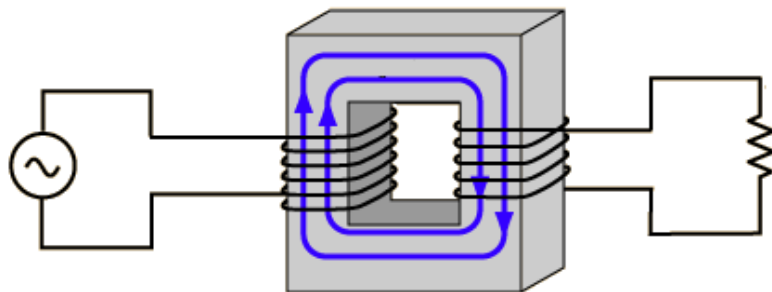
הנחתת הכא"מ נעשית באמצעות שנאי נוסף (שנאי B באיור). מספר הליפופים בסליל הראשוני של שנאי B

גדול כעת ממספר הליפופים בסליל המשני כך ש: $\mathcal{E}_2 = \frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1$, כלומר: $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1$.

בסליל ראשוני של שנאי יש 120 כריכות. הסליל מחובר למקור זרם חילופין, שתדירותו 50Hz והזרם בו הוא 0.6A. בסליל המשני יש 20 כריכות והכא"מ הנוצר בו הוא 12V.



- א. מצאו את הכא"מ של מקור המתח ε_1 .
- ב. מצאו את הזרם I_2 בסליל המשני.
- ג. מהו ההספק הממוצע הנצרך במעגל הראשוני.
- ד. מהו ההספק הממוצע ההופך לחום על הנגד במעגל המשני.
- ה. ציינו מספר סיבות בגללן ישנן הפסדי אנרגיה במעבר מהמעגל הראשוני למעגל המשני.



$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} = 12 \cdot \frac{120}{20} = 72V$$

א. הכא"מ של מקור המתח ε_1

ב. אם נניח כי כל האנרגיה החשמלית שהמעגל הראשוני מספק עוברת בלי הפסדים למעגל המשני נוכל

לרשום:

$$\varepsilon_1 \cdot I_1 = \varepsilon_2 \cdot I_2 \Rightarrow I_2 = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} = 0.6 \cdot \frac{120}{20} = 3.6A$$

ג. הספק הממוצע הנצרך במעגל הראשוני:

$$P_1 = \varepsilon_1 \cdot I_1 = 72 \cdot 0.6 = 43.2W$$

ד. מהו ההספק הממוצע ההופך לחום על הנגד במעגל המשני.

$$P_2 = \varepsilon_2 \cdot I_2 = 12 \cdot 3.6 = 43.2W$$

ה. הסיבות בגין ישנם הפסדי אנרגיה במעבר מהמעגל הראשוני למעגל המשני:

1. התחממות הליבה
2. התנגדות של הסלילים
3. לא כל השטף מועבר דרך הליבה. חלקו-דולף

תחנת כוח מייצרת חשמל בהספק של $2 \cdot 10^6 \text{ W}$. מהתחנה מעבירים את החשמל למרחק של 50km באמצעות כבל נחושת בעל חתך עגול שקוטרו 0.8cm. ההתנגדות הסגולית של הנחושת היא $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.
ענו על הסעיפים הבאים פעם כאשר משתמשים פעם במתח חילופין של 10000V ופעם במתח חילופין של 500000V. (מתחים אפקטיביים)

- א. מהי ההתנגדות הכוללת של תיל הנחושת?
- ב. מהו הזרם הזורם דרך תיל הנחושת?
- ג. מהו ההספק ההופך לחום בתיל הנחושת?
- ד. מהו אחוז האנרגיה ההולך לאיבוד.

