

תכנון רכיבים מגנטיים

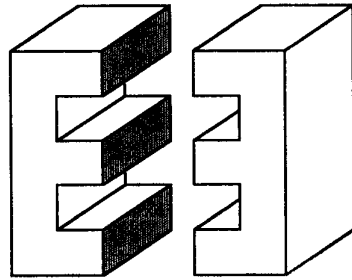
נדון עתה ברכיבים מגנטיים שונים כגון :

1. T שנאי Transformer
2. L סליל inductor
3. שנאי זרם Current Transformer

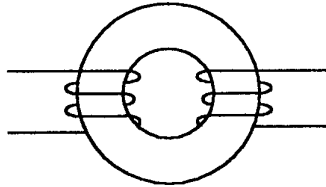
אנו נתעניין בפרק זה במבנה הפיסי והמגנטי של הרכיבים ונתאימם לצרכים שלנו.

1. שנאי

שנאי זהו גוף פריטי שסביבו מלפפים ליפופים בד"כ של חוט חשמלי מבודד. ישנם צורות שונות של גופי שנאים להלן אחדים מן הצורות

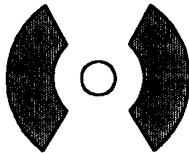


.2



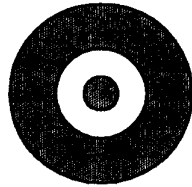
TOROID

.3



ARENCO

.4

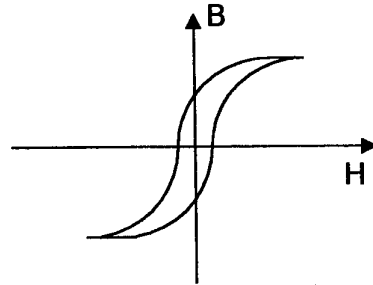


POT

ישנם מס' דברים שמעניינים אותנו כאשר אנו דנים ברכיבים מגנטיים בכלל ובשנאים בפרט.

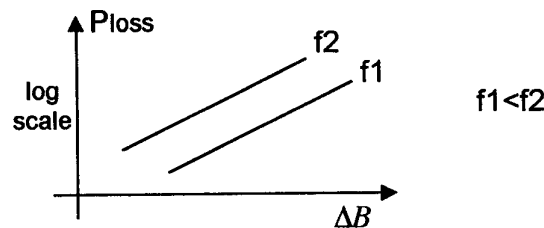
1. B_{max} - צפיפות השטף המקסימלית המותרת בחומר
 2. הפסדים כפונקציה של ΔB Losses(ΔB)
 3. A_c - שטח מגנטי אפקטיבי
 4. L_p - אורך מגנטי
- עלינו לקחת את כל הגורמים הללו כאשר אנו מתכננים שנאי, אשר בד"כ יעבוד עם כניסה של גל מרובע ולכן עלינו לתכננו בהתאם.

נתון לנו הגל המרובע שברצוננו להעביר דרך השנאי, ועלינו לתכנן שנאי שיפעל בצורה תקינה ולא יתחמם. החימום של השנאי נובע גם מחימום החוטטים וגם מחימום הגוף המגנטי.



ההפסדים בגוף המגנטי נתונים ע"י עקומת ההיסטרזיס וכאשר אנו עובדים בתדר גבוה (בד"כ עובדים בתדרים גבוהים) ההפסדים אינם זניחים.

ישנם יצרנים הנוהגים לתת גרף של ההפסדים בלות בתדר



נהוג לתת לפעמים את הנוסחה הבאה

$$P = \Delta B^n f_{ik}^m$$

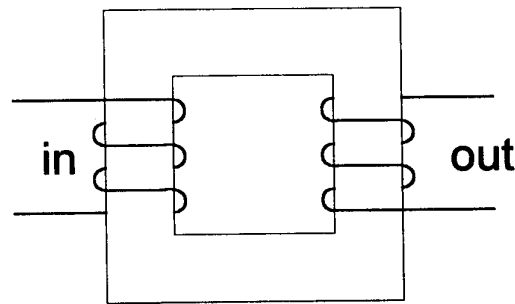
בד"כ אנו דורשים מן השנאי להתחמם עד לטמפי מסוימת, אנו בודקים זאת ע"י נקי חמה (באמצע השנאי) ועבורה נדרוש להיות בגבולות מסוימים.

