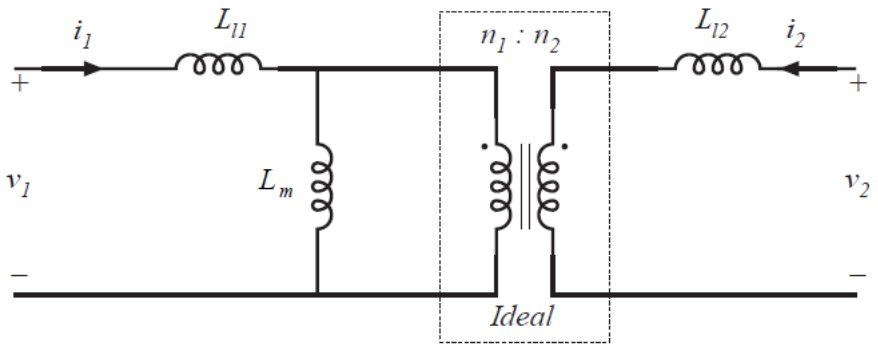
תרגול - ממירי מתח ממותגים
תכנון בסיסי של שנאי "קלאסי"

בתרגול זה נתמקד בתכנון של שנאים "קלאסיים", המשמשים בממירים מבודדים כגון Forward או Full-bridge.

<u>תכונות רצויות של שנאים</u>

נתבונן במודל השקול של שנאי בעל שני ליפופים:



תכונות רצויות של השנאי:

- **אגירת אנרגיה מינימאלית.** עבור מתח נתון, ככל שהשראות המגנוט L_m גבוהה יותר, כך הזרם בהשראות המגנוט i_m נמוך יותר, והאנרגיה $0.5L_m i_m^2$ קטנה יותר. שנאי איכותי הוא בעל השראות L_m גבוהה, ואנרגיה $0.5L_m i_m^2$ נמוכה. מכיוון ששנאים אינם מתוכננים לאגירת אנרגיה, הליבה <u>אינה כוללת חריץ אוויר</u>.

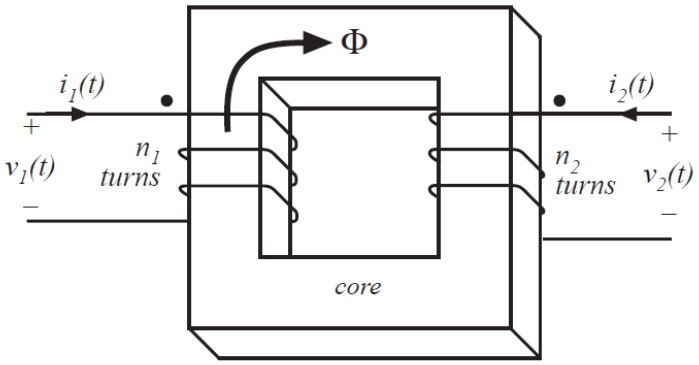
- **השראויות זליגה נמוכות.** השראויות הזליגה הינן גורם פרזיטי אשר גורם להפסדים. כזכור, השראויות הזליגה נתונות ע"י $(1-k)L_i$, כאשר L_i היא ההשראות העצמית, ו - k הוא מקדם הצימוד. ולכן ניתן להקטין את השראויות הזליגה ע"י צימוד טוב בין הסלילים (k גבוה). בתכנון ראשוני נניח בקירוב שהשראויות הזליגה הן אפס (כלומר, $k \approx 1$).

- **הפסדים נמוכים.** ההפסדים בשנאי נובעים משני תהליכים מרכזיים:
  - *הפסדים בליבה המגנטית.* הפסדים אלה מושפעים בעיקר מסוג החומר המגנטי, ומנפח הליבה. על מנת למזער הפסדים אלה יש לבחור חומר מגנטי המתאים לתדר העבודה, ולהקטין את הליבה.

  - *הפסדי נחושת במוליכים.* על מנת למזער הפסדים אלה יש להשתמש במוליכים קצרים ועבים ככל האפשר. כמו כן יש להשתמש בחוטי Litz על מנת להקטין את אפקט הקרום ואפקט הקרבה.

