ממירי מתח ממותגים
התקנים מגנטיים

בהרצאה זו נדון בניתוח ותכנון של התקנים מגנטיים. בפרט נתמקד בתכנון של סלילים ושנאים.

מדוע התקנים מגנטיים?

כאשר מתכננים מערכות להמרת אנרגיה חשמלית בהספקים גבוהים, פעמים רבות משתמשים בהתקנים מגנטיים, דהיינו התקנים שבהם רוב האנרגיה אגורה בשדה מגנטי (ולא בשדה חשמלי). לדוגמא:

סליל המשמש בממיר ממותג	מנוע חשמלי

הסיבה לכך היא שבאופן מעשי בהתקנים רבים <u>שדה מגנטי יכול לאגור אנרגיה גבוהה יותר משדה חשמלי</u>.

באוויר שדה חשמלי מוגבל לערך של $|E| \approx 3\cdot 10^6\ \text{V/m}$. שדות גבוהים יותר מובילים לפריצה של האוויר, וגורמים לקשת חשמלית (או ברק). לעומת זאת שדות מגנטיים אינם מוגבלים ע"י אילוץ זה, ויכולים להגיע לערכים גבוהים מאוד.

לדוגמא, נניח התקן בעל נפח של $1\,\text{m}^3$.

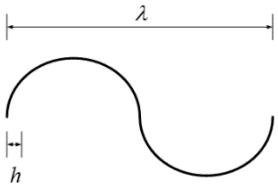
- אם ההתקן מכיל שדה חשמלי אחיד של $|E| \approx 3\cdot 10^6\ \text{V/m}$ (באוויר), האנרגיה האגורה בהתקן היא בערך $40\ \text{J}$.
- לעומת זאת התקנים מגנטיים פרקטיים יכולים לאגור אנרגיה של יותר מ - $10\ \text{MJ}$ בנפח זה.

כלומר, בדוגמא זו האנרגיה האגורה בשדה מגנטי גדולה לפחות פי 250,000 מהאנרגיה האגורה בשדה חשמלי.

ניתוח התקנים מגנטיים

התקנים מגנטיים עובדים במשטר מגנטו-קוואזי-סטטי. נזכיר שהתנאים לעבודה במשטר זה הם:

- ממדי ההתקן קטנים בהרבה מאורך הגל האופייני:



$$h \ll \lambda = \frac{c}{f}$$

- האנרגיה האגורה בשדה מגנטי דומיננטית:

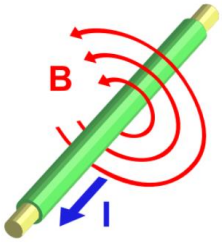
$$\underbrace{\frac{1}{2}E \cdot D}_{\substack{\text{electric}\\ \text{energy}\\ \text{density}}} \ll \underbrace{\frac{1}{2}H \cdot B}_{\substack{\text{magnetic}\\ \text{energy}\\ \text{density}}}$$

במשטר עבודה זה משוואות מקסוול החשובות הן:

חוק אמפר

$$\oint H \cdot dl = i(t)$$

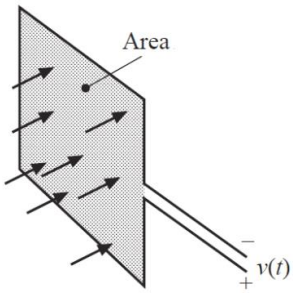
אינטגרל של השדה המגנטי לאורך מסלול סגור שווה לזרם דרך המשטח.



חוק פאראדיי

$$v(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}\iint B \cdot da$$

שינוי בזמן של שטף מגנטי בלולאה משרה מתח חשמלי.

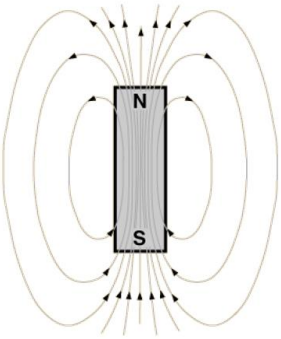


אין מקורות מגנטיים

(זהו חוק גאוס למגנטיות)

$$\oiint B \cdot da = 0$$

סה"כ השטף המגנטי הנכנס למשטח סגור הוא אפס.



נזכיר את משמעות הגדלים השונים, ואת היחידות שלהם:

	משמעות	יחידות
H	שדה מגנטי	$\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$ Amperes per meter
B	צפיפות השטף המגנטי (שטף מגנטי ליחידת שטח)	$\mathrm{T}=\frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}$ Tesla, or Volt-sec per square meter
$\Phi=\iint B\cdot da$	השטף המגנטי	$\mathrm{V}\cdot\mathrm{s}$ Volt-sec

בנוסף, בחומרים מגנטיים <u>ליניאריים</u> מתקיים הקשר

$$B=\mu H=\mu_r\mu_0 H \qquad (1)$$

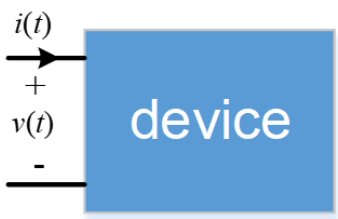
כאשר μ הוא <u>הפרמאביליות</u> של החומר המגנטי, μ_r הוא הפרמאביליות היחסית, ו - μ_0 הוא הפרמאביליות של הריק:

$$\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{s}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}} \qquad \text{(permeability of free space)} \qquad (2)$$

בחומרים מגנטיים טיפוסיים μ_r הוא בטווח 10^2 - 10^6.

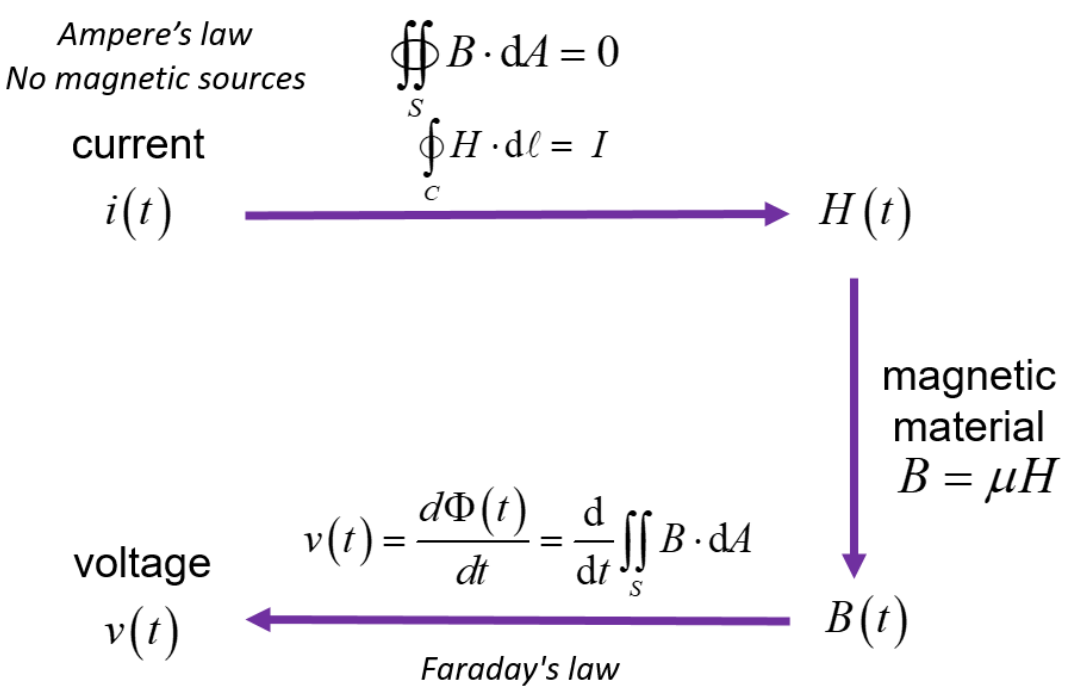
כיצד מנתחים התקנים מגנטיים?

נתבונן בהתקן כללי שהוא מגנטו-קוואזי-סטטי:



המתח והזרם בכניסה להתקן הם $v(t)$ ו - $i(t)$.

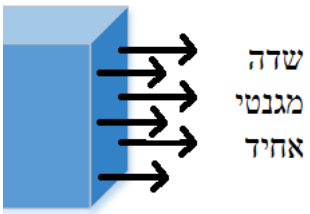
שיטת ניתוח כללית שמאפשרת לנסח את הקשר בין המתח לזרם מוצגת בדיאגרמה הבאה:



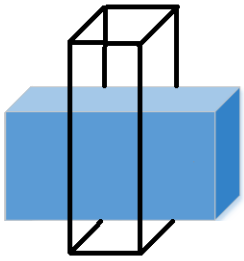
הניתוח מתבצע במספר שלבים:

- הניחו כי נתון הזרם בכניסה להתקן $i(t)$.
- השתמשו בחוק אמפר ובעובדה שאין מקורות מגנטיים על מנת לחשב את השדה המגנטי $H(t)$ (מיד נראה כיצד עושים זאת).
- השתמשו בקשר $B = \mu H$ על מנת לחשב את צפיפות השטף המגנטי $B(t)$.
- השתמשו בחוק פאראדיי על מנת לחשב את המתח בכניסה להתקן $v(t)$.

נתבונן כעת בהתקן מגנטי כללי המורכב מ"תיבות" (ראה איורים בהמשך). נניח בקירוב שאין שדה מגנטי במרחב מחוץ לתיבה, ובנוסף נניח שהשדה המגנטי מפולג אחיד לאורך חתך של התיבה:



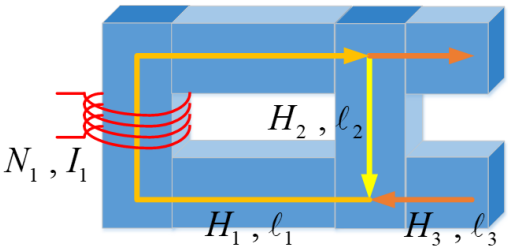
כעת נתבונן במשטח סגור מהצורה הבאה:



מכיוון שאין מקורות מגנטיים, השטף המגנטי הנכנס למשטח שווה לשטף המגנטי היוצא מהמשטח, ולכן ניתן להסיק שהשדה המגנטי אחיד לכל אורך התיבה.

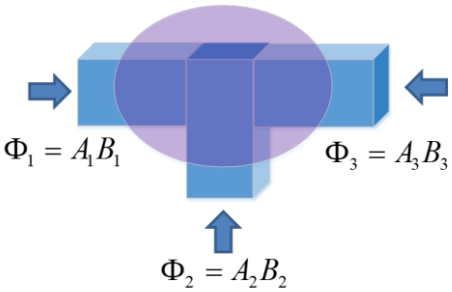
תחת הנחות אלה, על מנת למצוא את השדות בהתקן כללי יש ליישם שלושה חוקים בלבד:

א. **חוק אמפר**. האינטגרל של השדה המגנטי לאורך מסלול סגור שווה לסך הזרם דרך המשטח. לדוגמא:



$$H_1\ell_1 + H_2\ell_2 = N_1 I_1$$

ב. **אין מקורות מגנטיים**. סה"כ השטף המגנטי הנכנס למשטח סגור הוא אפס. לדוגמא:

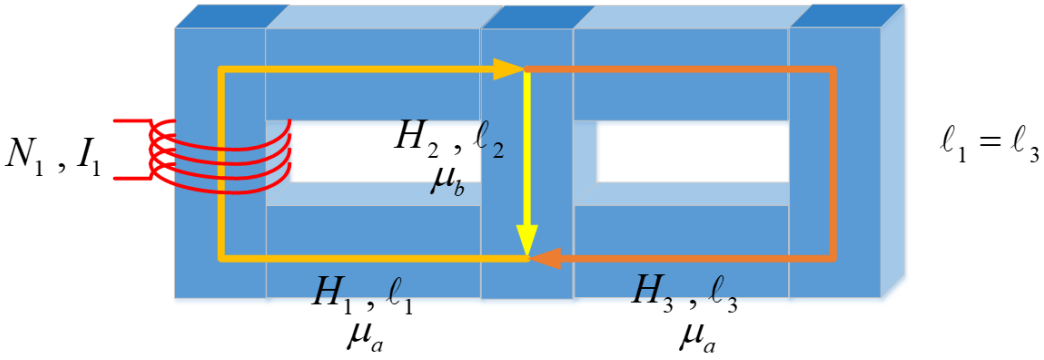


$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$
$$A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3 = 0$$

ג. בחומרים מגנטיים ליניאריים: $B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$

דוגמא – חישוב השדות בהתקן

נתבונן בהתקן הבא:



הגיאומטריה של ההתקן:

- הסליל משמאל הוא בעל N_1 ליפופים.
- אורכי המסלולים המגנטיים הם ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 , כאשר $\ell_1 = \ell_3$.
- שטח החתך שווה בכל ההתקן ומסומן ב - A .
- הפרמאביליות של החומרים המגנטיים:

$$B_1 = \mu_a H_1 \quad B_2 = \mu_b H_2 \quad B_3 = \mu_a H_3$$

עבור זרם נתון I_1 , חשב את השדות המגנטיים בהתקן.