נבצע כעת חישובים תרמיים עבור שנאי, נניח כי דרך שנאי זורם i וואטים ונרצה לדעת את השינוי בטמפי של השנאי.

ידוע לנו צפיפות הזרם שניתן להזרים במוליך (ככל שצפיפות הזרם יותר גדולה, המוליך יתחמם יותר)

$$\text{ערך אופייני לצפיפות זרם} \quad 4 - 5 \frac{A}{mm^2}$$

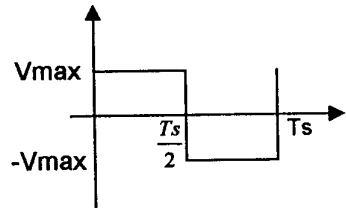
פתרון



$$V = n_1 \frac{d\phi}{dt}$$

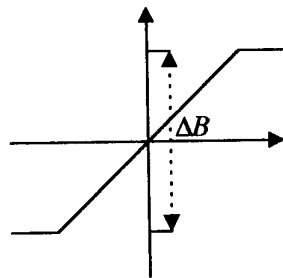
$$V = n_1 A_e \frac{dB}{dt}$$

מפני שהנחנו כי הכניסה לשנאי היא גל מרובע אזי אם נסתכל על העקום B-H אנו בעצם עולים ויורדים על העקום. אם נניח כי הגל המרובע הוא :



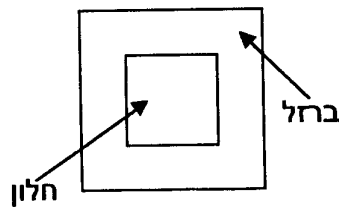
אזי

$$V_{\max} = n_1 A_e \frac{\Delta B}{T_s/2}$$



ניתן לראות כי חצי מחזור עולים וחצי מחזור יורדים (בתנאי $D=0.5$) ולכן

$$V_{\max} = n_1 \cdot A_e \cdot \Delta B \cdot f \cdot 2$$



Ac - שטח חתך של הברזל
Aw - שטח החלון

נניח וצריכים ללפף n_1 ליפופים בראשוני ו n_2 במשני. שטח החלון הדרוש עבור n_1 ליפופים של הראשוני $n_1 \cdot A_R$
Ar - שטח חתך של החוט (הוא תלוי בזרם הדרוש ובסוג החוט).

$$A_R = \frac{I_1}{J} K^{-1}$$

J - צפיפות הזרם המותרת בחוט ליחידת שטח

K=0.5÷0.7 - גורם המילוי (לוקח בחשבון את עובי החוטים סוגם, ובעיקרון מחשב את בזוז המקום כאשר שמים את החוטים יחד)

לכן השטח הדרוש עבור n1 הוא

$$A_{w1} = n_1 A_R = n_1 \frac{I_1}{J} K^{-1}$$

עבור n2 המצב דומה כלומר

$$A_{w2} = n_2 \frac{I_2}{J} K^{-1}$$

אם נציב את היחס

$$n_2 \cdot I_2 = n_1 \cdot I_1$$

ונחבר את השטחים נקבל

$$Aw = 2 \frac{1}{K} n_1 \frac{I_1}{J}$$

$$n_1 = \frac{Aw \cdot J \cdot K}{2I_1}$$

נציב n1 ב Vmax ונקבל

$$Vm \cdot I_1 = Ac \cdot Aw \cdot K \cdot J \cdot \Delta B \cdot f = P$$

ונסמן

$$Ap = Ac \cdot Aw$$

ומכאן

$$Ap = \frac{P}{K \cdot J \cdot f \cdot \Delta B}$$

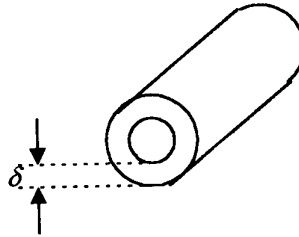
וV=VmI1 - הספק דרך השנאי

כלומר, אם ידועים הפרמטרים הדרושים עבור שנאי ניתן לחפש שנאי בעל Ap מתאים.