א. ההתנגדות הכוללת של תיל הנחושת:

$$R = \frac{\rho \cdot \lambda}{A} = \frac{\rho \cdot \lambda}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{1.72 \cdot 10^{-8} \cdot 50000}{\frac{\pi \cdot (0.8 \cdot 10^{-2})^2}{4}} = 17.11 \Omega$$

עבור מתח של 10000V :

ב. הזרם הזורם דרך תיל הנחושת:

$$P = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{2 \cdot 10^6}{10000} = 200 A$$

ג. ההספק ההופך לחום בתיל הנחושת:

$$\Delta P = I^2 \cdot R = 200^2 \cdot 17.11 = 684400 W$$

ד. אחוז האנרגיה ההולך לאיבוד:

$$\frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{684400}{2 \cdot 10^6} \cdot 100 = 34\%$$

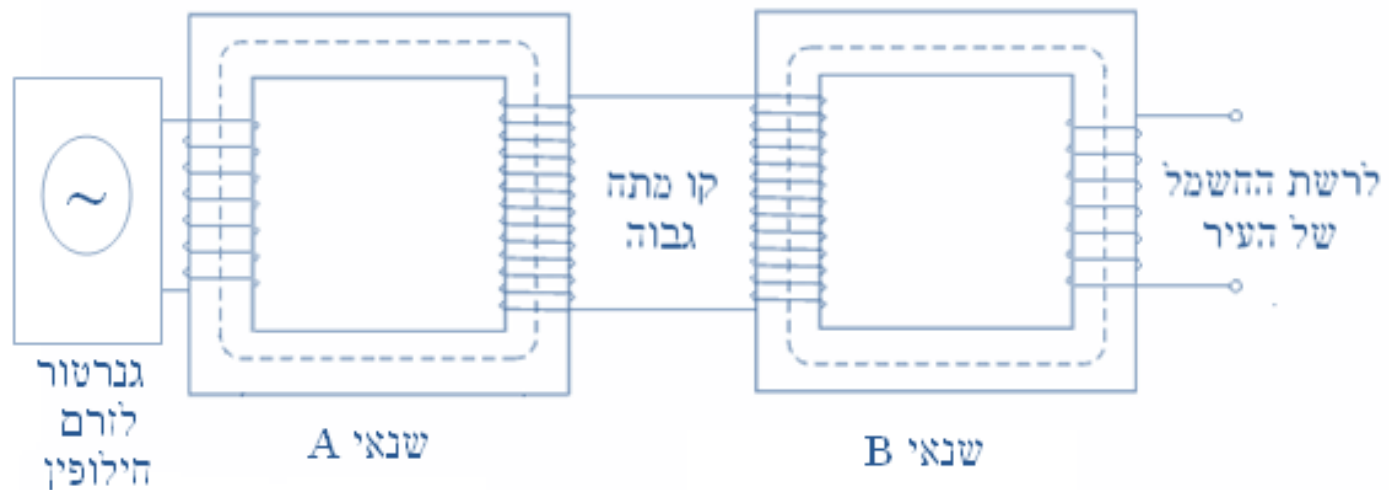
עבור מתח של 500000V :

$$P = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{2 \cdot 10^6}{500000} = 4 A$$

$$\Delta P = I^2 \cdot R = 4^2 \cdot 17.11 = 273.76 W$$

$$\frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{273.76}{2 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0.0137\%$$

גנרטור בתחנת כוח מייצר מתח חילופין, שערכו האפקטיבי הוא $20,000\text{ V}$, בהספק של $2 \cdot 10^6\text{ W}$.
הגנרטור מחובר לשנאי A, שמתח היציאה שלו מסופק לקו מתח גבוה. התנגדות קו המתח הגבוה היא 10Ω , וזרם בו זרם שערכו האפקטיבי הוא 40 A . בקרבת עיר מסוימת קו המתח הגבוה מחובר לשנאי B, שמתח היציאה שלו מתאים לרשת החשמל של העיר (ראה ציור).