<u>פתרון</u>

לאורך מסלולים סגורים, לפי חוק אמפר:

$$\begin{aligned} H_1\ell_1 + H_2\ell_2 &= N_1 I_1 \\ H_1\ell_1 + H_3\ell_3 &= N_1 I_1 \end{aligned} \tag{3}$$

ובצומת, מכיוון שאין מקורות מגנטיים:

$$\begin{gathered} AB_1 - AB_2 - AB_3 = 0 \\ \Downarrow \\ B_1 = B_2 + B_3 \end{gathered} \tag{4}$$

בנוסף, לפי הפרמאביליות של החומרים המגנטיים:

$$\begin{aligned} B_1 &= \mu_a H_1 \\ B_2 &= \mu_b H_2 \\ B_3 &= \mu_a H_3 \end{aligned} \tag{5}$$

מתקבלות 6 משוואות בשישה נעלמים שפתרונן:

$$H_1 = \frac{N_1}{\mu_b \ell_1 + 2\mu_a \ell_2}\left(\mu_b + \frac{\ell_2}{\ell_1}\mu_a\right) I_1$$

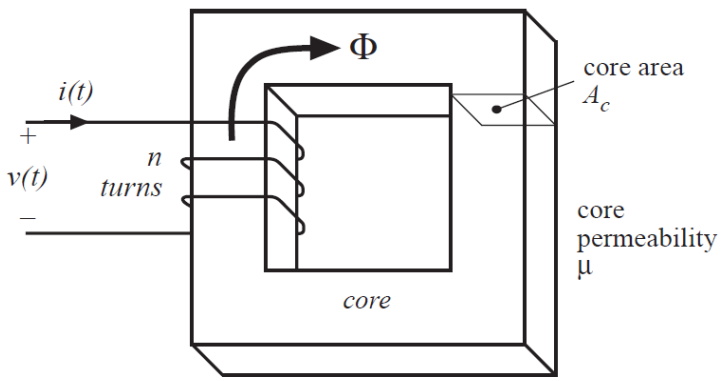
$$H_2 = \frac{\mu_a N_1}{\mu_b \ell_1 + 2\mu_a \ell_2} I_1 \qquad (6)$$

$$H_3 = \frac{\ell_2}{\ell_1} \cdot \frac{\mu_a N_1}{\mu_b \ell_1 + 2\mu_a \ell_2} I_1$$

(דילגנו על האלגברה, מכיוון שהפתרון המסוים הזה אינו עקרוני לדיון שלנו)

סליל פשוט

נתבונן בסליל הבנוי כך:



נתוני ההתקן:

- מספר הליפופים הוא n.
- שטח החתך של הליבה המגנטית הוא A_c.
- אורך המסלול המגנטי (במרכז ההתקן) הוא l_m.
- הפרמאביליות של הליבה המגנטית היא μ.

כזכור ההשראות של ההתקן מוגדרת כך:

$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt} \qquad (7)$$

נחשב את השדות בהתקן ואת ההשראות לפי הכללים שלמדנו. לפי חוק אמפר:

$$H(t)l_m = ni(t) \quad \Rightarrow \quad H(t) = \frac{ni(t)}{l_m} \qquad (8)$$

לפי חוק פאראדיי, המתח המושרה בליפוף אחד הינו

$$v_{turn}(t)=\frac{d\Phi(t)}{dt}=A_c\frac{dB(t)}{dt} \tag{9}$$

והמתח המושרה ב - n ליפופים הוא

$$v(t)=nv_{turn}(t)=nA_c\frac{dB(t)}{dt} \tag{10}$$

בנוסף מתקיים

$$B(t)=\mu H(t) \tag{11}$$

נציב משוואות אלה זו בזו ונקבל:

$$\begin{aligned} v(t)&=nA_c\frac{dB(t)}{dt}=nA_c\mu\frac{dH(t)}{dt}\\ &=\underbrace{\frac{\mu n^2A_c}{l_m}}_{L}\frac{di(t)}{dt} \end{aligned} \tag{12}$$

וקיבלנו שהשראות ההתקן היא

$$L=\frac{\mu n^2A_c}{l_m} \tag{13}$$

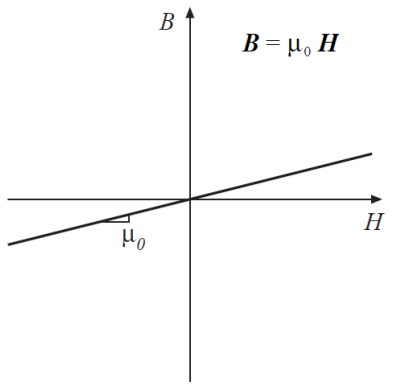
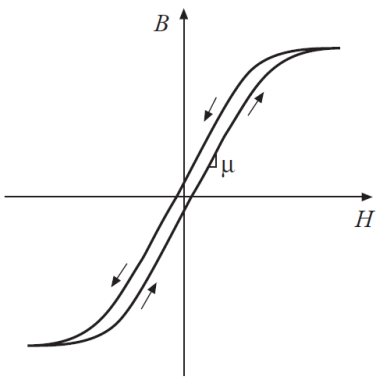
<u>זרם הרוויה בסליל</u>

בניתוח שביצענו כעת השתמשנו בקשר הפשוט

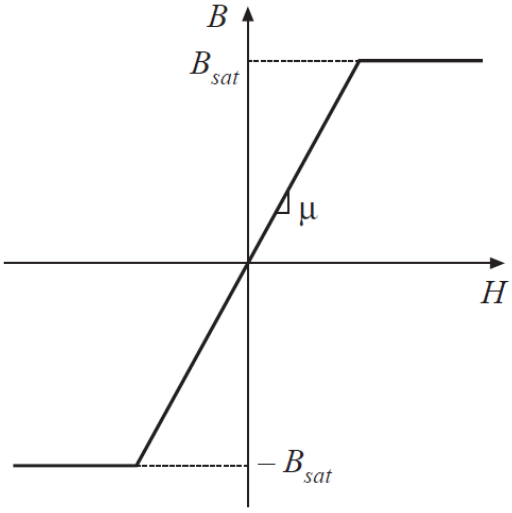
$$B(t)=\mu H(t) \tag{14}$$

קשר זה מתקיים במרחב חופשי, אך אינו מתקיים בחומרים מגנטיים מעשיים.

התרשים הבא משווה את הקשר בין H ו – B במרחב חופשי, לעומת חומר מגנטי טיפוסי:

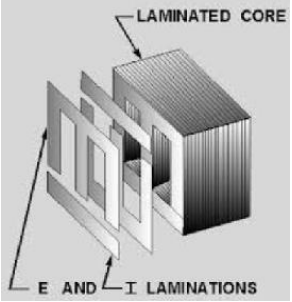
מרחב חופשי	**חומר מגנטי טיפוסי**
$B=\mu_0 H$	קשר לא ליניארי – לולאת היסטרזיס ורוויה
	

נתעלם בשלב זה מלולאת ההיסטרזיס, ונתאר את החומר המגנטי בקירוב כך:



כאשר $\mu = \mu_r \mu_0$, וכאמור בחומרים מגנטיים טיפוסיים μ_r הוא בטווח 10^6 - 10^2.

מספר ערכים טיפוסיים של B_{sat} בחומרים שונים:

B_{sat}	חומר מגנטי	
0.3 – 0.5 T		ferrite
0.5 – 1 T		powdered iron
1 – 2 T		iron laminations

כפי שראינו קודם באזור שבו החומר המגנטי בקירוב ליניארי ההתקן מתנהג כסליל בעל השראות

$$L = \frac{\mu n^2 A_c}{l_m}$$

כיצד מתנהג ההתקן כאשר החומר המגנטי ברוויה?

ראשית, מכיוון ש $B(t) \approx B_{sat}$, המתח המושרה הוא בקירוב אפס:

$$v(t) = nA_c \frac{dB(t)}{dt} \approx 0 \tag{15}$$

כלומר, כאשר החומר המגנטי ברוויה הסליל מתנהג בקירוב כמו קצר!

בנוסף, הזרם I_{sat} שעבורו החומר המגנטי נכנס לרוויה מתקבל ע"י

$$\begin{gathered} B_{sat} = B(t) = \mu H(t) = \mu \frac{nI_{sat}}{l_m} \\ \Downarrow \\ I_{sat} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu n} \end{gathered} \tag{16}$$

נסכם את התנהגות ההתקן, כולל תופעות של רוויה:

$$\begin{gathered} v(t) \approx \begin{cases} L\dfrac{di(t)}{dt} & |i(t)| \le I_{sat} \qquad \text{(inductor)} \\ 0 & |i(t)| > I_{sat} \qquad \text{(short circuit)} \end{cases} \\ \text{with} \quad I_{sat} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu n} \ , \quad L = \frac{\mu n^2 A_c}{l_m} \end{gathered} \tag{17}$$

זרם הרוויה הוא פרמטר מרכזי בבחירה ובתכנון של סלילים. כאשר הזרם בפועל גבוה מזרם הרוויה, הסליל מתקצר ומשבש את פעולת המעגל.

סליל עם חריץ אוויר

באופן כללי, תפקידו המרכזי של הסליל הוא לאגור אנרגיה בשדה מגנטי. כזכור האנרגיה האגורה בסליל הינה:

$$E = \frac{1}{2} L i^2(t) \tag{18}$$

מהי האנרגיה המקסימאלית שניתן לאגור בסליל?

נציב $i(t)=I_{sat}$ ונקבל

$$E_{\max}=\frac{1}{2}LI_{sat}^{\ 2} \tag{19}$$

בניתוח הקודם ראינו כי $L=\mu n^2 A_c / l_m$ ו- $I_{sat}=B_{sat}l_m/(\mu n)$, ולכן

$$E_{\max}=(\text{some constant})\frac{1}{\mu} \tag{20}$$

קיבלנו תוצאה מפתיעה: ככל שהחומר המגנטי בעל פרמאביליות גדולה יותר (μ גדול), כך האנרגיה האגורה בסליל קטנה יותר. בנוסף, כאשר החומר המגנטי אידיאלי ($\mu\to\infty$), האנרגיה האגורה בסליל שואפת לאפס.

ניתן להסביר תוצאה זו גם משיקולי אנרגיה. כזכור, האנרגיה המגנטית נתונה באופן כללי ע"י

$$E=\iiint\frac{1}{2}H\cdot Bdv \tag{21}$$

(כלומר, אינטגרל על $\frac{1}{2}H\cdot B$ בכל נפח ההתקן)

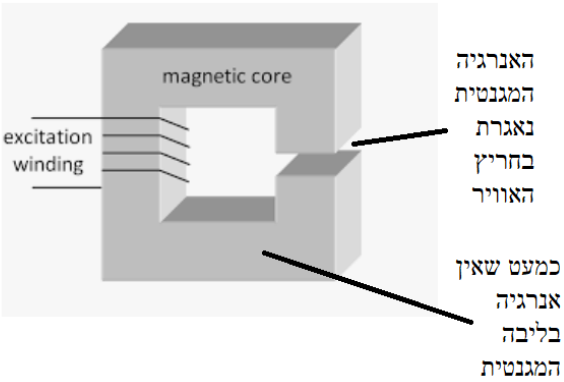
וכאשר $\mu\to\infty$ מקבלים

$$|H|=\frac{|B|}{\mu}\le\frac{B_{sat}}{\mu}\ \to\ 0 \tag{22}$$

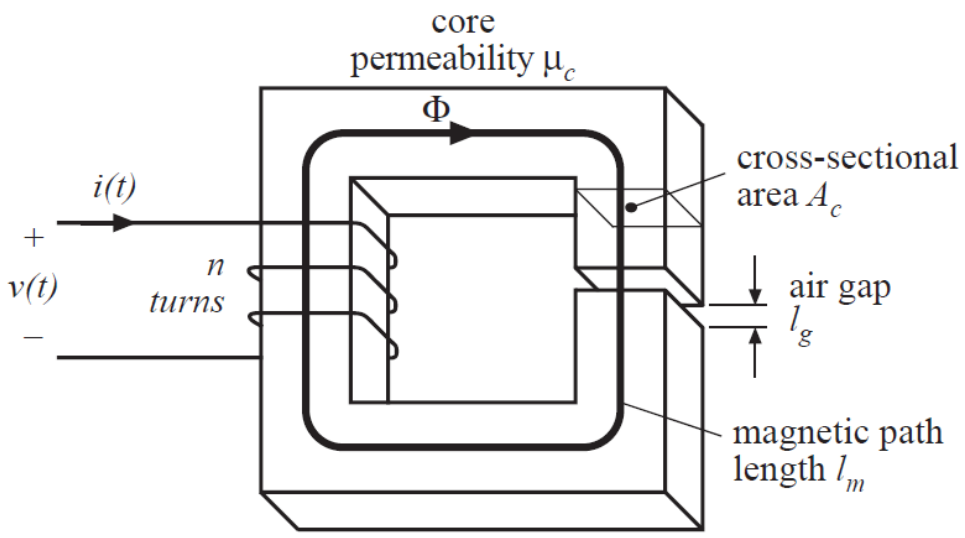
כלומר, בחומר מגנטי אידיאלי $H\ \to\ 0$, ולכן חומר מגנטי אידיאלי אינו אוגר אנרגיה.