• ניתן לראות כי ככל שהתדר גדל ממדי השנאי קטנים.

Skin Effect

נניח וישנו מוליך

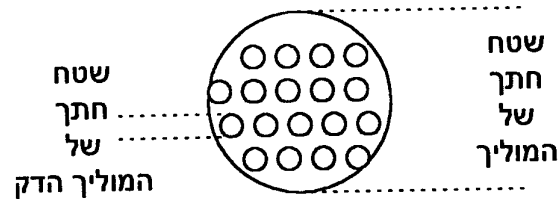


כאשר זורם זרם, בתדר גבוהה, במוליך הזרם אינו זורם בכל המוליך אלא רק בדפנות כאשר עובי הדופן מחושב ע"י

$$\delta = \frac{0.2mm}{\sqrt{f}}$$

f - ביחידות של MHz

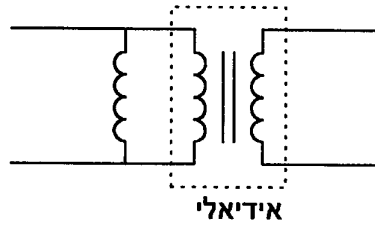
מפני שככל שהתדר עולה השטח המנוצל של המוליך קטן, המוליכים מתחממים מאוד. ע"מ לפתור בעיה זו נשתמש בחוט הבנוי מהרבה חוטים דקים, מבודדים זה מזה ומחוברים במקביל



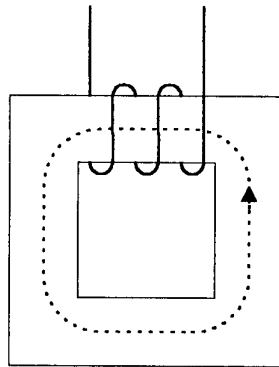
וע"י כך נקטין את תופעת ה Skin Effect עובי החוטים הקטנים יהיה 2δ , חוט כזה נחוץ בתדרים שגדולים מ 50MHz חוט כזה נקרא Litza, החסרון בחוט מסוג זה היא שהוא מקטין את K ולכן צריך גוף מגנטי גדול יותר.

סליל

בשנאי הזרם במשני מאוזן דרך הזרם בראשוני (הם מבטלים אחד את השני), בשנאי מעשי ישנו עוד זרם שעורי, מהמגנט של השנאי.
לכן סכמת התמורה של השנאי מעשי היא :

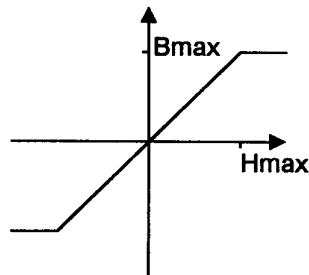


הזרם בשנאי אינו גורם למגנט אלא המתח.
בסליל הדבר שונה משום שישנו זרם אחד שממגנט את הגוף המגנטי



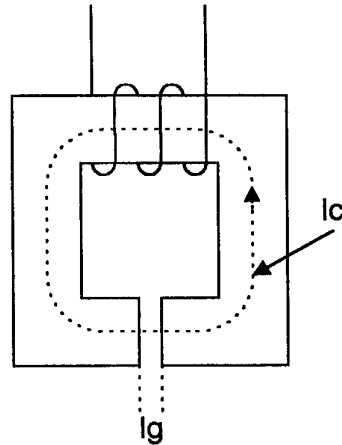
$$H = \frac{nI}{lc}$$

ועלינו לדרוש בסליל ש H יהיה גבוה מאוד.
כמובן שעלינו לקחת בחשבון שלכל חומר יש Bmax שמעברו הברזל נכנס לרוויה עבור B שגדול מ Bmax.