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 .
- נניח שאין שדות מחוץ לליבה המגנטית, והשראויות הזליגה הן אפס (כלומר $k=1$).

מכיוון שאין מקורות מגנטיים B זהה בכל ההתקן.

לפי חוק אמפר:

$$H(t)l_m = n_1 i_1(t) + n_2 i_2(t) \quad \Rightarrow \quad H(t) = \frac{n_1 i_1(t) + n_2 i_2(t)}{l_m} \tag{1}$$

לפי חוק פאראדיי:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= n_1 A_c \frac{dB(t)}{dt} = n_1 \mu A_c \frac{dH(t)}{dt} \\ v_2(t) &= n_2 A_c \frac{dB(t)}{dt} = n_2 \mu A_c \frac{dH(t)}{dt} \end{aligned} \tag{2}$$

נציב את $H(t)$ ונקבל:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m} \frac{d}{dt}\left(i_1 + \frac{n_2}{n_1} i_2 \right) \\ v_2(t) &= \frac{n_2}{n_1} v_1(t) \end{aligned} \tag{3}$$

נגדיר את השראות המגנוט (כאשר היא מיוצגת בסליל 1),

$$L_m = \frac{\mu n_1^2 A_c}{l_m} \tag{4}$$

שוב נציב ונקבל

$$v_1(t) = L_m \frac{d}{dt}\left(i_1 + \frac{n_2}{n_1} i_2 \right)$$
$$v_2(t) = \frac{n_2}{n_1} v_1(t) \qquad (5)$$

משוואות אלה מתארות שנאי אידיאלי <u>עם השראות מגנוט</u> (וללא השראויות זליגה).

<u>רוויה של החומר המגנטי</u>

אילוץ מרכזי בתכנון השנאי הוא שהחומר המגנטי לא יכנס לרוויה, כלומר בליבה יתקיים $|B(t)| \le B_{sat}$.

לפי חוק פאראדיי:

$$v_1(t) = n_1 A_c \frac{dB}{dt} \qquad (6)$$

נבצע אינטגרל לשני האגפים ונקבל:

$$\Delta B = \frac{1}{n_1 A_c} \int_{v_1(t)>0} v_1(t)\,dt = \frac{\lambda}{n_1 A_c} \qquad (7)$$

כאשר:

ΔB הוא השינוי ב - B לאורך המחזור, כלומר $\Delta B = B_{\max} - B_{\min}$.

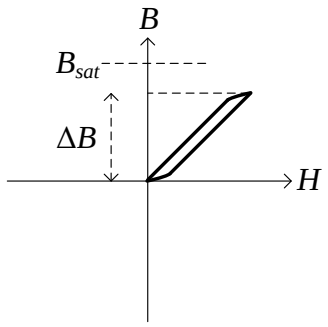
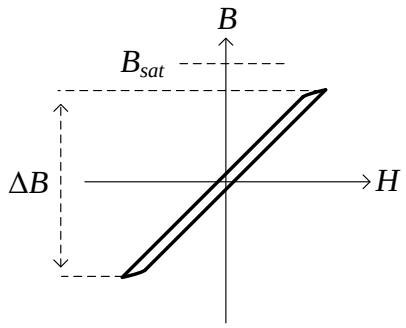
λ הוא האינטגרל על החלק החיובי של המתח בסליל הראשוני.

ולכן, התנאי להימנעות מרוויה הינו

$$\lambda \le n_1 A_c \max\{\Delta B\} \qquad (8)$$

ויש לבחור את שטח החתך של הליבה ואת מספר הליפופים בהתאם לאילוץ זה.

להלן שתי דוגמאות טיפוסיות:

ממיר Forward	**ממיר Full-bridge**
לולאת היסטרזיס:	לולאת היסטרזיס:
	
$\max\{\Delta B\} = B_{sat}$	$\max\{\Delta B\} = 2B_{sat}$
$\lambda \le n_1 A_c B_{sat}$	$\lambda \le 2n_1 A_c B_{sat}$

תכנון בסיסי של שנאי

נניח שנתונים:

- ליבה מגנטית מסוימת, בעלת שטח חתך A_c,
- יחס ליפופים רצוי $n_1 : n_2$, או $n_1 : n_2 : n_3$,
- מתח מסוים $v_1(t)$ בסליל הראשוני.