ניתן להבין מכך שכאשר בונים סליל בגיאומטריה שהוצגה קודם (עם חומר מגנטי אידיאלי) מתקבל סליל גרוע מאוד, מכיוון שזרם הרוויה שלו שואף לאפס. במילים אחרות, סליל זה אינו ממלא את תפקידו, מכיוון שאינו יכול לאגור אנרגיה בצורה יעילה.

על מנת לפתור בעיה זו, סלילים מעשיים כוללים לרוב חריץ אוויר. תפקידו של חריץ האוויר לאגור אנרגיה, כפי שמוצג בתרשים הבא:



ננתח כעת סליל עם חריץ אוויר, לפי העקרונות שלמדנו. ההתקן נראה כך:



נתוני ההתקן:

- מספר הליפופים הוא n.
- שטח החתך של הליבה המגנטית הוא A_c.
- אורך המסלול המגנטי (במרכז ההתקן) הוא l_m.
- אורך חריץ האוויר הוא l_g.
- הפרמאביליות של הליבה המגנטית היא μ_c.

מכיוון שאין מקורות מגנטיים B שווה בכל ההתקן. כלומר, B <u>זהה גם בליבה וגם בחריץ האוויר</u>.

כעת, לפי הפרמאביליות של החומרים המגנטיים:

$$\text{in the core:} \qquad H_c = \frac{B}{\mu_c}$$

(23)

$$\text{in the air gap:} \qquad H_g = \frac{B}{\mu_0}$$

לפי חוק אמפר:

$$H_c l_m + H_g l_g = ni \tag{24}$$

(השתמשנו פה בקירוב $l_m \gg l_g$)

נציב ונקבל:

$$B = \frac{ni}{\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}} \tag{25}$$

ומכאן ניתן לחלץ את זרם הרוויה:

$$B = B_{sat} \quad \Rightarrow \quad I_{sat} = \frac{B_{sat}}{n}\left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}\right) \tag{26}$$

כעת, לפי חוק פאראדיי:

$$v = nA_c \frac{dB}{dt} = \frac{n^2 A_c}{\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}} \frac{di}{dt} \tag{27}$$

ולכן ההשראות הינה

$$L = \frac{n^2 A_c}{\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}} \tag{28}$$

בנוסף, האנרגיה המקסימאלית שניתן לאגור בסליל:

$$E_{\max} = \frac{1}{2} L I_{sat}^{\ 2} = \frac{1}{2} A_c B_{sat}^{\ 2}\left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}\right) \tag{29}$$

נסכם:

זרם הרוויה	$I_{sat} = \frac{B_{sat}}{n}\left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}\right)$
ההשראות	$L = \frac{n^2 A_c}{\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}}$
האנרגיה המקסימאלית	$E_{\max} = \frac{1}{2} L I_{sat}^{\ 2} = \frac{1}{2} A_c B_{sat}^{\ 2}\left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}\right)$

ככל שחריץ האוויר גדול יותר (כלומר, l_g גדול יותר) כך

- ההשראות L <u>קטנה</u>.
- זרם הרוויה I_{sat} <u>גדל</u>.
- ניתן <u>לאגור יותר אנרגיה</u> בסליל.

בפרט, כאשר החומר המגנטי אידיאלי ($\mu_c \to \infty$) מקבלים:

$$H_c = \frac{B}{\mu_c} \to 0 \qquad \text{(no magnetic field in the core)}$$

(30)

$$E_{\max} \to \frac{1}{2} A_c B_{sat}{}^2 \frac{l_g}{\mu_0}$$

כלומר,

- השדה המגנטי בליבה שואף לאפס, ולכן האנרגיה האגורה בליבה המגנטית שואפת לאפס.
- כל האנרגיה של הסליל אגורה בחריץ האוויר.

ניתן לקבל את אותה תוצאה על ידי חישוב של האנרגיה לפי השדות בהתקן:

(31)

$$E_{\max} = \iiint_{\substack{\text{air gap}\\ \text{volume}}} \frac{1}{2} HBdv = \left(A_c l_g\right) \frac{1}{2} \frac{B_{sat}}{\mu_0} B_{sat} = \frac{1}{2} A_c B_{sat}{}^2 \frac{l_g}{\mu_0}$$

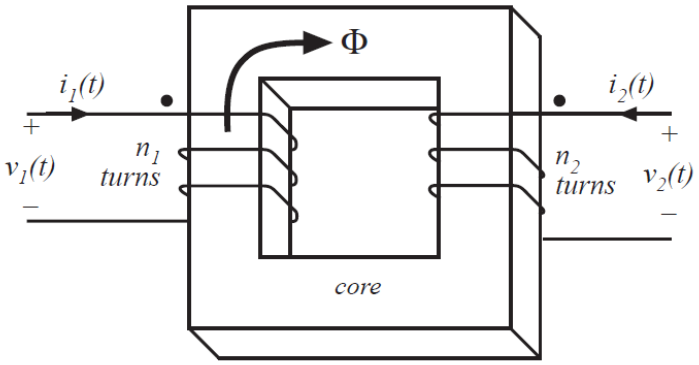
air gap volume

קיבלנו אותה תוצאה כמו קודם, כאשר חישבנו את האנרגיה לפי $0.5LI_{sat}{}^2$.

שימו לב שהאנרגיה המקסימאלית נקבעת על פי הליבה והגאומטריה של ההתקן בלבד, <u>ואינה תלויה במספר הליפופים</u> n. זהו רמז לחוק כללי: על מנת לקבל יותר אנרגיה צריך תמיד "לשלם" בחומר טוב יותר, או בגודל פיזי. לא ניתן לקבל יותר אנרגיה ע"י הגדלה או הקטנה של מספר הליפופים.

שנאי פשוט

נתבונן בשנאי הבנוי כך:



נתוני ההתקן:

- מספר הליפופים בסליל הראשוני (משמאל) הוא n_1.
- מספר הליפופים בסליל המשני (מימין) הוא n_2.
- שטח החתך של הליבה המגנטית הוא A_c.
- אורך המסלול המגנטי (במרכז ההתקן) הוא l_m.
- הפרמאביליות של הליבה המגנטית היא μ.

ננתח את ההתקן לפי הכללים שלמדנו.

מכיוון שאין מקורות מגנטיים B זהה בכל ההתקן.

בנוסף, לפי חוק אמפר:

$$H(t)l_m = n_1 i_1(t) + n_2 i_2(t) \quad \Rightarrow \quad H(t) = \frac{n_1 i_1(t) + n_2 i_2(t)}{l_m} \tag{32}$$

ולפי חוק פאראדיי:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= n_1 A_c \frac{dB(t)}{dt} = n_1 \mu A_c \frac{dH(t)}{dt} \\ v_2(t) &= n_2 A_c \frac{dB(t)}{dt} = n_2 \mu A_c \frac{dH(t)}{dt} \end{aligned} \tag{33}$$

נשים לב שמתקיים $v_2(t) = \frac{n_2}{n_1} v_1(t)$.

כעת נציב את $H(t)$ ונקבל:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m} \frac{d}{dt}\left(i_1 + \frac{n_2}{n_1} i_2 \right) \\ v_2(t) &= \frac{n_2}{n_1} v_1(t) \end{aligned} \tag{34}$$

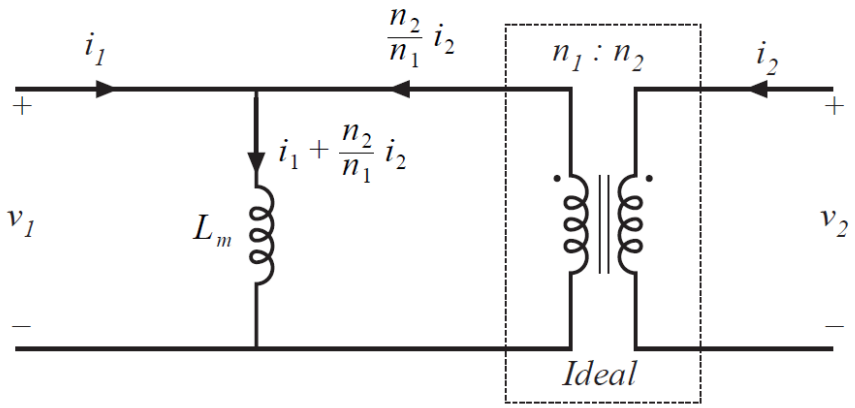
נגדיר

$$L_m = \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m} \tag{35}$$

שוב נציב ונקבל

$$\begin{aligned} v_1(t) &= L_m \frac{d}{dt}\left(i_1 + \frac{n_2}{n_1} i_2 \right) \\ v_2(t) &= \frac{n_2}{n_1} v_1(t) \end{aligned} \tag{36}$$

משוואות אלה מתוארות ע"י המעגל השקול הבא:



כלומר, ההתקן מיוצג על ידי <u>שנאי אידיאלי</u>, במקביל <u>להשראות מגנוט</u>: $L_m = \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m}$.

כפי שראינו בשיעורים הקודמים, השראות המגנוט מייצגת את האנרגיה האגורה בליבה המגנטית.

הערה: הנחנו צימוד מלא בין הסליל הראשוני והסליל המשני, ולכן המעגל השקול שקיבלנו אינו כולל השראויות זליגה. מיד נתייחס לכך.

<u>שנאי אידיאלי</u>

- כאשר דיברנו על הסליל, ראינו שההתקן כולל חריץ אוויר אשר מאפשר לאגור אנרגיה בצורה יעילה. בניגוד לסליל, תפקידו של השנאי הוא <u>להמיר אנרגיה, ולא לאגור אותה</u>. משום כך, שנאים לרוב אינם מתוכננים עם חריץ אוויר.

- נשים לב שכאשר $\mu \to \infty$ מתקבל $L_m \to \infty$. במקרה זה השראות המגנוט של השנאי שקולה לנתק, וההתקן הוא <u>שנאי אידיאלי</u>. במקרה זה מתקבלות המשוואות הבאות:

$$v_2 = \frac{n_2}{n_1} v_1 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{v_1}{n_1} = \frac{v_2}{n_2}$$

(37)

$$H = \frac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{l_m} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad n_1 i_1 = -n_2 i_2$$

ומתקיים שימור הספק $v_1 i_1 = -v_2 i_2$.

ניתן להבין זאת גם כך: מכיוון שחומר מגנטי אידיאלי אינו אוגר אנרגיה, ההספק הנכנס להתקן שווה להספק היוצא מההתקן.

- שנאי של ממיר flyback הוא יוצא דופן לכלל זה. כזכור שנאי זה אוגר אנרגיה משמעותית בהשראות המגנוט שלו, ולכן מתוכנן לרוב עם חריץ אוויר. בשנאי זה השראות המגנוט קטנה, ואינה "אינסופית".

רוויה של החומר המגנטי בשנאי

הסיבה לרוויה בשנאי היא זרם גבוה בהשראות המגנוט.

לדוגמא, נתבונן במבנה הפשוט של השנאי שראינו קודם, ונניח שהשראות המגנוט מיוצגת בצד הראשוני של השנאי. במקרה זה:

$$L_m = \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m} \tag{38}$$

והזרם בהשראות המגנוט הינו

$$i_m = i_1 + \frac{n_2}{n_1} i_2 \tag{39}$$

בנוסף,

$$\begin{aligned} B = \mu H(t) &= \frac{\mu}{l_m}\left(n_1 i_1 + n_2 i_2\right) \\ &= \frac{\mu}{l_m} n_1 \left(i_1 + \frac{n_2}{n_1} i_2 \right) \\ &= \frac{\mu}{l_m} n_1 i_m \end{aligned} \tag{40}$$

על מנת להימנע מרוויה חייב להתקיים $|B| \le B_{sat}$, או בצורה שקולה

$$|i_m| \le I_{sat,1} \qquad \text{with} \qquad I_{sat,1} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu n_1} \tag{41}$$

במשוואה זו $I_{sat,1}$ מוגדר להיות זרם הרוויה בהשראות המגנוט, כאשר השראות זו מיוצגת בצד שמאל (בסליל הראשוני). בצורה דומה, כאשר השראות המגנוט מיוצגת בצד ימין (בסליל המשני), ניתן להגדיר זרם רוויה $I_{sat,2}$ המוגדר כך:

$$|i_m| \le I_{sat,2} \qquad \text{with} \qquad I_{sat,2} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu n_2} \tag{42}$$