ע"מ להגדיל את Hmax עלינו להקטין את השיפוע μ וע"י כך להגיע ל Hmax גדול יותר מבלי להיכנס לרוויה.

כדי להקטין את μ מכניסים חריץ אויר בשנאי



מניחים כי $lg \ll lc$

ע"מ למצוא את ה μ החדש נניח כי B נשאר כמעט אותו הדבר (זה נכון בתנאי שחריץ האוויר קטן)

$$\oint H \cdot dl = Hg \cdot lg + Hc \cdot lc = nI$$

ולכן

$$nI = \frac{B \cdot lg}{\mu g} + \frac{B \cdot lc}{\mu c}$$

כלומר

$$B = \frac{nI}{\frac{lg}{\mu g} + \frac{lc}{\mu c}}$$

נסמן

$$\mu e = \frac{lc}{\frac{lc}{\mu c} + \frac{lg}{\mu g}}$$

ונקבל ש

$$B = \mu e \frac{nI}{lc}$$

אם מתקיים

$$\frac{lc}{\mu c} < \frac{lg}{\mu g}$$

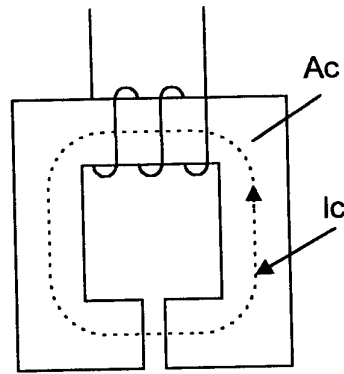
אז מקבלים

$$\mu e = \frac{lc}{lg} \mu g = \mu c \frac{lc}{\mu g}$$

ולכן במערך זה ניתן לשלוט על μe , אם משנים את lg . דרך נוספת להורדת ה μ , היא לייצר חומר פריטי המעורב עם חול וע"י כך להוריד את μ .

* הכנסת חריץ אויר גורמת ל μ לרדת וע"י כך ניתן להזרים זרמים גדולים יותר בסליל מבלי להיכנס לרוויה.

השיקולים לתכנון סליל



ידוע כי

$$V = n \frac{d\Phi}{dt} = n \frac{d(BA_c)}{dt}$$

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

נחלק את המשוואות ונקבל

$$n = \frac{LI}{BA_e}$$

כלומר עבור I_{pk} מסוים נקבל B_{max} מסוים

$$n = \frac{L \cdot I_{pk}}{B_{max} \cdot A_e}$$

כלומר ניתן לשנות את A_e ו n כך שהסליל לא יכנס לרוויה. נבטא כעת את A_e כפונקציה של החלון. החימום של החוט נעשה ע"י זרם rms ולכן

$$A_w = \frac{n I_{RMS}}{J} K^{-1}$$

ומכאן ש

$$\frac{A_w JK}{I_{RMS}} = \frac{L I_{pk}}{B A_e}$$

כלומר

$$A_p = \frac{L \cdot I_{pk} \cdot I_{RMS}}{B_{MAX} JK}$$

אם $I_{pk} = I_{rms}$ (זרם DC) אזי A_p יחסי לאנרגיה האגורה בגרעין. הגודל $L I_{pk} I_{rms}$ אם כך הוא כמעט האנרגיה האגורה בגרעין, והוא פרופורציוני ל A_p , אם מרשים J גדול אזי A_p יכול להיות קטן.