- א. הסבר מהו עקרון פעולתו של גנרטור לזרם חילופין.
- ב. מהי משמעות המשפט " הערך האפקטיבי של מתח החילופין הוא $20,000\text{ V}$ "?
- ג. כיצד נוצר הזרם בסליל משני של שנאי?
- ד. חשב איזה אחוז מהוה האנרגיה, ה"אובדת" במשך שנייה בקו המתח הגבוה, מהאנרגיה המסופקת על-ידי הגנרטור במשך שנייה.

א. גנראטור לזרם חילופין יוצר כא"מ מושרה על ידי תנועה יחסית בין סליל לשדה מגנטי.

ב. המשמעות היא: ההספק המתפתח שווה להספק שהיה נוצר על-ידי מקור מתח ישר של 20000V.

ג. הזרם בסליל המשני של השנאי נוצר כתוצאה מכך שדרך הסליל הראשי עובר זרם משתנה

הגורם להיווצרות של שדה מגנטי משתנה. כתוצאה מכך, השטף המגנטי בסליל המשני משתנה ונוצר בו כא"מ מושרה הגורם לזרם משתנה.

ד. באמצעות השנאי מעלים את המתח בקצות קו המתח הגבוה.

כיוון שההספק קבוע, העלאת המתח גורמת להקטנת הזרם בקו המתח הגבוה.

בזרם נמוך אובדן האנרגיה החשמלית לחום (בגלל התנגדות חוטי הקו) הוא נמוך יותר וכך

קטנים הפסדי ההספק בקו המתח הגבוה.

ה. האנרגיה האובדת בשנייה בקו המתח הגבוה היא:

$$W_2 = p \cdot t$$

$$p_2 = I^2 \cdot R = 40^2 \cdot 10 = 16000W$$

$$W_2 = 16000 \cdot 1 = 16000J$$

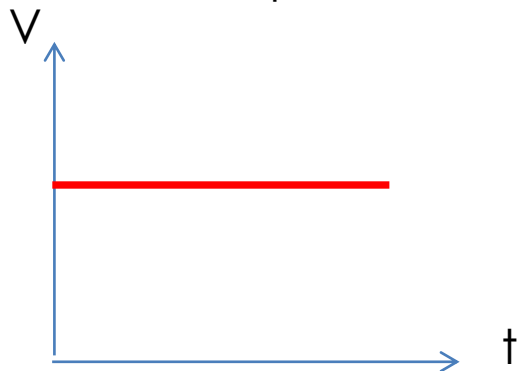
$$W_1 = P \cdot t = 2 \cdot 10^6 \cdot 1 = 2 \cdot 10^6 J \quad \text{לפי הנתון האנרגיה המסופקת בשנייה :}$$

$$\frac{W_2}{W_1} \cdot 100\% = \frac{16000}{2 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0.8\% \quad \text{השיעור באחוזים שאנרגיה זו מהווה מהאנרגיה המסופקת בשנייה:}$$

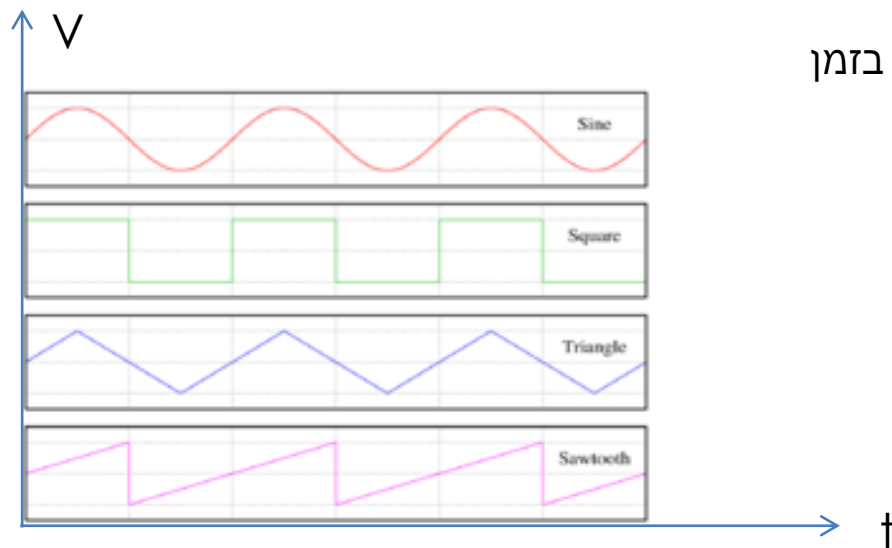
◀ שינוע אנרגיה חשמלית בזרם ישר וקבוע:

– **יתרון:** לא מצריך שינויי מתח בנקודות התמסורת שבין תחנות הכח לבין בתי הצרכנים. אדיסון ניסה להוכיח אמצעי שינוע זה מסוכן פחות מאמצעי השינוע בקווי המתח הגבוה.

– **חסרון:** שינוע אנרגיה בזבזני ויקר משמעותית מהשינוע בשיטת מתח החילופין.

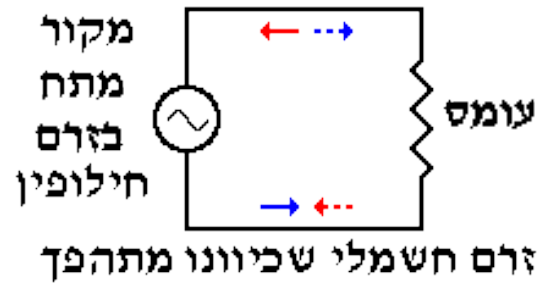


➤ מקור **מתח ישר** מספק מתח קבוע בעל קטביות אחידה :

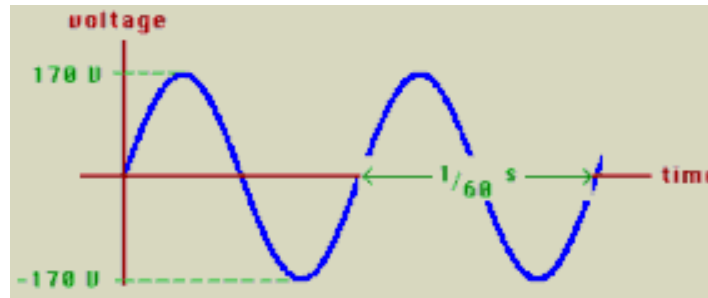


➤ מקור **מתח חילופין** מספק מתח משתנה בזמן כשהקטביות משתנה לסירוגין.

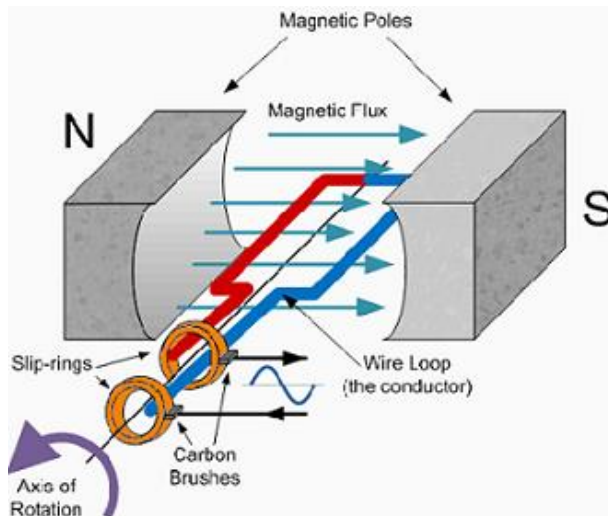
◀ סימון סכימטי של מקור מתח חילופין :



◀ מתח חילופין סינוסואידלי :