תכנון בסיסי של השנאי יתבצע לפי השלבים הבאים:

א. חשבו את האינטגרל על החלק החיובי של המתח $\lambda = \int_{v_1(t)>0} v_1(t)\,dt$.

ב. קבעו את מספר הליפופים בסליל הראשוני, כך שהחומר המגנטי לא יכנס לרוויה. לדוגמא,

בממיר Forward: $n_1 \geq \dfrac{\lambda}{A_c B_{sat}}$

בממיר Full-bridge: $n_1 \geq \dfrac{\lambda}{2A_c B_{sat}}$

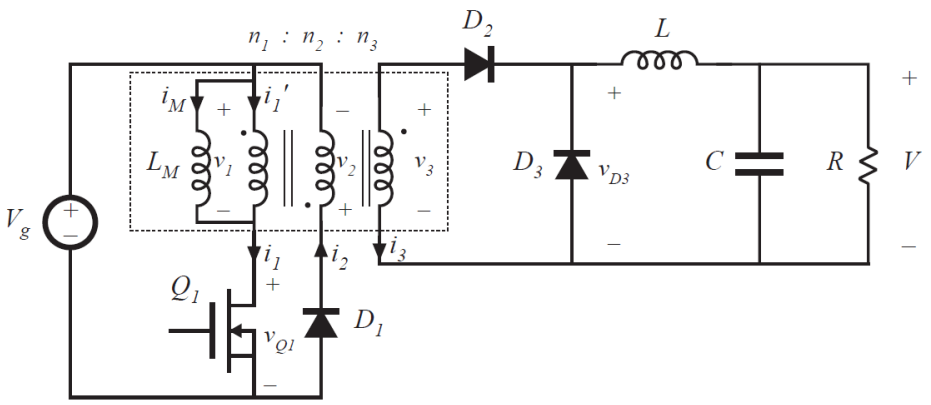
ג. קבעו את מספר הליפופים בסלילים המשניים לפי יחס המתחים הרצוי:

$$n_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) n_1 \;,\quad n_3 = \left(\frac{n_3}{n_1}\right) n_1 \quad \ldots$$

יש לשקול האם כדאי לבחור מספר ליפופים n_1 שהוא גבוה יותר מהערך המינימאלי. ככל שמספר הליפופים גבוה יותר כך השראות המגנוט תגדל לפי $L_m = \mu n_1^2 A_c / l_m$, ועקב כך הזרם בהשראות המגנוט והפסדי הליבה יהיו קטנים יותר. לעומת זאת, ככל שמספר הליפופים גבוה יותר כך המוליך ארוך ודק יותר, מה שיגדיל את הפסדי ההולכה.

תרגיל

נתבונן בממיר מסוג Forward :



הנחות:

- הממיר חסר הפסדים. הדיודות והטרנזיסטור אידיאליים.
- הממיר עובד ב – CCM (כלומר, הזרם בסליל L תמיד חיובי).
- קבל המוצא גדול מאוד, והמתח עליו (V) קבוע.
- השדות המגנטיים מחוץ לליבה זניחים.
- ניתן להניח צימוד מלא בין הסלילים.

נתוני הממיר:

$$V_g = 48\ \text{V} \qquad f_s = 200\ \text{kHz}$$
$$V = 3.3\ \text{V} \qquad D = 0.252$$

נתוני הליבה המגנטית:

$$A_c = 0.41\ \text{cm}^2 \qquad \text{(cross-section area)}$$
$$B_{sat} = 0.14\ \text{T} \qquad \text{(saturation of the core)}$$

<u>סעיף א</u>

חשבו את היחס n_3 / n_1.

<u>פתרון סעיף א</u>

הגבר המתח בממיר Forward הינו

$$V = \frac{n_3}{n_1} D V_g \tag{9}$$

ומכאן

$$\frac{n_3}{n_1} = \frac{V}{DV_g} = \frac{3.3}{0.252 \cdot 48} = 0.2728 \tag{10}$$

<u>סעיף ב</u>

חשבו את היחס n_2 / n_1 כך שהמתח המקסימאלי המתפתח על הטרנזיסטור יהיה $72\ \text{V}$.