דוגמא

נניח שצריכים סליל בעל $L=15\mu H$ עם זרם $50A$ dc נחשב את A_p

$$A_p = \frac{15 \cdot 10^{-6} \cdot 50^2}{0.3 \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 0.5} = 6.25 \cdot 10^{-8} m^4$$

אם נניח ש A_w ו A_e באותו מימד

$$A_p \approx 15.8m = 1.5cm$$

נציב ב

$$nI = \frac{Bl}{\mu}$$

את

$$n = \frac{LI}{B_{max} A_e}$$

ונקבל

$$A_e \cdot l_e = \frac{LIpk^2}{B_{max}^2 \mu}$$

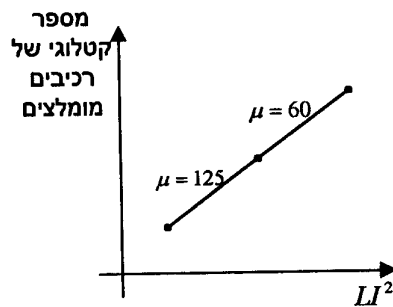
כלומר לסיכום ע"מ לבחור סליל מתאים עלינו לדעת את ה μ, L, B_{max}, I_{pk} וע"י הנוסחה $A_e \cdot l_e$ נחשב את נפח הפריט

ומהנוסחה

$$n = \frac{LI}{BA_e}$$

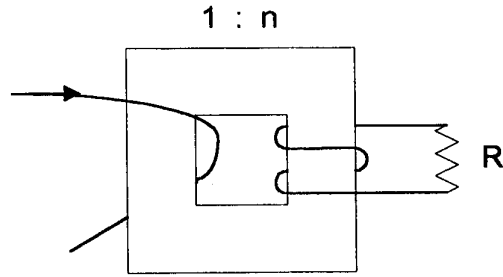
נחשב את מסי הליפופים ונבדוק האם זה נכנס בחלון או לחילופין ניתן לחשב את A_w ורק לאחר מכן למצוא מסי ליפופים מתאים.

כאשר האנרגיות עולות אנו נאלצים לקחת μ יותר קטן כי I_{pk}^2 נעשה קטן מאוד. בקטלוגים ישנו עקום



מכאן מוצאים את הגוף ולאחר מכן מחשבים את הפרמטרים.

שנאי זרם



למרות שיש ליפוף אחד בראשוני הגוף מתנהג כשנאי, לכן נוכל למדוד את המתח על הנגד R ולפי התנאי

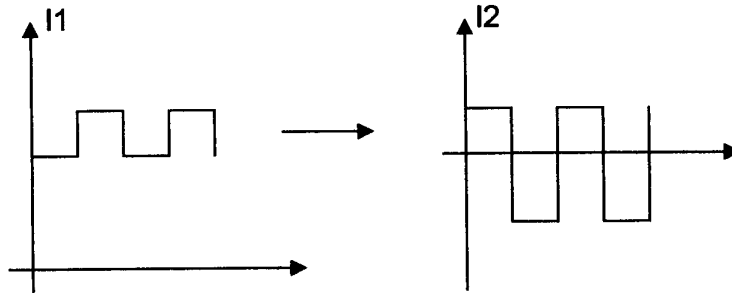
$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

נקבל כי

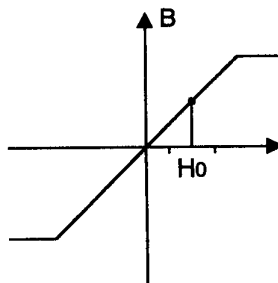
$$I_1 = \frac{N_2 I_2}{R}$$

ועי"י כך נוכל לחשב את הזרם I_1 , את הדבר הזה ניתן לעשות רק במקרה והזרמים I_1 ו I_2 הם זרמי ac או זרמי ac שרוכבים על DC.

במקרה וישנו זרם ac שרוכב על DC מה שיעבור דרך השנאי יהיה רק זרם ה ac כלומר



דרישה נוספת מהזרם צריכה להיות, שזרם ה DC לא יכניס לרוויה את השנאי כלומר שנעבוד סביב H_0 מסוים כך שזרם ה ac לא יכניס לרוויה את השנאי



$$\oint H \cdot dl = nI$$

$$H \cdot le = 1 \cdot I$$

$$H = \frac{I}{le}$$

כלומר צריך לבדוק אם הברזל לא נכנס לרוויה ע"י הנוסחה

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{le} < B_{max}$$

עבור $H \approx 10 \frac{1}{m}$ החומר לא יכנס לרוויה.