איזון "וולט-שניה" בשנאי

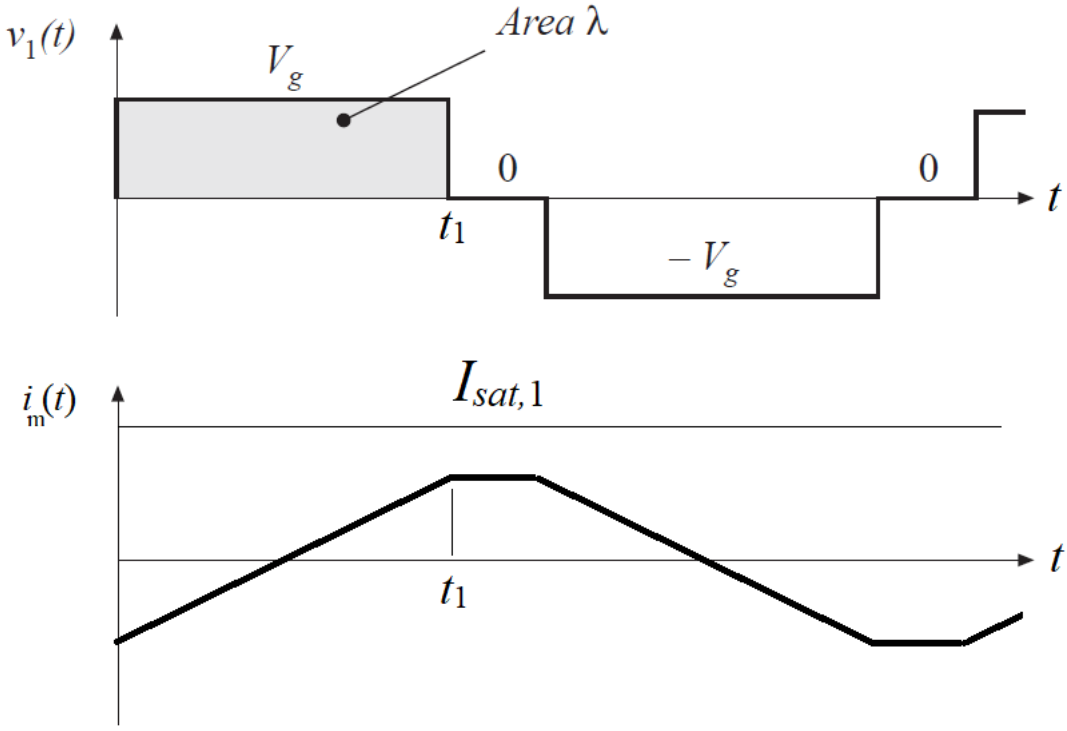
כפי שכבר ראינו בהרצאות הקודמות, על מנת שהזרם i_m יהיה חסום, במצב היציב חייב להתקיים איזון "וולט שניה" על השנאי:

$$i_m(t) = i_m(t+T_s) \quad \Rightarrow \quad \int_t^{t+T_s} v_1(\tau)\,d\tau = 0 \tag{43}$$

כלומר במצב היציב המתח הממוצע על השראות המגנוט חייב להתאפס.

בנוסף לדרישה זו, הזרם בהשראות המגנוט i_m חייב להיות חסום בכל מחזור, ודרישה זו מגבילה את האינטגרל על החלק החיובי של המתח. מגבלה זו מהווה אילוץ מרכזי בתכנון של שנאים מעשיים.

לשם דוגמא, נניח שהשראות המגנוט מיוצגת בצד שמאל וחסומה לפי $|i_m| \le I_{sat,1}$. נתבונן בצורות הגל הבאות:



נגדיר את λ להיות האינטגרל על החלק החיובי של המתח, כפי שמתואר באיור:

$$\lambda = \int_0^{t_1} v_1(t)\,dt \tag{44}$$

כעת, מכיוון ש

$$i_m(t) = i_m(0) + \frac{1}{L_m}\int_0^{t} v_1(\tau)\,d\tau \tag{45}$$

נקבל

$$i_{m,\max} = -i_{m,\max} + \frac{1}{L_m}\lambda \tag{46}$$

כאשר $i_{m,\max}$ הוא הזרם המקסימאלי בהשראות המגנוט, ומכאן ניתן לקבל את היחס

$$i_{m,\max} = \frac{\lambda}{2L_m} \tag{47}$$

כפי שראינו קודם, על מנת להימנע מרוויה צריך להתקיים

$$i_{m,\max} \le I_{sat,1} \tag{48}$$

ולכן

$$\frac{\lambda}{2L_m} \le I_{sat,1} \tag{49}$$

כעת נציב

$$L_m = \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m} \quad , \quad I_{sat,1} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu n_1} \tag{50}$$

ונקבל

$$\lambda \le 2 n_1 A_c B_{sat} \tag{51}$$

כלומר, על מנת להימנע מרוויה, האינטגרל על החלק החיובי של המתח חייב להיות חסום.

תנאי דומה מתקיים באופן כללי בכל שנאי, ולא רק במבנה הפשוט שחקרנו. לפי חוק פאראדיי

$$v_1(t) = n_1 A_c \frac{dB}{dt} \tag{52}$$

ולכן השינוי ב - B לאורך מחזור המיתוג הינו

$$\Delta B = \frac{1}{n_1 A_c} \int_{v_1(t)>0} v_1(t)\,dt = \frac{\lambda}{n_1 A_c} \tag{53}$$

כאשר λ הוא האינטגרל על החלק החיובי של המתח. כתוצאה מכך

$$\lambda = n_1 A_c \Delta B \quad \Rightarrow \quad \lambda \le n_1 A_c \max\{\Delta B\} \tag{54}$$

מכיוון ש ΔB מוגבל בשל רוויה של החומר המגנטי, λ חייב להיות חסום.

לסיכום, שני תנאים להימנעות מרוויה בשנאי הינם:

1. הזרם בהשראות המגנוט חסום: $|i_m| \le I_{sat}$.
2. במצב יציב, האינטגרל על החלק החיובי של המתח חסום: $\lambda \le n_1 A_c \max\{\Delta B\}$

תנאים אלה שקולים זה לזה. אם אחד מהם מתקיים, גם השני חייב להתקיים.

מהי המשמעות של תוצאה זו למתכנן המעגל ?

כאשר ניגשים לתכנון של שנאי אנו יודעים לרוב את λ, מכיוון שהוא נובע מהמתח המתוכנן בסליל הראשוני, וגם יודעים את $\max\{\Delta B\}$, לפי ערך הרוויה של החומר המגנטי. לפי התוצאה הקודמת חייב להתקיים היחס

$$n_1 A_c \ge \frac{\lambda}{\max\{\Delta B\}} \tag{55}$$

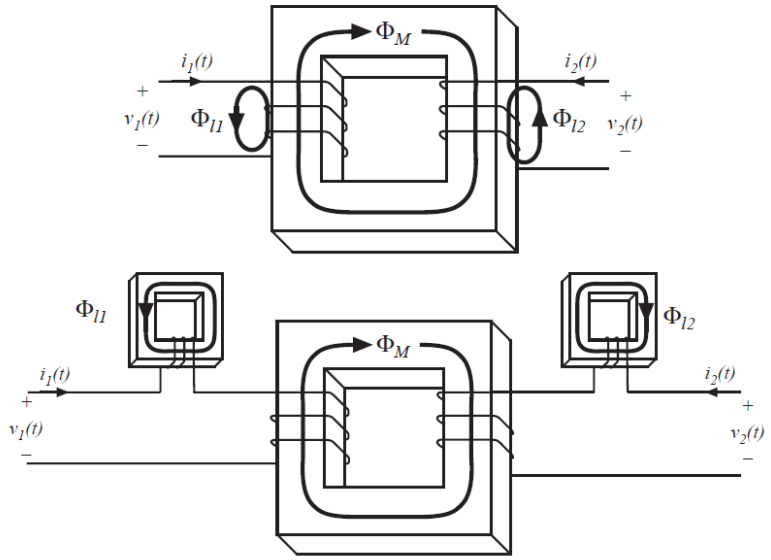
כלומר, **ככל שמספר הליפופים קטן יותר, כך שטח החתך של הליבה חייב להיות גדול יותר.**

אילוץ זה מכתיב פעמים רבות את הגודל הפיזי של השנאי. לדוגמא, כאשר מתכננים שנאי לזרמים גבוהים רצוי שמספר הליפופים n_1 יהיה קטן ככל האפשר, על מנת להימנע מהפסדים אוהמיים בסליל. בשנאי כזה חייבים להשתמש בשטח חתך A_c גדול, על מנת להימנע מרוויה של החומר המגנטי.

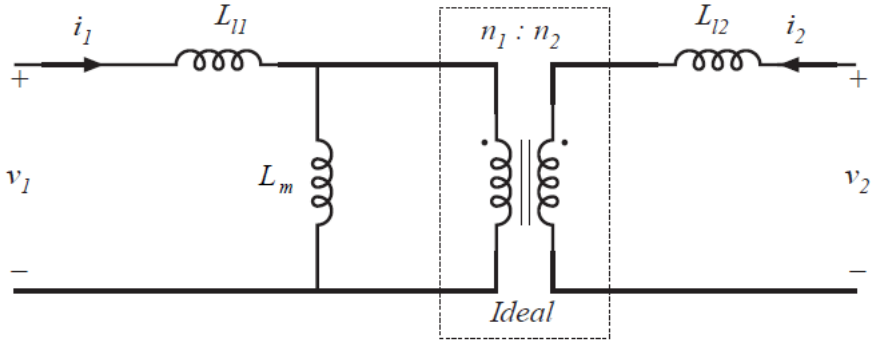
הערה לגבי השראויות הזליגה

עד כה הנחנו שאין שדה במרחב החופשי מחוץ להתקן. כתוצאה מהנחה זו קיבלנו צימוד מושלם בין הסלילים $(k=1)$, או במילים אחרות, קיבלנו שהשראויות הזליגה הן אפס.

בפועל, קיים שדה מגנטי במרחב החופשי סביב להתקן. האנרגיה האגורה בשדה זה מתבטאת בהשראויות זליגה. תופעה זו מתוארת באופן עקרוני באיור הבא:



כזכור, הראינו בהרצאות הקודמות שהמודל המלא של השנאי עם השראויות זליגה הינו



הפסדים בהתקנים מגנטיים

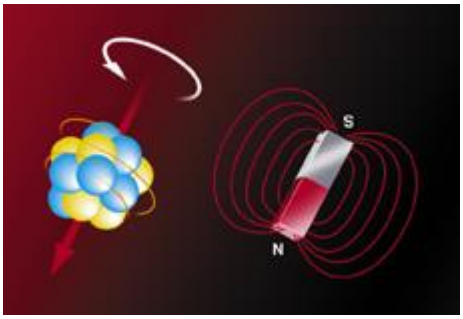
כעת נדון במנגנוני הפסדים בהתקנים מגנטיים. הפסדים אלה מהווים שיקול מרכזי בבחירת החומר של הליבה והגאומטריה של ההתקן. נחלק את ההפסדים לשני סוגים:

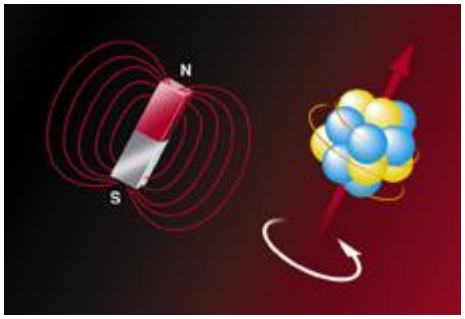
- הפסדים בליבה המגנטית
- הפסדים אוהמיים במוליכים

הפסדים בליבה המגנטית

הפסדים בליבה המגנטית נובעים בעיקר מ"חיכוך" בין המולקולות של החומר המגנטי, הנוצר עקב השתנות השדות בהתקן. באופן איכותי, המולקולות של החומר המגנטי נוטות "להסתובב" כך שהמומנט המגנטי שלהן יהיה מקביל לשדה, כפי שמתואר באיור הבא:

שדה "כלפי מטה" שדה "כלפי מעלה"

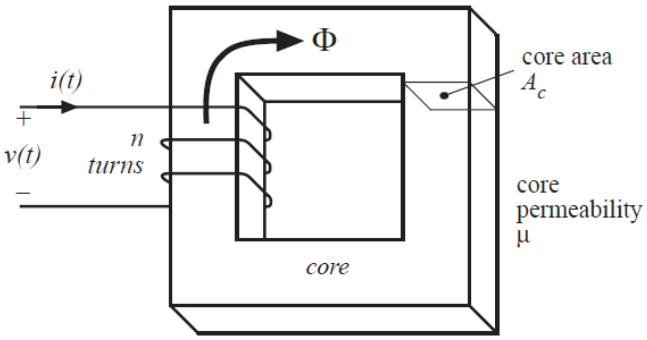




כאשר השדה משתנה בזמן, תנועה זו יוצרת חיכוך שמוביל להפסדים.

תוצאה מפורסמת בתיאוריה של חומרים מגנטיים הינה שהפסד האנרגיה לאורך מחזור פרופורציוני לשטח של לולאת ההיסטרזיס בדיאגרמת $B-H$. נבין כעת את הסיבה לכך.

