ממירי מתח ממותגים (044139)

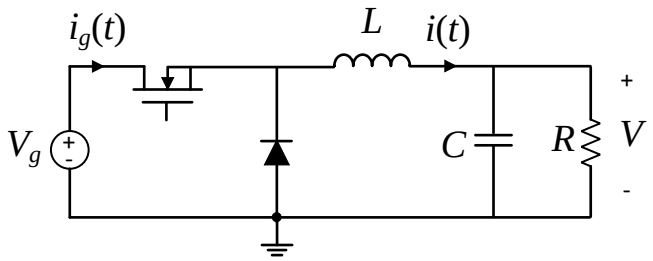
מועד א'
חורף 2022-2023

- משך הבחינה 3 שעות.
- מותר להשתמש בכל חומר עזר כתוב.
- מותר להשתמש במחשבון פשוט.
- השימוש בטלפונים ניידים, מחשבים ניידים או כל רכיב תקשורת אסור.
- יש לענות על כל השאלות.
- מותר ומומלץ להשתמש בקרובים סבירים.
- אין לכתוב את המבחן בעט אדום.
- יש להקפיד על הפרדה ברורה בין הסעיפים השונים.
- יש לנמק באופן מלא את כל שלבי הפתרון.
- יש להדגיש את התשובות הסופיות.

ב ה צ ל ח ה !

שאלה 1 (50 נק')

נתבונן בממיר Buck :



- הממיר פועל במצב יציב.
- קבל המוצא גדול מאוד, והמתח עליו קבוע בקירוב.
- ההספק במוצא הממיר הוא P
- תדר המיתוג הוא f_s
- ה – duty-cycle מסומן ב - D

סעיף א (10 נק')

בסעיף זה בלבד נתונים :

$$V_g = 10\text{ V} \quad L = 16\text{ uH} \quad f_s = 100\text{ kHz} \quad D = 0.8 \quad P = 80\text{ W}$$

וניתן להניח שהממיר חסר הפסדים.

שרטטו את הזרם $i(t)$ כפונקציה של הזמן.

פתרון סעיף א

נניח שהממיר עובד ב – CCM (אחר כך נבדוק אם ההנחה הזו נכונה).
תחת הנחה זו, מתח המוצא נתון על ידי

$$V = DV_g = 0.8 \cdot 10 = 8\text{ V}$$

וזרם המוצא הוא

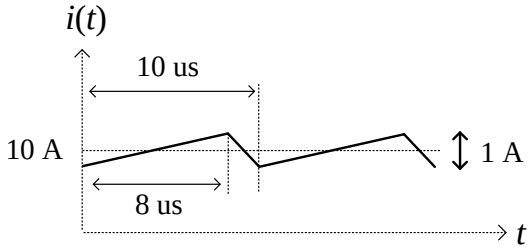
$$I = \frac{P}{V} = \frac{80}{8} = 10\text{ A}$$

(זהו גם הזרם הממוצע בסליל).

השינוי בזרם הסליל בחלק הראשון של המחזור נתון על ידי

$$2\Delta i = \frac{V_g - V}{L} DT_s = \frac{10-8}{16 \cdot 10^{-6}} \cdot 0.8 \cdot 10^{-5} = 1\text{ A}$$

ולכן זרם הסליל נראה כך :



ניתן לראות שזרם הסליל תמיד חיובי, והממיר אכן עובד ב – CCM.

<u>סעיף ב (10 נק')</u>

בסעיף זה בלבד נתונים:

$$V_g = 10\text{ V} \quad L = 50\text{ uH} \quad f_s = 100\text{ kHz} \quad D = 0.5 \quad P = 0\text{ W}$$

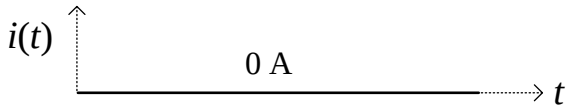
ניתן להניח שהממיר חסר הפסדים, ושמתח המוצא חיובי $(V > 0)$.

חשבו את מתח המוצא V.

<u>פתרון סעיף ב</u>

<u>פתרון ראשון</u>

מכיוון ש $P = 0$ וגם $V > 0$, בהכרח זרם הסליל הממוצע הוא אפס, מכיוון ש $I = P/V$.
מכיוון שזרם הסליל לא יכול להיות שלילי (בגלל הדיודה), הזרם חייב להיות אפס בכל נקודה בזמן, ונראה כך:



שימו לב שהממיר עובד ב – DCM:

- בפרק הזמן $[0, DT_s]$ מוליך הטרנזיסטור.
- בפרק הזמן $[DT_s, T_s]$ גם הטרנזיסטור וגם הדיודה <u>אינם מוליכים</u>.
- (למעשה, הדיודה אינה מוליכה כלל)

כאשר הטרנזיסטור מוליך אין שינוי בזרם הסליל (כי הוא תמיד אפס), וניתן לרשום:

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_g - V}{L} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad V = V_g = 10\text{ V}$$

<u>פתרון שני (לאותו סעיף)</u>

ראינו בהרצאה שהתנאי לכך שממיר Buck עובד ב – DCM הוא

$$\frac{2L}{RT_s} < 1 - D$$

בסעיף זה נתון כי $P = 0$, ולכן העומס השקול במוצא הוא

$$R = \frac{V^2}{P} = \infty$$

(כלומר המוצא למעשה מנותק).