ועבור $H \approx 100 \frac{1}{m}$ החומר יכנס לרוויה.

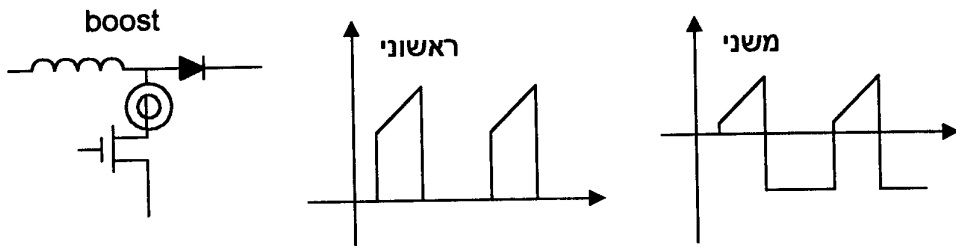
תכנון גוף מגנטי כזה דומה מאוד לתכנון גוף של שנאי רגיל כלומר לפי הנוסחה

$$n = \frac{VT}{BA}$$

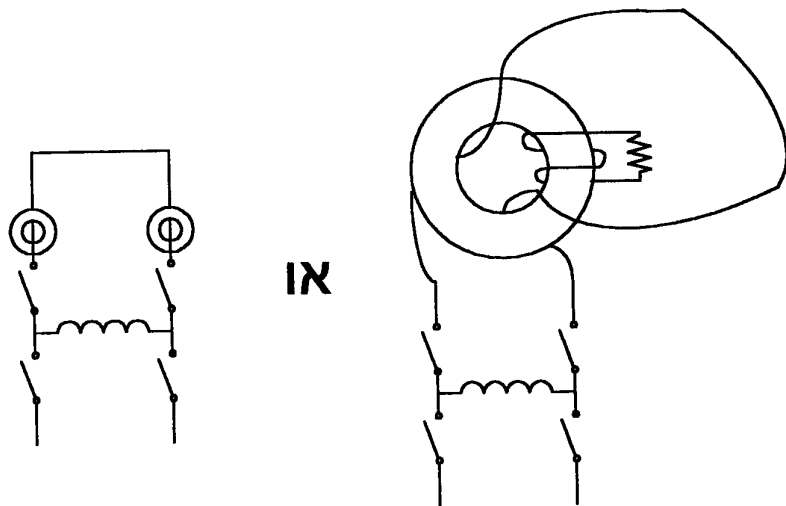
עלינו לזכור כי הנגד R צריך להיות קטן משום שעליו להעביר זרמים גדולים. במקרה ו R גדול יתפתח עליו מתח גדול, שיכול להכניס את השנאי לרוויה.