נתבונן בהתקן מגנטי כללי, כפי שמתואר באיור הבא:



נגדיר את הפסד האנרגיה לאורך מחזור מיתוג:

$$W = \int_{\substack{\text{one}\\\text{cycle}}} v(t)i(t)dt \qquad (56)$$

כעת נשתמש ביחסים הבאים

(57)
$$v(t) = nA_c \frac{dB}{dt} \qquad \text{(Faraday's law)}$$
$$i(t) = \frac{H(t)l_m}{n} \qquad \text{(Ampere's law)}$$

נציב באינטגרל ונקבל

(58)
$$W = \int_{\substack{\text{one}\\\text{cycle}}} \left(nA_c \frac{dB}{dt} \right) \left(\frac{H(t)l_m}{n} \right) dt$$

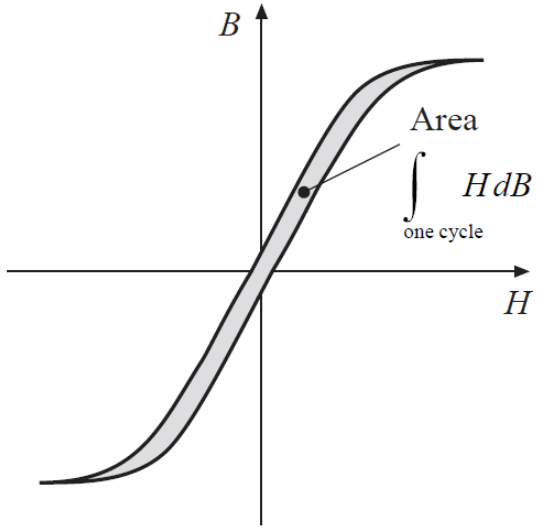
נחליף משתנה אינטגרציה

(59)
$$dB = \frac{dB}{dt} dt$$

ונקבל

(60)
$$W = A_c l_m \int_{\substack{\text{one}\\\text{cycle}}} H(t)\, dB$$

האינטגרל הוא <u>השטח של לולאת ההיסטרזיס</u>:



ונהוג לבטא תוצאה זו כך:

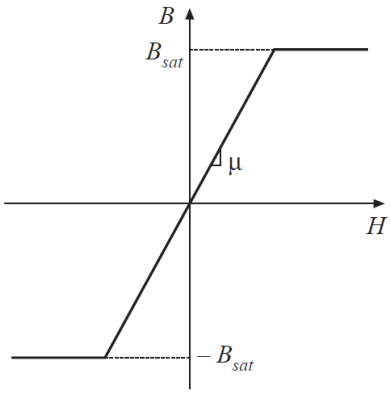
(61) $$\text{(energy lost per cycle)} = \text{(core volume)} \times \text{(area of } B\text{-}H \text{ loop)}$$

הפסד ההספק הממוצע מתקבל ע"י הכפלה בתדר:

(62)
$$P_H = (f)(A_c l_m) \int_{\substack{\text{one}\\\text{cycle}}} H(t)\, dB$$

ניתן לראות שהפסד זה גדל ליניארית עם התדר.

שימו לב שבחומר ליניארי אידיאלי שטח הלולאה הוא אפס, ולכן אין הפסדים:

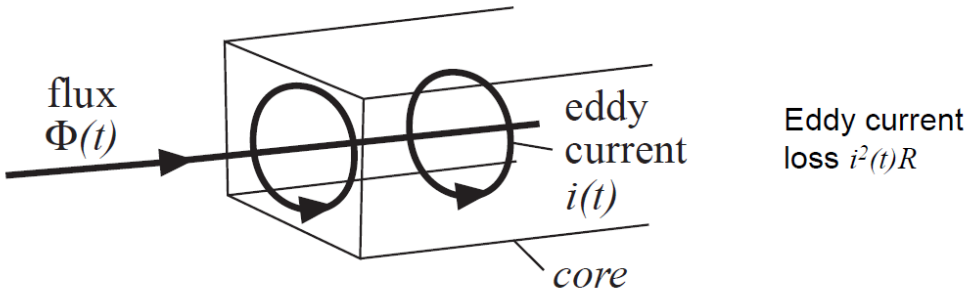


הפסדי הליבה הם שיקול מרכזי בבחירת החומר המגנטי. להלן חומרים נפוצים והיישומים שלהם:

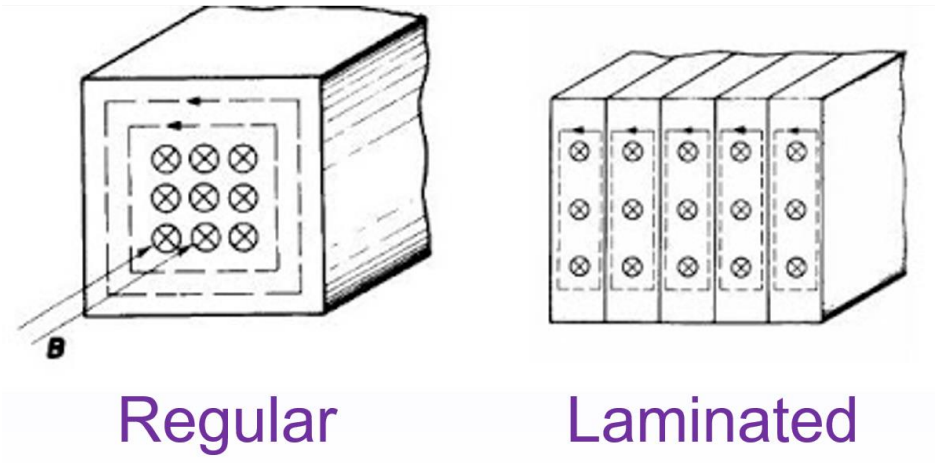
Core type	B_{sat}	Relative core loss	Applications
Laminations iron, silicon steel	1.5 - 2.0 T	high	50-60 Hz transformers, inductors
Powdered cores powdered iron, molypermalloy	0.6 - 0.8 T	medium	1 kHz transformers, 100 kHz filter inductors
Ferrite Manganese-zinc, Nickel-zinc	0.25 - 0.5 T	low	20 kHz - 1 MHz transformers, ac inductors

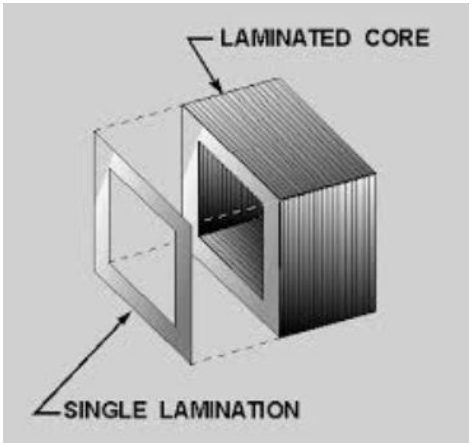
זרמי מערבולת בליבה המגנטית (Eddy currents)

אם הליבה המגנטית עשויה מחומר מוליך (למשל ברזל), השינוי בשדה המגנטי גורם לתופעה של זרמי מערבולת בליבה, שהם מקור להפסדים. כפי שראינו, שינוי של שטף מגנטי משרה שדה חשמלי (זהו חוק פאראדיי). שדה חשמלי זה יוצר זרם לא רצוי בליבה, הגורם להפסדים:



על מנת למזער הפסדים אלה מייצרים ליבות מגנטיות מברזל בשיטת "למינציה" (שכבות דקות). השכבות מבודדות זו מזו, ומקטינות את זרמי המערבולת.





הפסדים אוהמיים בתדר נמוך

הפסדים אוהמיים במוליכים נקראים גם הפסדי נחושת (copper loss). נניח שהתנגדות הסליל בתדר נמוך הינה R , אזי הפסד ההספק הינו

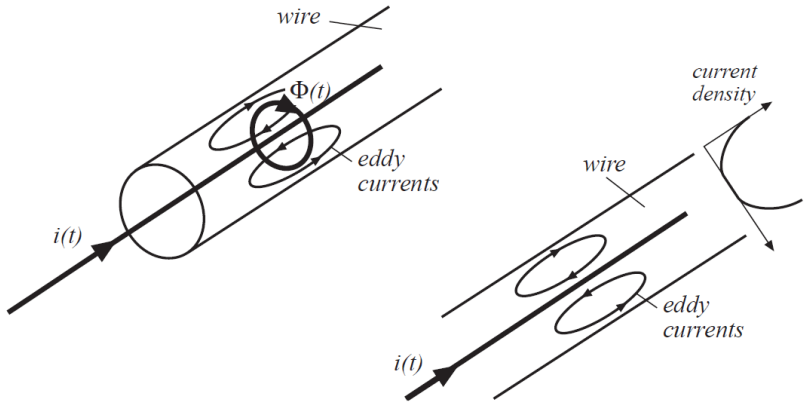
$$P_{cu} = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i^2(t)\,R\,dt \qquad (63)$$

או באופן שקול לפי זרם RMS :

$$P_{cu} = RI_{RMS}^{\;2} \quad \text{with} \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i^2(t)\,dt} \qquad (64)$$

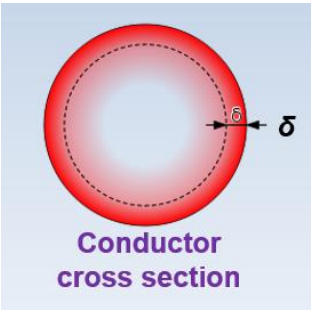
אפקט הקרום (skin-effect)

זרמי מערבולת במוליכים גורמים להגדלת ההתנגדות ולהפסדים. תופעה זו ידועה כ"אפקט הקרום" (skin-effect). איכותית, הזרם במוליך יוצר שדה מגנטי משתנה בזמן. שדה זה יוצר שדה חשמלי, שמחליש את הזרם במרכז המוליך, ומחזק את הזרם בשפת המוליך:



עבור זרמים סינוסואידלים צפיפות הזרם דועכת מהשפה לכיוון המרכז. הרוחב האופייני שבו זורם רוב הזרם מאופיין ע"י ה – skin-depth :

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \tag{65}$$



כאשר

ρ - ההתנגדות הסגולית של המוליך

μ - הפרמאביליות של המוליך

f - התדר

ועבור נחושת בטמפרטורת החדר:

$$\delta \approx \frac{7.5}{\sqrt{f}}\ \text{cm} \tag{66}$$

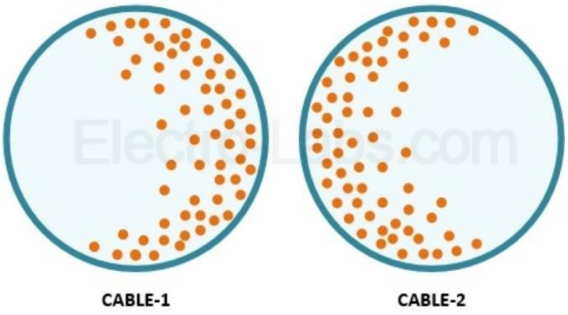
אפקט הקרום מגביל את עובי המוליך האפקטיבי. לדוגמא, בחוט נחושת ובתדר של $100\ \text{kHz}$ נקבל $\delta \approx 0.24\ \text{mm}$. (לצורך השוואה, עובי השערה הוא כ – $0.1\ \text{mm}$). אם נגדיל את רדיוס המוליך מעבר לערך זה לא נקבל שיפור משמעותי בהתנגדות.

משום כך, על מנת להקטין את ההתנגדות של המוליכים בתדר גבוה לא משתמשים במוליך אחד עבה, אלא באוסף של מוליכים דקים המחוברים במקביל, ומלופפים זה עם זה. חוט מסוג זה נקרא Litz, והוא נראה כך:

מכיוון שהרדיוס של כל תיל נפרד קטן מה – skin depth, הזרם מתפלג שווה לאורך החתך של המוליך, ומאפשר התנגדות נמוכה. חוטים מסוג זה הם בשימוש רב בהתקנים מגנטיים, ותפקידם להקטין את הפסדי הנחושת בתדרים גבוהים.

אפקט הקרבה (proximity effect)

אפקט נוסף שגורם להפסדי נחושת בתדר גבוה הוא אפקט הקרבה (proximity effect). כתוצאה מאפקט זה הזרם במוליכים שכנים נוטה להצטופף בשטח חתך קטן. תופעה זו מגדילה את ההתנגדות בתדר גבוה, וגורמת להפסדים נוספים, מעבר לאפקט הקרום.



חשוב לדעת שתופעה זו קיימת, אך לא נדון בה לעומק בקורס זה.