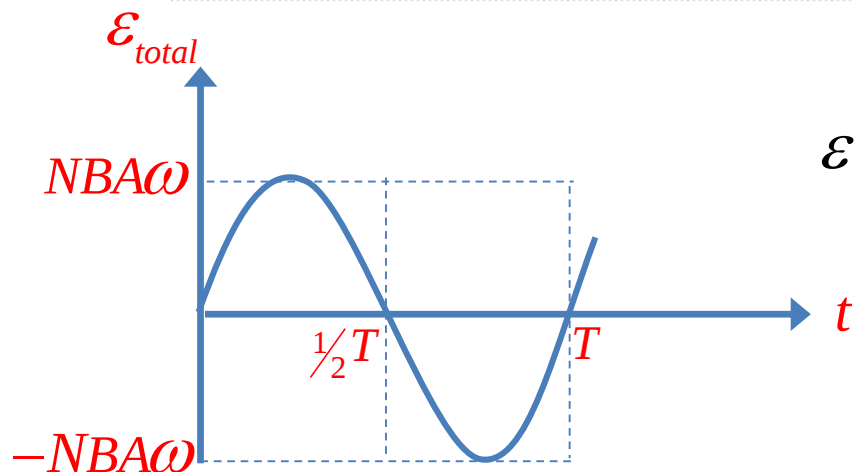
◀ מחולל גל סינוסואידלי (גנרטור) :



מחולל בסיסי של גל סינוס עשוי מכריכה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה ω (רוטור), בתוך שדה מגנטי אחיד $\vec{B}$ הנוצר בין שני קטבי מגנט (סטטור).

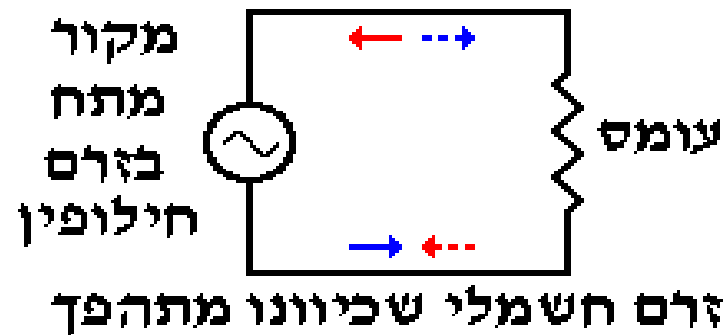
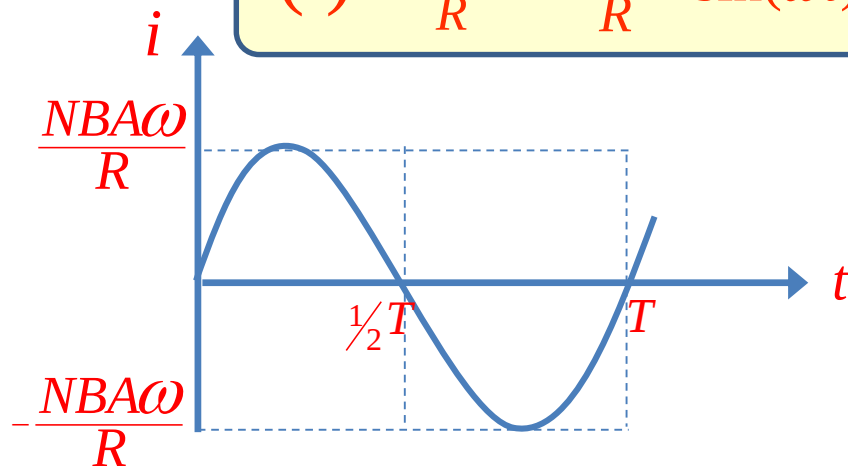
◀ הכא"מ המושרה ע"י מחולל גל סינוסואידלי :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} = \Rightarrow \boxed{\mathcal{E} = NBA\omega \sin(\omega t)}$$