דוגמאות לחישוב זרם ע"י שנאי זרם

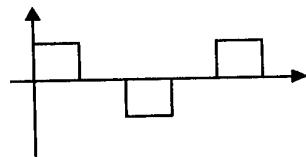
.1



.2

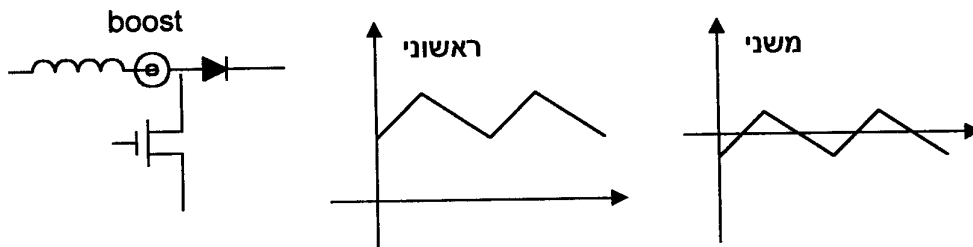


המתח בנגד R הוא

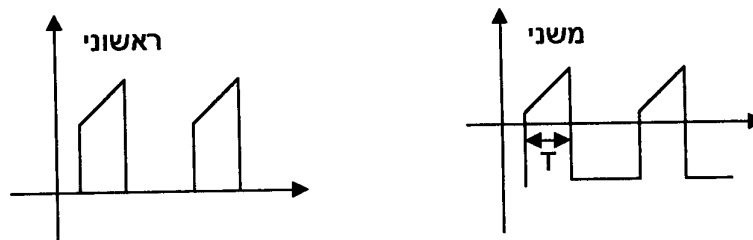


הממוצע בכל המעגלים שמודדים עיני שני זרם יהיה אפס (במקרה ועובדים בצורה תקינה)

נניח כעת כי אנו רוצים למצוא את הזרם דרך הסליל ב Boost

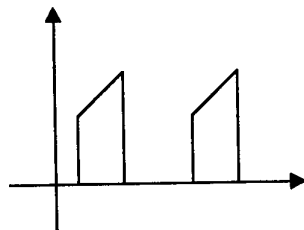


ולכן נקבל מתח שהוא לא מתח אמיתי (נקבל מתח ללא ה DC) אבל אם נשים 2 שני זרם אחד בדיודה ואחד במתג אזי נקבל

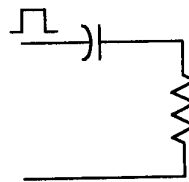


ומתוך זה ניתן לשחזר את רמת ה DC משום שיש לנו את זמן העלייה ועיי חיבור של הזרם דרך הדיודה ודרך המתג נקבל את הזרם דרך הסליל בצורה מלאה

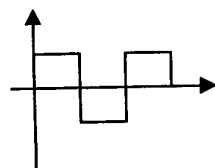
אם לוקחים גוף מגנטי ומעבירים דרכו פולס מהצורה



בפעם הראשונה שנעביר את הפולס הוא יעבור במלואו דבר זה אקוויולנטי למערכת

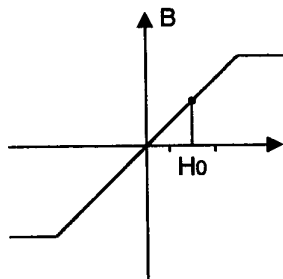


הקבל נטען למתח dc ואז על הנגד נראה את המתח

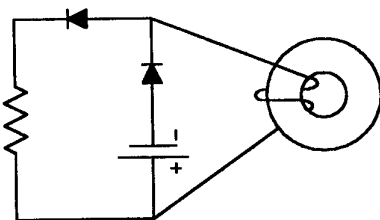


אבל אם נצליח לקצר את הקבל בדיוק לאחר שהפולס הראשון יעבור, נצליח לראות את המתח בגודלו האמיתי.

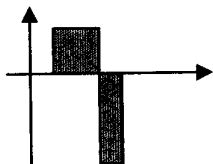
נחזור לגוף המגנטי, לפי עקום ההיסטרזיס



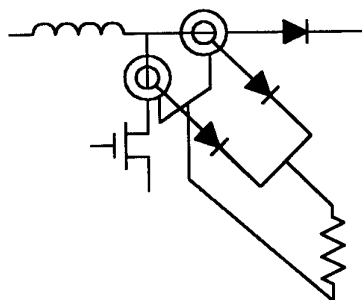
רוצים לעבוד סביב נקודת עבודה זו.