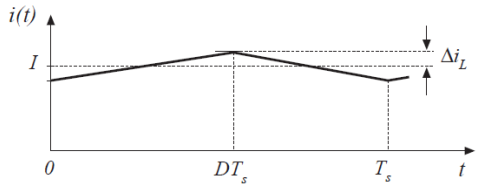
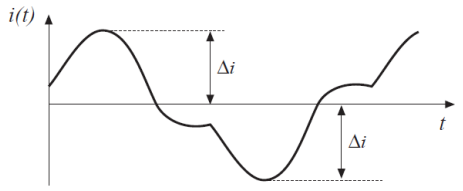
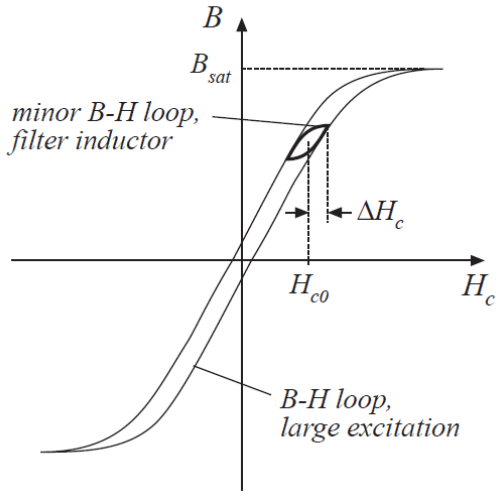
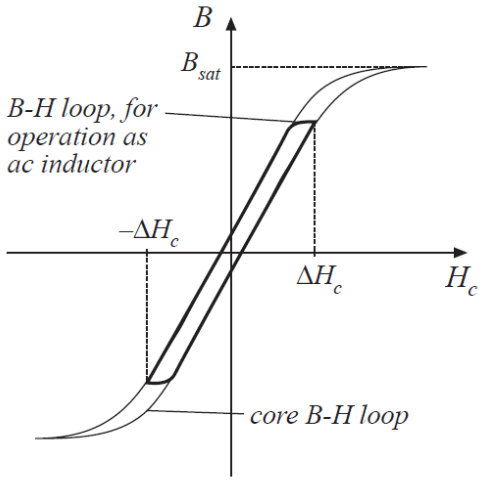
תכנון התקנים מגנטיים

תכנון של התקנים מגנטיים הוא מיומנות הדורשת ניסיון. המתכנן נאלץ להתמודד עם מספר אילוצים סותרים, ולמצוא את החומר המגנטי והגאומטריה המתאימים ביותר ליישום מסוים.

בסעיף זה נסקור על קצה המזלג את עקרונות התכנון של סלילים ושנאים פשוטים.

סוגי סלילים

כאשר ניגשים לתכנון של סליל, השלב הראשון הוא להבין באופן איכותי כיצד תראה עקומת ההיסטרזיס שלו. להלן שתי דוגמאות:

סליל DC	**סליל AC**
אדוות זרם נמוכה לעומת מרכיב DC	אדוות זרם גבוהה לעומת מרכיב DC
	
	
דגשים בתכנון: - הפסדי הליבה זניחים. - הפסדי הנחושת נובעים בעיקר ממרכיב ה – DC של הזרם. מעשית ניתן להתעלם מאפקט הקרום ואפקט הקרבה. - השיקול המרכזי בבחירת החומר המגנטי הוא הימנעות מרוויה. מכיוון ששטח לולאת ההיסטרזיס קטן, ניתן להשתמש בחומר ליבה בעל הפסדים גבוהים יחסית (למשל ברזל).	**דגשים בתכנון:** - כל ההפסדים משמעותיים, ויש להתחשב בהם בתכנון (הפסדי ליבה, אפקט הקרום, אפקט הקרבה). - בוחרים את $B(t)$ לא רק על מנת למנוע רוויה, אלא גם כדי להקטין הפסדים. - יש לבחור חומרים המתאימים לתדר גבוה, לדוגמא Ferrite.

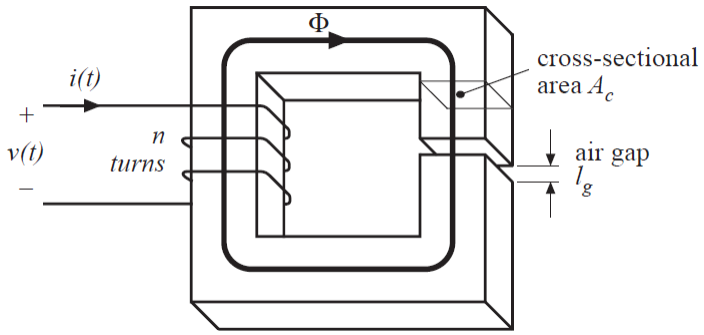
תכנון בסיסי של סליל

נתאר כעת שיטה לתכנון של סליל פשוט.

הנחות התכנון:

- הפסדי הליבה זניחים.
- אפקט הקרום ואפקט הקרבה זניחים. הפסדי הנחושת נתונים בקירוב ע"י $P_{cu} = I_{RMS}{}^2 R$, כאשר R היא התנגדות הסליל בתדר נמוך.
- החומר המגנטי אידיאלי, עם פרמאביליות "אינסופית".

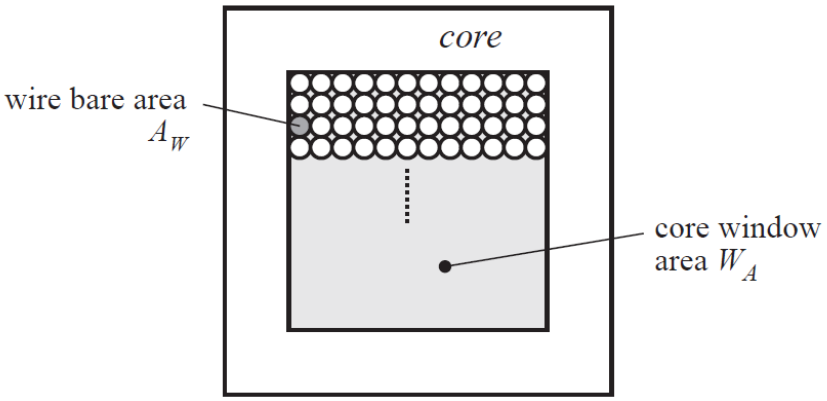
נניח את הגאומטריה הבאה:



להלן מספר הגדרות:

יעדי התכנון (מספרים נתונים)	
השראות רצויה	L
התנגדות טורית רצויה	R
הזרם המקסימאלי בסליל	$I_{\max}$
פרמטרים ידועים	
התנגדות סגולית של החומר המוליך	ρ
הפרמאביליות של הריק	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{V \cdot s/(A \cdot m)}$
"מקדם הניצול" של החלון (ראה למטה)	$K_u \approx 0.5$
צפיפות השטף המגנטי המקסימאלית בליבה	$B_{\max}$
פרמטרים גאומטריים שאותם יש לקבוע במהלך התכנון	
מספר הליפופים	n
שטח החתך של הליבה	A_c
אורך המסלול המגנטי במרכז הליבה	l_m
אורך חריץ האוויר	l_g
שטח החלון של הליבה (ראה למטה)	W_A
שטח החתך של המוליך	A_w
האורך הממוצע של ליפוף (ראה למטה)	MLT (Mean Length per Turn)

ה"חלון" של הליבה המגנטית צריך להיות מספיק רחב על מנת להכיל את המוליכים, כפי שמתואר באיור הבא:



סך כל שטח הנחושת בחלון הינו nA_w , כאשר n הוא מספר הליפופים, ו - A_w הוא שטח החתך של המוליך. בנוסף, "מקדם הניצול" של החלון (שמסומן ב - K_u) מגדיר את החלק מהחלון שניתן בפועל למלא בנחושת (כאשר מתחשבים ברווחים בין מוליכים, שטח הבידוד, וכדומה).

לפי הגדרות אלה חייב להתקיים:

$$nA_w \le K_u W_A \tag{67}$$

כמעט תמיד "מקדם הניצול" של החלון אינו ידוע במדויק. בחירה מקורבת טיפוסית הינה $K_u \approx 0.5$.

ברצוננו כעת לתכנן סליל בעל הפרמטרים הבאים:

- השראות L
- התנגדות R
- זרם מקסימאלי $I_{\max}$

נסקור את אילוצי התכנון.

א. **זרם מקסימאלי רצוי.**

פיתחנו קודם את התוצאה

$$I_{\max} = \frac{B_{\max}}{n}\left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}\right) \tag{68}$$

בהנחה שהחומר המגנטי אידיאלי ($\mu_c \to \infty$) נקבל

$$I_{\max} = \frac{B_{\max} l_g}{n\mu_0} \tag{69}$$

ב. השראות רצויה.

פיתחנו קודם את התוצאה

$$L = \frac{n^2 A_c}{\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0}} \tag{70}$$

בהנחה שהחומר המגנטי אידיאלי ($\mu_c \to \infty$) נקבל

$$L = \frac{n^2 A_c \mu_0}{l_g} \tag{71}$$

ג. התנגדות המוליכים.

ההתנגדות הינה

$$R = \rho \frac{\text{length of the wire}}{A_w} \tag{72}$$

נציב

$$\text{length of the wire} = n(MLT) \tag{73}$$

כאשר n הוא מספר הליפופים, ו - MLT הוא האורך הממוצע של ליפוף בודד, ונקבל

$$R = \rho \frac{n(MLT)}{A_w} \tag{74}$$

ד. שטח החלון.

כפי שהוזכר קודם:

$$nA_w \le K_u W_A \tag{75}$$

קיבלנו ארבעה אילוצי תכנון:

$$\begin{aligned} I_{\max} &= \frac{B_{\max} l_g}{n\mu_0} & L &= \frac{n^2 A_c \mu_0}{l_g} \\ R &= \rho \frac{n(MLT)}{A_w} & nA_w &\le K_u W_A \end{aligned} \tag{76}$$

נציב את המשוואות זו בזו ונקבל אילוץ יחיד

$$\frac{A_c^{\,2} W_A}{(MLT)} \ge \frac{\rho L^2 I_{\max}^{\,2}}{B_{\max}^{\,2} R K_u} \tag{77}$$

בצד ימין של המשוואה מופיעים יעדי התכנון, וגדלים ידועים נוספים.
בצד שמאל של המשוואה מופיעים גדלים המתארים את הגיאומטריה של הליבה.

נגדיר את הביטוי בצד שמאל להיות הקבוע הגאומטרי של הליבה :

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \tag{78}$$

ניתן לחשוב על K_g כקבוע המאפיין את ה"גודל האפקטיבי" של הליבה, בהקשר של תכנון סליל.

בהתאם להגדרה זו מתקבל האילוץ

$$K_g \geq \frac{\rho L^2 I_{\max}^2}{B_{\max}^2 R K_u} \tag{79}$$

משוואה זו היא קו מנחה לבחירת ליבה בגודל מתאים.
כעת נסקור את השלבים בתכנון הסליל.

א. בהינתן קטלוג של ליבות אפשריות, בחרו ליבה בעלת גודל מתאים.

הליבה שבחרתם חייבת לקיים את האילוץ $K_g \geq \frac{\rho L^2 I_{\max}^2}{B_{\max}^2 R K_u}$.

רשמו את נתוני הליבה שבחרתם: A_c, W_A, MLT .

(לשם דוגמא, בטבלה למטה מפורטים נתונים של מספר ליבות נפוצות).

ב. קבעו את אורך חריץ האוויר.

$$l_g = \frac{\mu_0 L I_{\max}^2}{B_{\max}^2 A_c} \tag{80}$$

תוצאה זו מתקבלת מהצבת האילוצים זה בזה (דילגנו על האלגברה).

ג. קבעו את מספר הליפופים.

$$n = \frac{L I_{\max}}{B_{\max} A_c} \tag{81}$$

(עגלו את התוצאה למספר שלם)

ד. בחרו את עובי החוט.

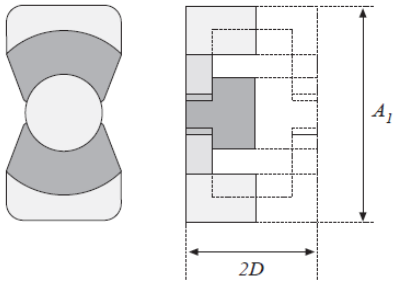
$$A_w \leq \frac{K_u W_A}{n} \tag{82}$$

ה. חשבו בקירוב את ההתנגדות של הסליל.

$$R = \frac{\rho n (MLT)}{A_w} \tag{83}$$

הטבלה הבאה מפרטת את המימדים של מספר ליבות מגנטיות מסחריות בשם PQ.
שימו לב לקבוע K_g המופיע בעמודה השנייה.