◀ חיבור המחולל לנגד עומס (הזרם הזורם בנגד העומס :

$$\boxed{i(t) = \frac{\mathcal{E}(t)}{R} = \frac{NBA\omega}{R} \sin(\omega t)}$$



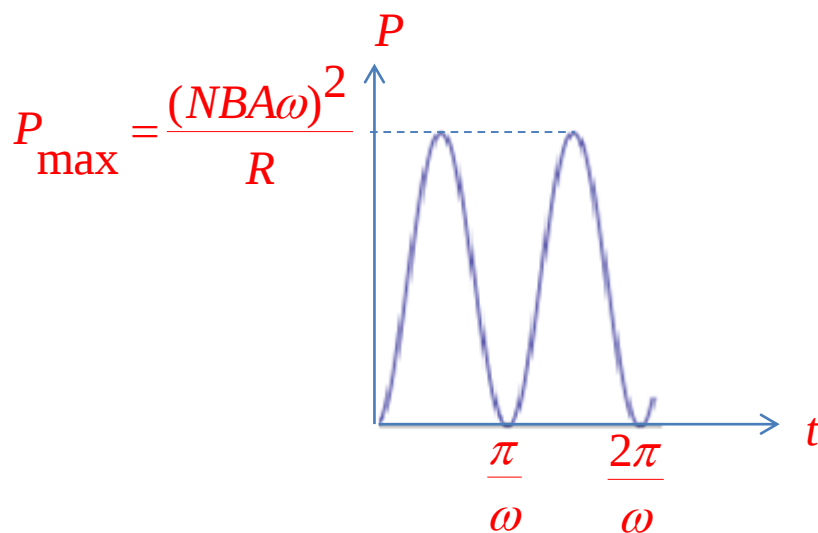
מויקפדיה

◀ כזכור - הספק הנמסר לנגד נתון על פי : $P_R = \frac{\varepsilon^2}{R}$.

◀ לפיכך ההספק הנמסר לנגד העומס ע"י מחולל זרם חילופין סינוסואידלי, הוא :

$$P_R = \frac{\varepsilon^2}{R} = \frac{(NBA\omega)^2}{142R43} \sin^2(\omega t) = \underbrace{P_{\max}}_{P_{\max}} \sin^2(\omega t)$$

◀ הגרף המתאר את ההספק הנמסר לנגד העומס:

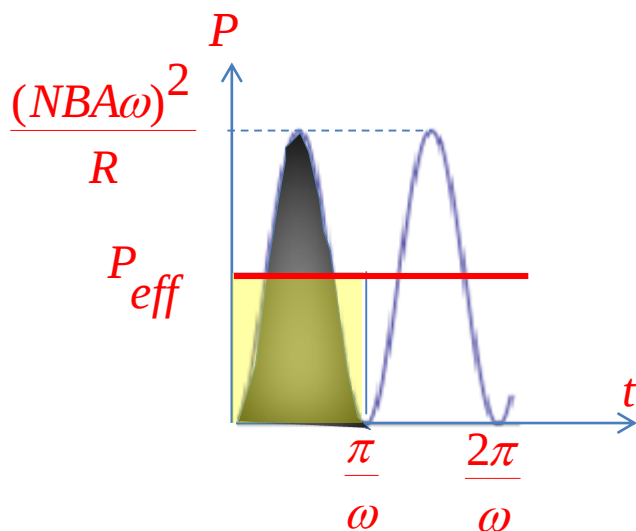


סיכום השעור-הספק אפקטיבי (הספק R.M.S)-הגדרה כללית.

◀ זהו הספק ממוצע עבור גל מחזורי. ההגדרה תתבסס על העבודה המתבצעת על נגד העומס במשך מחזור אחד של ההספק המשתנה.

הספק ממוצע זה נקרא הספק אפקטיבי : P_{eff} או הספק R.M.S : $P_{R.M.S}$ (ROOT MEAN SQUARE).