אם נציב את R בנוסחה למעלה, רואים שהתנאי הזה מתקיים, ואכן הממיר עובד ב – DCM.

כמו כן, ראינו בהרצאה את הגבר המתח של ממיר Buck ב – DCM:

$$\frac{V}{V_g}=\frac{2}{1+\sqrt{1+\frac{8L}{RT_sD^2}}}$$

נציב גם כאן $R=\infty$ ונקבל

$$\frac{V}{V_g}=\frac{2}{1+\sqrt{1}}=1 \qquad \Rightarrow \qquad V=V_g=10\text{ V}$$

<u>סעיף ג (10 נק')</u>

בסעיף זה בלבד נתונים:

$$V_g=10\text{ V} \quad L=10\text{ uH} \quad f_s=100\text{ kHz} \quad D=0.5 \quad R=20\ \Omega$$

כאשר R היא ההתנגדות של העומס במוצא הממיר.

ניתן להניח שהממיר חסר הפסדים, ושמתח המוצא חיובי $(V>0)$.

חשבו את מתח המוצא V.

<u>פתרון סעיף ג</u>

ראינו בהרצאה שהתנאי לכך שממיר Buck עובד ב – DCM הוא

$$\frac{2L}{RT_s}<1-D$$

נציב את הנתונים ונקבל:

$$\frac{2\cdot10^{-5}}{20\cdot10^{-5}}<1-0.5 \qquad \Leftrightarrow \qquad 0.1<0.5$$

ולכן הממיר אכן עובד ב – DCM.

המתח במוצא הממיר, כפי שראינו בהרצאה, הוא:

$$V=\frac{2}{1+\sqrt{1+\frac{8L}{RT_sD^2}}}V_g=\frac{2}{1+\sqrt{1+\frac{8\cdot10^{-5}}{20\cdot10^{-5}\cdot0.5^2}}}\cdot10\approx7.66\text{ V}$$

בסעיפים הבאים:

א. נתייחס גם להפסדים בממיר:

- מפל המתח הקדמי על הדיודה (כאשר היא מוליכה) הוא v_f.
- ההתנגדות הטורית של הטרנזיסטור (כאשר הוא מוליך) היא r_{on}.

ב. ניתן להניח שהממיר עובד ב – CCM.

סעיף ד (10 נק')

חשבו את מתח המוצא (V). הביעו את תשובתכם כפונקציה של נתוני המעגל:

$$V_g \ , \ L \ , \ C \ , \ R \ , \ D \ , \ v_f \ , \ r_{on}$$

פתרון סעיף ד

הממיר עובד ב – CCM, ולכן ניתן לרשום את המשוואות "הרגילות" שאנחנו מכירים:

המתח הממוצע על הסליל מתאפס:

$$D\left(V_g - r_{on}I - V\right) + \left(1-D\right)\left(-v_f - V\right) = 0$$

הזרם הממוצע בקבל מתאפס:

$$D\left(I - \frac{V}{R}\right) + \left(1-D\right)\left(I - \frac{V}{R}\right) = 0$$

נסדר את המשוואות ונקבל

$$V = DV_g - DIr_{on} - \left(1-D\right)v_f$$

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

כעת נציב את המשוואה השנייה בראשונה, ונקבל

$$V = DV_g - DV\frac{r_{on}}{R} - \left(1-D\right)v_f$$

$$V = \frac{DV_g - \left(1-D\right)v_f}{1 + D\frac{r_{on}}{R}}$$

סעיף ה (10 נק')

בסעיף זה נתונים:

$$L = 20\ \text{uH} \qquad f_s = 100\ \text{kHz} \qquad V = 5\ \text{V} \qquad D = 0.8 \qquad P = 80\ \text{W}$$

מתכנן המעגל מתלבט בין שלוש דיודות:

	מפל מתח קדמי בהולכה	זרם ממוצע מקסימאלי בדיודה
דיודה א'	$v_f = 0.3\ \text{V}$	10 A
דיודה ב'	$v_f = 0.5\ \text{V}$	15 A
דיודה ג'	$v_f = 0.7\ \text{V}$	20 A

איזו דיודה יש לבחור, על מנת שנצילות הממיר תהיה הגבוהה ביותר?