<u>פתרון סעיף ב</u>

להלן המתח על הטרנזיסטור בחלקים שונים של המחזור:

- טרנזיסטור מוליך: $v_{Q1} = 0$
- דיודה D_1 מוליכה (איפוס השנאי): $v_{Q1} = V_g \left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right)$
- הטרנזיסטור אינו מוליך, וגם הדיודה D_1 אינה מוליכה: $v_{Q1} = V_g$

  (הזרם בהשראות המגנוט הוא אפס, ולכן $v_1 = 0$)

המתח המקסימאלי הינו $V_g \left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right)$, ומכאן

$$V_g\left(1+\frac{n_1}{n_2}\right)=72\text{ V} \quad \Rightarrow \quad \frac{n_2}{n_1}=\frac{1}{\frac{72\text{ V}}{V_g}-1}=\frac{1}{\frac{72\text{ V}}{48\text{ V}}-1}=2 \tag{11}$$

<u>סעיף ג</u>

חשבו את D המקסימאלי.

<u>פתרון סעיף ג</u>

ה – duty-cycle מוגבל מכיוון שבכל מחזור יש לאפס את הזרם בהשראות המגנוט. הערך המקסימאלי הינו:

$$D\le\frac{1}{1+\frac{n_2}{n_1}}=\frac{1}{1+2}=\frac{1}{3} \tag{12}$$

<u>סעיף ד</u>

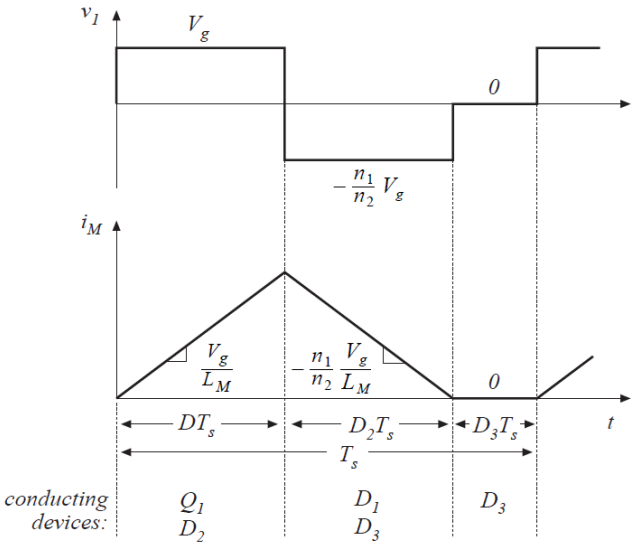
קבעו את מספר הליפופים המינימאלי n_1 כך שהחומר המגנטי לא יכנס לרוויה.

עגל את התוצאה כלפי מעלה.

<u>פתרון סעיף ד</u>

בממיר Forward: $n_1\ge\frac{\lambda}{A_cB_{sat}}$.

המתח בסליל הראשוני והזרם בהשראות המגנוט מוצגים באיור הבא:



האינטגרל על החלק החיובי של המתח הינו

$$\lambda=\int_{v_1(t)>0}v_1(t)\,dt=DT_sV_g=0.252\cdot(5\,\mu\text{s})\cdot(48\text{ V})=60.48\,\mu\text{Vs} \tag{13}$$

ומספר הליפופים המינימאלי הינו

$$n_1 \geq \frac{\lambda}{A_c B_{sat}} = \frac{60.48 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs}}{\left(0.41 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2\right)\left(0.14\ \text{T}\right)} = 10.54$$

$$\Downarrow \tag{14}$$

$$n_1 = 11$$

<u>סעיף ה</u>

השתמשו בתוצאות של הסעיפים הקודמים, וחשבו את n_1, n_2, n_3 .

<u>פתרון סעיף ה</u>

בסעיפים הקודמים קיבלנו

$$\frac{n_3}{n_1} = 0.2728 \quad , \quad \frac{n_2}{n_1} = 2 \quad , \quad n_1 = 11 \tag{15}$$

ולכן

$$\begin{aligned} n_1 &= 11 \\ n_2 &= 22 \\ n_3 &= 3 \end{aligned} \tag{16}$$