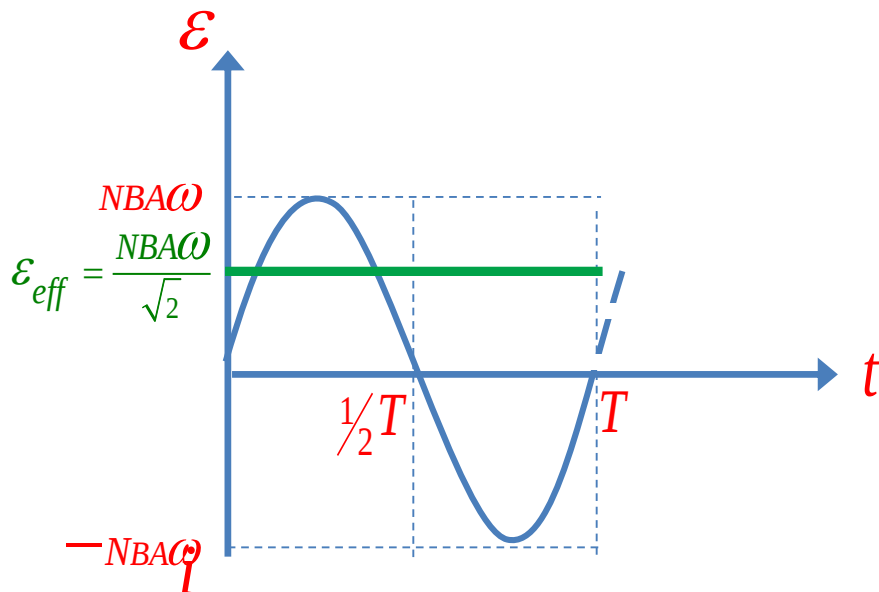
◀ ההספק האפקטיבי מוגדר כהספק קבוע אשר עבודתו על פני מחזור אחד של ההספק שווה לעבודת ההספק המקורי המשתנה.



◀ עבור מחולל גל סינוס :

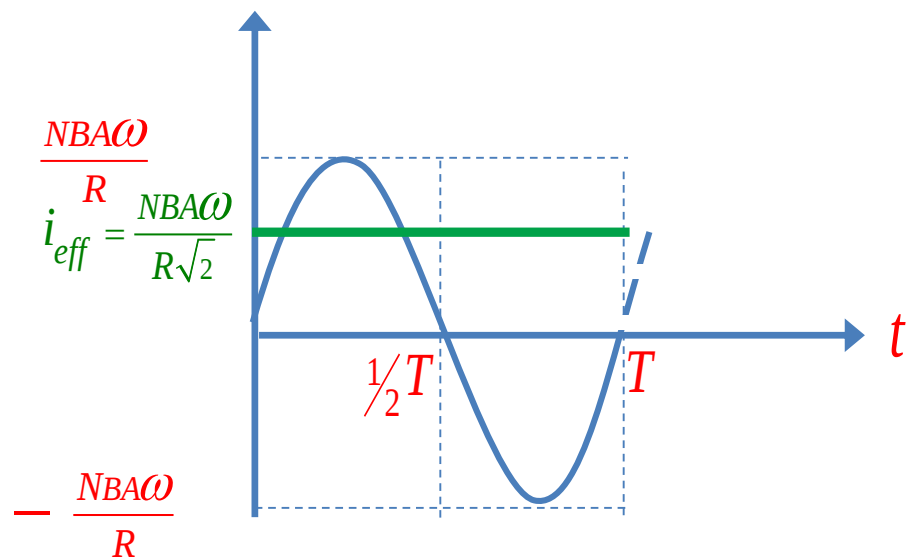
$$P_{eff} = \frac{1}{2} P_{max} = \frac{(NBA\omega)^2}{2R}$$

◀ הכא"מ האפקטיבי :



$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{NBA\omega}{\sqrt{2}}$$

◀ הזרם האפקטיבי :