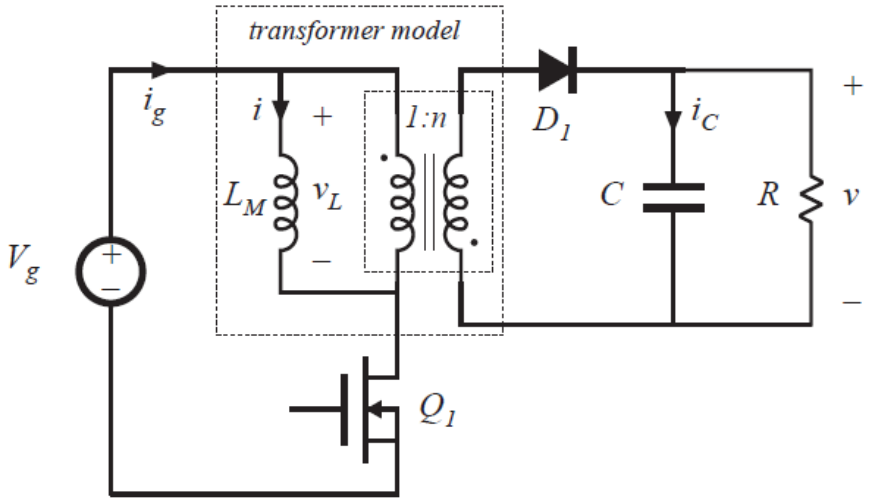
A2.5 PQ core data



Core type ($A_1/2D$) (mm)	Geometrical constant K_{g_5} cm^5	Geometrical constant K_{gfe} cm^x	Cross-sectional area A_c (cm^2)	Bobbin winding area W_A (cm^2)	Mean length per turn MLT (cm)	Magnetic path length l_m (cm)	Core weight (g)
PQ 20/16	$22.4\cdot10^{-3}$	$3.7\cdot10^{-3}$	0.62	0.256	4.4	3.74	13
PQ 20/20	$33.6\cdot10^{-3}$	$4.8\cdot10^{-3}$	0.62	0.384	4.4	4.54	15
PQ 26/20	$83.9\cdot10^{-3}$	$7.2\cdot10^{-3}$	1.19	0.333	5.62	4.63	31
PQ 26/25	0.125	$9.4\cdot10^{-3}$	1.18	0.503	5.62	5.55	36
PQ 32/20	0.203	$11.7\cdot10^{-3}$	1.70	0.471	6.71	5.55	42
PQ 32/30	0.384	$18.6\cdot10^{-3}$	1.61	0.995	6.71	7.46	55
PQ 35/35	0.820	$30.4\cdot10^{-3}$	1.96	1.61	7.52	8.79	73
PQ 40/40	1.20	$39.1\cdot10^{-3}$	2.01	2.50	8.39	10.2	95

תכנון בסיסי של שנאי בממיר Flyback

נתבונן בממיר Flyback שנראה כך:



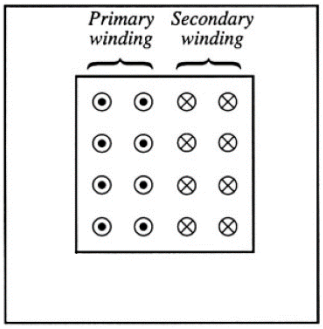
נזכיר שהשנאי בממיר Flyback אינו שנאי טיפוסי, מכיוון שאינו מתפקד כ"שנאי אידיאלי". בפרט, השראות המגנוט אינה גורם פרזיטי, אלא משמשת כחלק חשוב בממיר. מסיבה זו מתכננים את השראות המגנוט להיות קטנה יחסית, ולא "אינסופית" כמו בשנאי אידיאלי.

למעשה, ניתן לחשוב על השנאי בממיר Flyback כשני סלילים החולקים ליבה משותפת.

- בחלק הראשון של המחזור הסליל הראשון מוליך, והסליל השני מנותק.
- בחלק השני של המחזור הסליל השני מוליך, והסליל הראשון מנותק.

משום כך, ניתן לתכנן את השנאי בממיר Flyback כסליל, בעזרת אותו תהליך שראינו קודם. ההבדל היחיד יהיה בחירה שונה של שטח החלון (הקבוע W_A), וזאת משום שיש להכניס שני סלילים לאותו חלון.

לרוב בוחרים שטח ליפופים זהה פחות או יותר לשני הסלילים, כפי שמתואר באיור הבא:



ניתן להראות (אבל לא נעשה זאת) שבחירה זו ממזערת את הפסדי ההולכה בהתקן. לפי קו מנחה זה, להלן שיטה בסיסית לתכנון השנאי.

תחילה קבעו את נתוני התכנון:

- L - השראות המגנוט הרצויה (כאשר היא מיוצגת בצד שמאל).
- R - ההתנגדות הטורית של הסליל הראשוני (השמאלי)
- $I_{\max}$ - הזרם המקסימאלי הדרוש בהשראות המגנוט (כאשר היא מיוצגת בצד שמאל)

שלבי התכנון:

א. תכננו את הסליל הראשוני (השמאלי) בעזרת השיטה שלמדנו. במהלך התכנון השתמשו בקבוע W_A שהוא חצי מזה הנתון בדפי הנתונים של הליבה. לדוגמא, אם בדפי הנתונים מופיע ערך $W_A = 2.5\ \text{cm}^2$, אז יש לבחור לצורך החישובים $W_A = 1.25\ \text{cm}^2$. שימו לב שגם הקבוע K_g משתנה בהתאם. לדוגמא, אם בדפי הנתונים נתון $K_g = 1.2\ \text{cm}^5$, אז לצורך התכנון יש להשתמש בערך של $K_g = 0.6\ \text{cm}^5$.

ב. קבעו את מספר הליפופים בסליל המשני (הימני), לפי יחס ההשנאה הרצוי $n_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) n_1$.

ג. קבעו את עובי החוט בסליל המשני כך שיכנס בחצי החלון:

$$A_{w,2} \le \frac{K_u W_A}{n_2} \qquad (84)$$

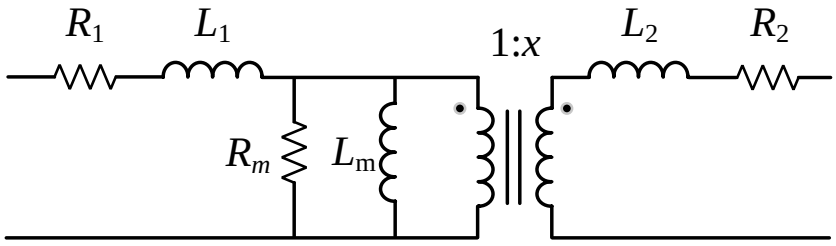
גם כאן יש להשתמש בקבוע W_A שהוא חצי מזה הנתון בדפי הנתונים.

יש לזכור ששיטת תכנון זו מיועדת לסלילים בעלי אדוות זרם נמוכה. לעיתים קרובות ממירי Flyback עובדים ב – DCM עם אמפליטודת זרם גבוהה. במקרה זה יש לקחת בחשבון הפסדים נוספים, והשיטה שצוינה פה לא תהיה אופטימאלית.

בכל מקרה, יש להתייחס לשיטות המוצגות בהרצאה זו בזהירות, ולבצע התאמות לפי הצורך. בשל האילוצים הרבים תכנון של התקנים מגנטיים הוא אומנות, ואין שיטה אחת שתעבוד בכל המקרים.

חומר העשרה – ניסוי קצר וניסוי נתק

ניסוי קצר וניסוי נתק הם ניסויים מקובלים למדידת פרמטרים של שנאים.
נתבונן בשנאי שמיוצג על ידי המעגל השקול הבא:



במעגל זה:

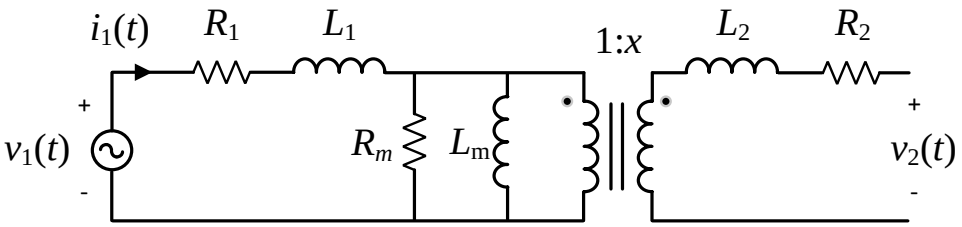
- יחס המתחים של השנאי האידיאלי הוא $1:x$
- L_m הינה השראות המגנוט
- R_m מייצג הפסדים בליבה המגנטית (הפסד ממוצע על מחזור)
- L_1, L_2 הינן השראויות הזליגה
- R_1, R_2 מייצגים הפסדים אוהמיים במוליכים (הפסדי נחושת)

כפי שראינו במהלך ההרצאה זהו מודל מקורב של השנאי. בפרט, המודל מניח משטר עבודה מגנטו-קוואזי-סטטי (ולכן אינו מתאר קיבולים), אינו מתאר במדויק תופעות של היסטרזיס ורוויה בליבה המגנטית, וגם אינו לוקח בחשבון את השינוי של ההשראויות וההתנגדויות כפונקציה של התדר. למרות זאת, מודל זה יחסית מדויק, ושימושי עבור תדר מיתוג קבוע.

ניסוי קצר וניסוי נתק מסתמכים על היחסים הבאים, שמתקיימים בשנאים טיפוסיים:

$$L_m \gg L_1, L_2 \qquad R_m \gg R_1, R_2 \tag{85}$$

בניסוי <u>נתק</u> מודדים את יחס ההשנאה (x), השראות המגנוט (L_m), וההפסדים בליבה המגנטית (R_m).
במהלך הניסוי מחברים מקור מתח בראשוני, ומנתקים את המשני:



המתח $v_1(t)$ נבחר להיות סינוסואידלי, עם תדר $\omega = 2\pi f$. משום כך כל האותות הנמדדים בניסוי הם סינוסואידלים, וניתן לייצג אותם באמצעות פאזורים:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= |V_1|\cos(\omega t) \\ v_2(t) &= |V_2|\cos(\omega t + \measuredangle V_2) \\ \vdots \quad & \quad \vdots \end{aligned} \tag{86}$$

התדר ω נבחר להיות תדר העבודה הנומינאלי (תדר המיתוג המתוכנן), והמתח $|V_1|$ נבחר להיות מתח העבודה הנומינאלי בצד הראשוני. נהוג לבחור את $|V_1|$ להיות המתח הגבוה ביותר שבו השנאי אינו ברוויה.

כעת, מכיוון ש $L_m \gg L_1$ וגם $R_m \gg R_1$ מקבלים בקירוב

$$x \approx |V_2| / |V_1| \tag{87}$$

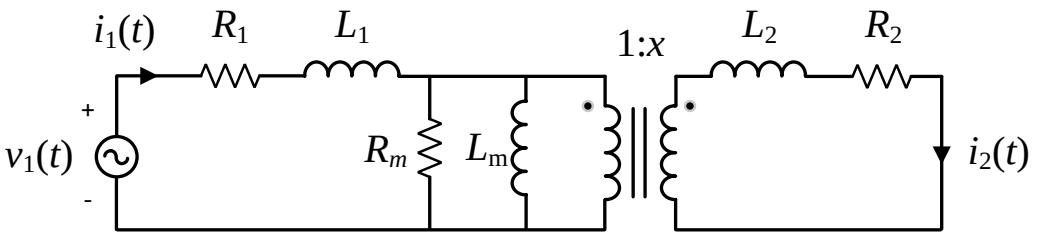
וכך ניתן למדוד במקורב את יחס ההשנאה.
בנוסף מתקיים

$$R_m \parallel (j\omega L_m) \approx V_1 / I_1 \tag{88}$$

ולכן

$$R_m = \frac{1}{\mathrm{Re}\{I_1 / V_1\}} \quad , \quad L_m = \frac{-1}{\omega \cdot \mathrm{Im}\{I_1 / V_1\}} \tag{89}$$

בניסוי <u>קצר</u> מודדים את יחס ההשנאה (x), ואת האלמנטים הטוריים. במהלך הניסוי מחברים מקור מתח בראשוני, ומקצרים את המשני:



המתח $|V_1|$ נבחר כך שאמפליטודת הזרם $|I_1|$ תהיה שווה לערכה הנומינאלי. לדוגמא, אם השנאי מתוכנן לתמוך בזרם שיא של 5 A בצד הראשוני, בוחרים את $|V_1|$ כך ש $|I_1| = 5\text{ A}$.

כעת, מכיוון ש $L_m \gg L_1, L_2$ וגם $R_m \gg R_1, R_2$ מקבלים בקירוב

$$x \approx |I_1| / |I_2| \tag{90}$$

וכך ניתן למדוד במקורב את יחס ההשנאה. אם המודל שבו השתמשנו נכון, התוצאה צריכה להיות קרובה מאוד לתוצאה שהתקבלה קודם בניסוי נתק.

בנוסף מתקיים

$$R_1 + \frac{R_2}{x^2} + j\omega\left(L_1 + \frac{L_2}{x^2}\right) \approx \frac{V_1}{I_1} \tag{91}$$

ולכן

$$R_1 + \frac{R_2}{x^2} \approx \mathrm{Re}\left\{\frac{V_1}{I_1}\right\} \quad , \quad L_1 + \frac{L_2}{x^2} \approx \frac{1}{\omega}\mathrm{Im}\left\{\frac{V_1}{I_1}\right\} \tag{92}$$

כאשר

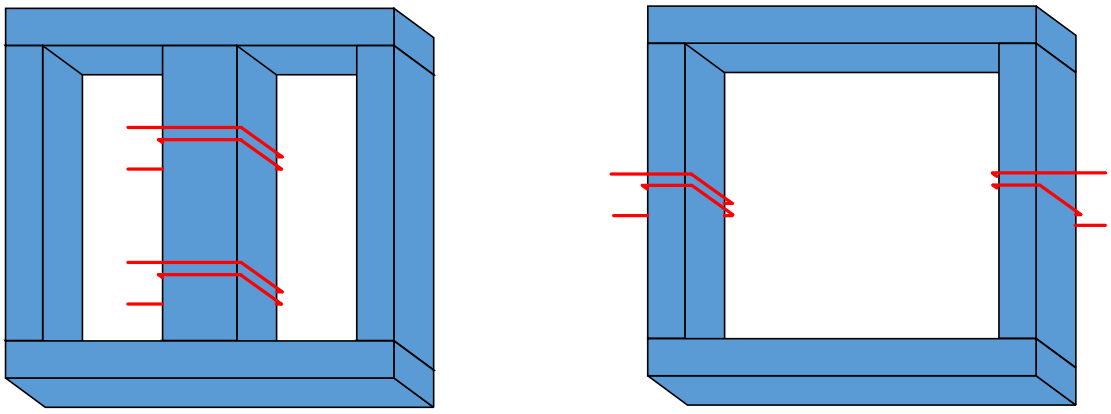
- $R_1 + \frac{R_2}{x^2}$ היא ההתנגדות הטורית הכוללת, כפי שהיא נמדדת בצד הראשוני.
- $L_1 + \frac{L_2}{x^2}$ היא ההשראות הטורית הכוללת, כפי שהיא נמדדת בצד הראשוני.