אם נשים רק את D1 אזי בפולס הראשון הכל יעבוד בסדר, עכשיו נרצה להפסיק את הזרם עי"י הדיודה. ללא הדיודה הזרם היה אמור להראות כך :

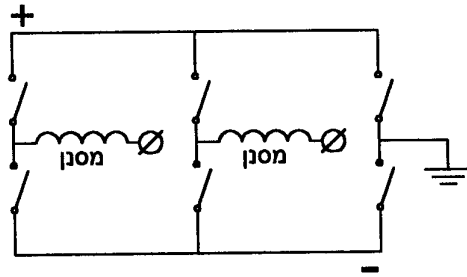


ניתן להבין זאת עי"י ההשראות מגנוט של השנאי (מפני שהוא לא אידיאלי). לכן הזרם שנאגר בשנאי המעשי גורם לכך שהזרם רוצה להמשיך לזרום אך אין לו לאן, לכן חיברנו את מקור המתח ואת הדיודה D2 הזרם יזרום דרך הדיודה עד שיגיע לאפס.

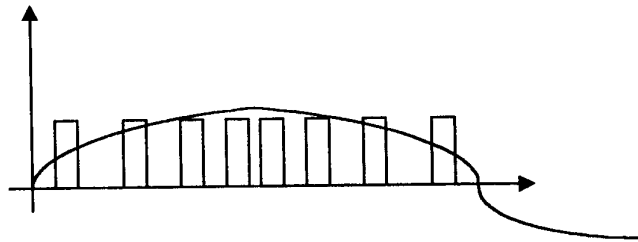


ועי"י כך נשיג את זרם I_L במלואו (עם רמת ה DC). ניתן לשים במקום מקור מתח ודיודה נגד, אלא שנגד גדול מידי יפתח מתח גדול שיכול לפרוץ את הדיודות, ונגד קטן מידי יגרום לקבוע זמן קטן במעגל R-L ולכן הזרם יתאפס לאט.

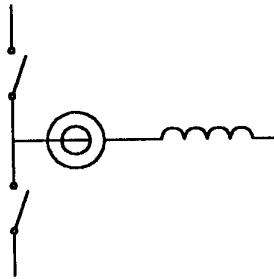
נניח וישנו Inverter



המתגים עובדים לסירוגין או העליון או התחתון.
אם נפעיל את המתגים כך



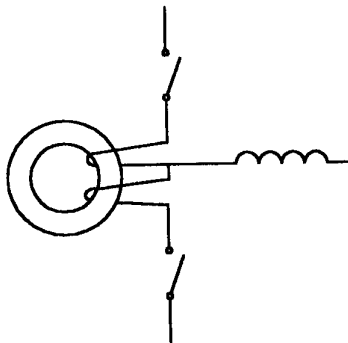
Inverter זוהי מערכת שלוקחת מתח dc ומעבירה ל ac, המסננים מסננים את הסינוס מתוך הפולסים.
ע"מ למדוד זרם בפאזה ניתן לשים שנאי זרם



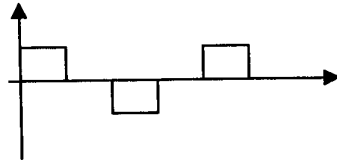
אם נעשה זאת נצטרך להשתמש בשנאי גדול מאוד וזאת משום שהתדר של הסינוס מאוד נמוך, מתוך הנוסחה

$$n = \left(\frac{BA}{VT} \right)^{-1}$$

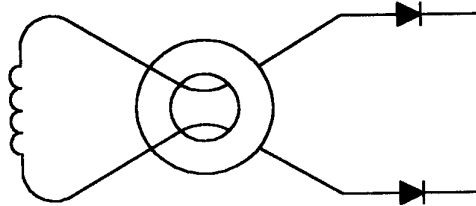
רואים כי ככל ש f גדל T קטן ו n גדל. לכן נבצע את המדידה בצורה הבאה



ולכן המתח שיתקבל הוא



ניתן לבצע את המדידה גם בצורה הבאה



לסיכום

שנאי זרם הוא שנאי לכל דבר, ומתייחסים אליו כשנאי, חשוב לשים לב למתח המתפתח על הנגד משום שהמתח הזה גורם למגנוט השנאי.
ניתן לתכנן את שנאי הזרם למדוד זרם ac, ובטכניקות מסוימות גם זרם DC.