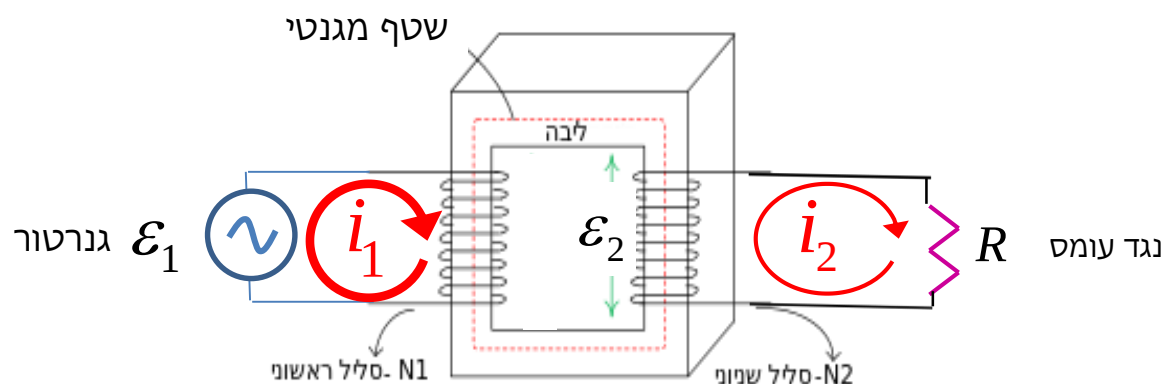


$$i_{eff} = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{NBA\omega}{R\sqrt{2}}$$

◀ השנאי הינו מכשיר המעביר אנרגיה אלקטרומגנטית ממעגל חשמלי אחד למשנהו (ראו איור).

הסליל השמאלי נקרא סליל ראשוני והא בעל N_1 כריכות והימני-סליל משני והוא בעל N_2 כריכות.

הגנרטור יוצר כ"מ מושרה $\mathcal{E}_1$ בסליל הראשוני. הסליל הראשוני, בו זורם זרם $\dot{i}_1$ המשתנה בזמן-יוצר שטף מגנטי שאף הוא משתנה בזמן. שטף זה מועבר ע"י ליבת ברזל אל הסליל המשני. ליבת הברזל כמעט ואינה מאפשרת שפייה של קווי שדה כך שהשטף מועבר במלואו אל הסליל המשני.



$$k = \frac{\dot{i}_2}{\dot{i}_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$$

◀ יחס השנאה :

◀ התנגדות אפקטיבית לגנרטור :

$$R_{eff} = R \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

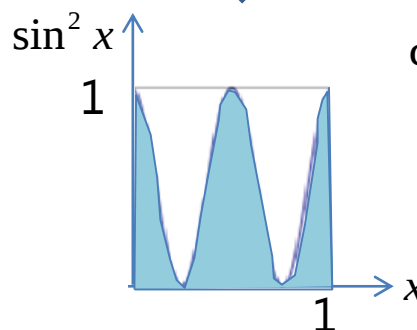
◀ נוכיח כי : $\int_0^1 \sin^2 x dx = \frac{1}{2}$ (ראו שקופית 12).

הוכחה :

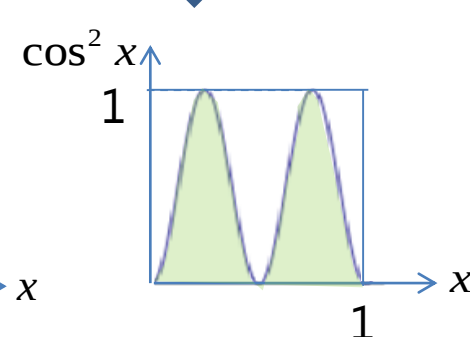
$$\int_0^1 (\sin^2 x + \cos^2 x) dx = \int_0^1 dx = [x]_0^1 = 1 \quad .1$$

$$\int_0^1 (\sin^2 x + \cos^2 x) dx = \int_0^1 \sin^2 x dx + \int_0^1 \cos^2 x dx = 1 \quad .2$$

ה"שטח" הכחול



ה"שטח" הירוק



ה"שטח" הכחול שווה ל"שטח" הירוק.
כלומר:

$$\int_0^1 \sin^2 x dx = \int_0^1 \cos^2 x dx$$

ומאחר וסכום ה"שטחים" הוא 1 אזי ערכו של כל אחד מה"שטחים" הוא : $\frac{1}{2}$.
מ.ש.ל.