לפי מבנה השנאי ניתן להסיק על היחס בין האלמנטים השונים. לדוגמא בשנאי קלאסי טיפוסי:

$$\begin{aligned} R_1 &\approx \frac{R_2}{x^2} \quad \Rightarrow \quad R_1 \approx \frac{1}{2}\left(R_1 + \frac{R_2}{x^2}\right) \quad , \quad R_2 \approx \frac{x^2}{2}\left(R_1 + \frac{R_2}{x^2}\right) \\ L_1 &\approx \frac{L_2}{x^2} \quad \Rightarrow \quad L_1 \approx \frac{1}{2}\left(L_1 + \frac{L_2}{x^2}\right) \quad , \quad L_2 \approx \frac{x^2}{2}\left(L_1 + \frac{L_2}{x^2}\right) \end{aligned} \tag{93}$$

חומר העשרה – כיצד מבנה השנאי משפיע על השראויות הזליגה

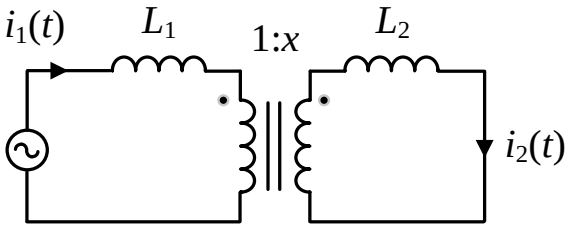
כפי שראינו בהרצאות הקודמות, פרמטר חשוב של השנאי הוא השראות הזליגה שלו. בפרט ראינו שבממירים ממותגים השראות הזליגה גורמת לצלצולי מתח ולהפסדי מיתוג. ננסה כעת להבין כיצד מבנה השנאי משפיע על השראויות הזליגה. לדוגמא, נניח שמתכנן מתלבט בין שני מבנים אפשריים:



(a) (b)

באיזה מבנה השראות הזליגה נמוכה יותר?

על מנת להבין זאת, נתבונן בשנאי חסר הפסדים עם השראות מגנוט "אינסופית", ונבצע ניסוי קצר:



האנרגיה המגנטית האגורה בהתקן הינה

$$E = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \tag{94}$$

ומכיוון ש $i_2 = i_1 / x$,

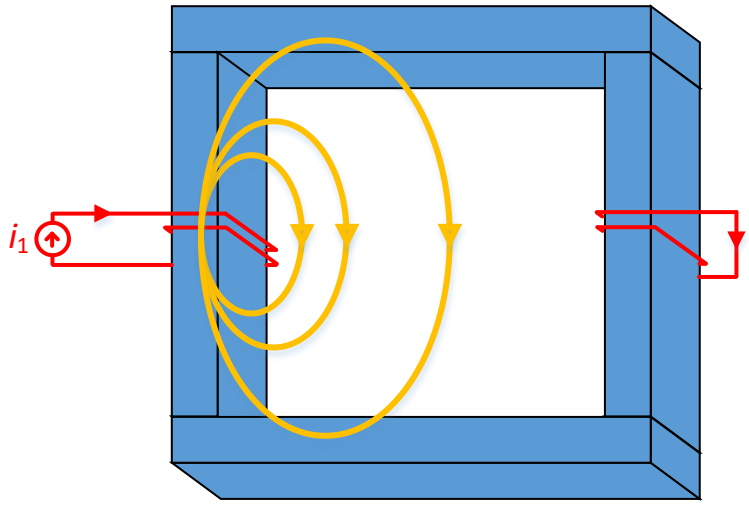
$$E = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 \frac{i_1^2}{x^2} = \frac{1}{2}\left(L_1 + \frac{L_2}{x^2} \right) i_1^2 \tag{95}$$

או בצורה שקולה

$$\begin{aligned} L_1 + \frac{L_2}{x^2} &= \frac{2}{i_1^2} E \\ &= \frac{2}{i_1^2} \left(\text{total magnetic energy in the device} \right) \end{aligned} \tag{96}$$

לפי משוואה זו, השראות הזליגה הכוללת (כאשר היא נמדדת בצד הראשוני) <u>פרופורציונית לאנרגיה האגורה בהתקן במהלך ניסוי קצר</u>.

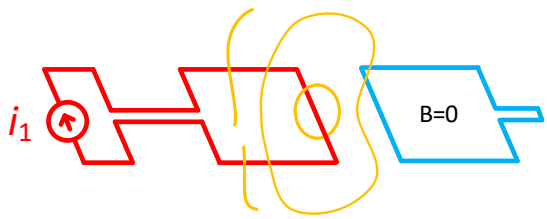
להלן דוגמא:



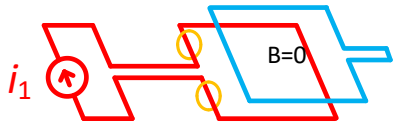
באיור מחובר מקור זרם i_1 לצד הראשוני, והצד המשני מקוצר. קווי השטף המגנטי מתוארים באופן איכותי. לפי המשוואה שפיתחנו קודם, השראות הזליגה פרופורציונית לאנרגיה המגנטית האגורה בהתקן:

$$L_1 + \frac{L_2}{x^2} = \frac{2}{i_1^2} \iiint \frac{1}{2} H \cdot B dv \qquad (97)$$

תוצאה זו מאפשרת לחשב את השראות הזליגה, וגם עוזרת לנו להבין כיצד המבנה של השנאי משפיע על השראות זו. ככלל, ככל ששני ליפופים קרובים וחופפים יותר זה לזה, כך השראות הזליגה ביניהם נמוכה יותר. לדוגמא:



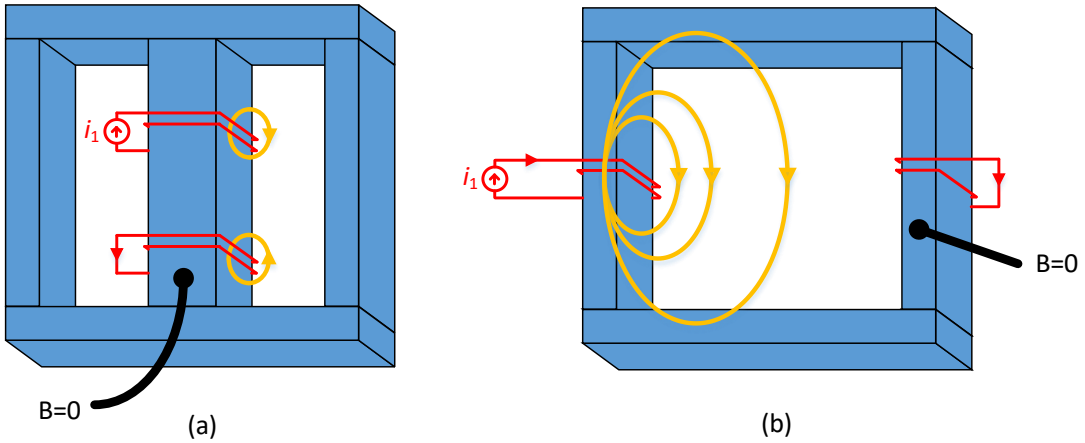
- high magnetic energy
- high leakage inductance



- low magnetic energy
- low leakage inductance

בשתי הדוגמאות הלולאה הימנית מקוצרת, ולכן לא מושרה בה מתח, ואין בה שדה מגנטי (לפי חוק פאראדיי). משום כך, ככל שהחפיפה בין הלולאות טובה יותר, האנרגיה המגנטית הכוללת בהתקן נמוכה יותר, ולכן גם השראות הזליגה קטנה יותר.

אותו כלל איכותי תקף גם במבנים כלליים. לדוגמא, בשני המבנים שראינו קודם, נתבונן בשדות בהתקן בזמן ניסוי קצר:

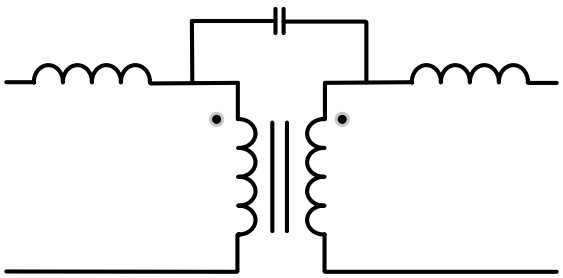


בסביבה הקרובה של הליפוף המקוצר אין שטף מגנטי. משום כך, ככל שהליפופים קרובים יותר זה לזה כך האנרגיה המגנטית בהתקן נמוכה יותר, והשראות הזליגה נמוכה יותר.

<u>קיבול פרזיטי, והבידוד בין ראשוני ומשני</u>

אם כך, מדוע שלא נלפף תמיד את שני הסלילים זה על זה, וכך נקטין את השראות הזליגה?

הצד השני של המטבע הוא קיבול פרזיטי בין הסלילים. כאשר הסלילים קרובים זה לזה נוצר ביניהם <u>שדה חשמלי</u> משמעותי, שיוצר קיבול פרזיטי:



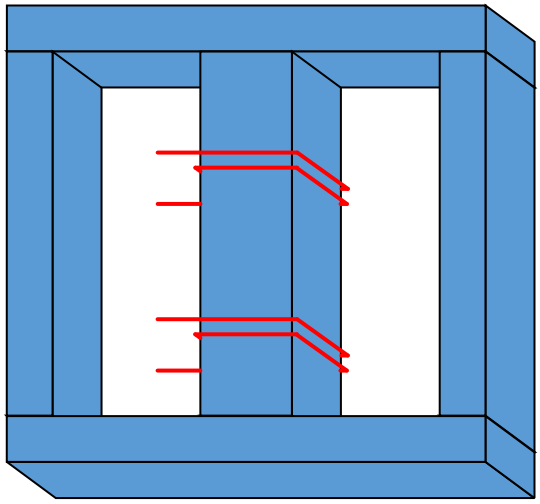
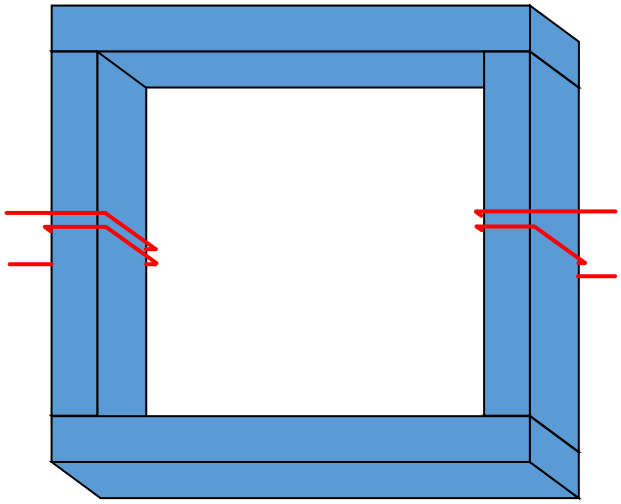
קיבול זה אינו רצוי כמובן, ומפריע לפעילותו התקינה של השנאי. בנוסף, שדה חשמלי חזק מספיק יכול לפרוץ את הבידוד ולגרום נזק, ותופעה זו <u>מגבילה את המתח המקסימאלי בין הצדדים</u>. מכיוון שהשדה החשמלי והקיבול גדלים ביחס הפוך למרחק בין הסלילים, ניתן להסיק את הקשר האיכותי הבא:

ככל שהמרחק בין הסלילים קטן יותר

- הקיבול הפרזיטי בין הסלילים גדול יותר,
- המתח המקסימאלי בין הראשוני והמשני קטן יותר.

אבל ראינו קודם שככל שהמרחק בין הסלילים קטן יותר כך השראות הזליגה קטנה יותר. משום כך מתקיים <u>יחס הפוך בין השראות הזליגה, הקיבול הפרזיטי, וחוזק הבידוד</u>.

יחסים אלה מסוכמים באופן איכותי בטבלה הבאה:

כאשר הסלילים קרובים זה לזה: - השראות הזליגה קטנה - הקיבול הפרזיטי בין הסלילים גדול - המתח המקסימאלי בין הסלילים קטן	
כאשר הסלילים רחוקים זה מזה: - השראות הזליגה גדולה - הקיבול הפרזיטי בין הסלילים קטן - המתח המקסימאלי בין הסלילים גדול	

ד"ר יואש לברון,
הפקולטה להנדסת חשמל,
הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל.
yoashl@ee.technion.ac.il