פתרון סעיף ה

זרם המוצא הוא

$$I = \frac{P}{V} = \frac{80}{5} = 16\ \text{A}$$

והזרם הממוצע בדיודה הוא

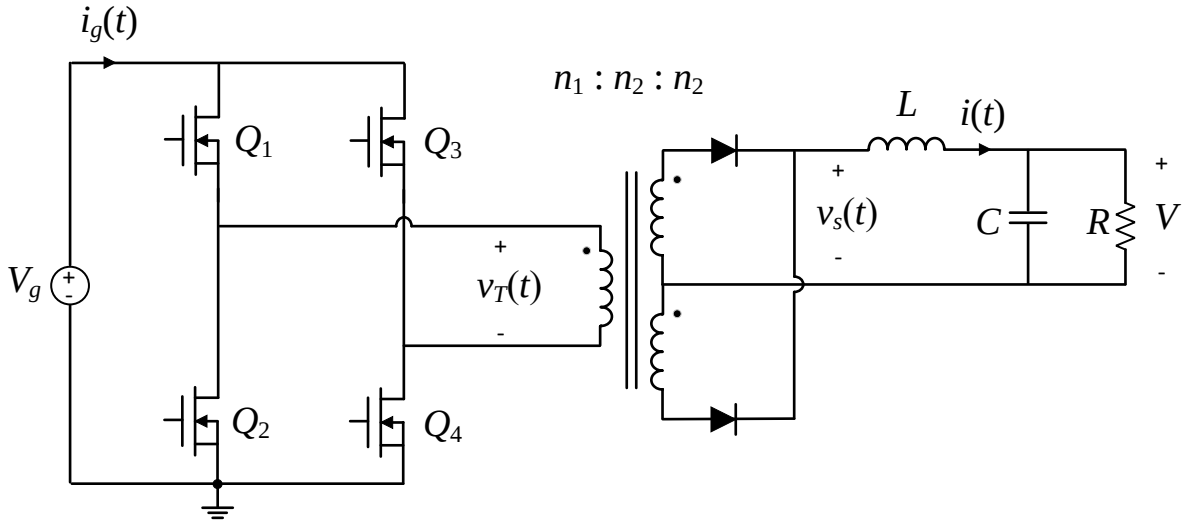
$$I_{avg} = (1-D)I = (1-0.8)16 = 3.2\ \text{A}$$

כל הדיודות מתאימות מבחינת הזרם המקסימאלי שלהן, ולכן כדי לקבל את הנצילות הגבוהה ביותר, יש לבחור את הדיודה שעבורה מפל המתח הקדמי הוא הכי נמוך.

ולכן התשובה היא: דיודה א'

שאלה 2 (50 נק')

שאלה זו עוסקת בממיר Full-bridge, ובתכנון של שנאי. להלן הממיר:

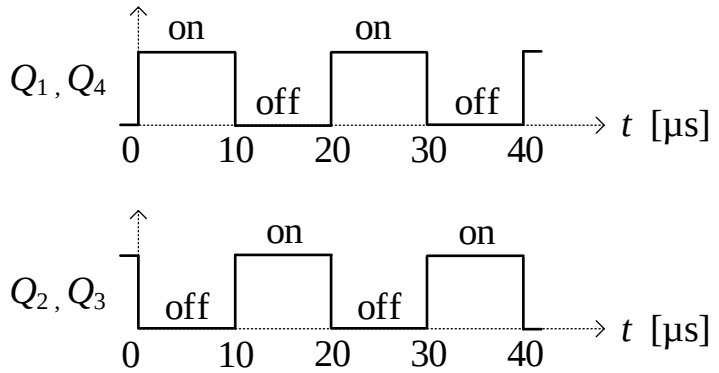


- הממיר פועל ב – CCM ובמצב יציב.
- הממיר חסר הפסדים
- ניתן להתייחס לשנאי כאל שנאי אידיאלי: נזניח את הזרם בהשראות המגנוט, ונניח שהשראות הזליגה היא אפס.
- מספר הליפופים בסליל הראשוני (משמאל) הוא n_1.
- מספר הליפופים בכל אחד מהסלילים מימין הוא n_2.
- קבל המוצא גדול מאוד, והמתח עליו קבוע בקירוב.

נתונים:

$$V_g = 100\ \text{V} \qquad \frac{n_2}{n_1} = 0.1 \qquad R = 2\ \Omega$$

השרטוט הבא מתאר את הטרנזיסטורים שמוליכים בכל נקודת זמן:



באיור זה:
'on' – פירושו שהטרנזיסטור מוליך
'off' – פירושו שהטרנזיסטור אינו מוליך

<u>סעיף א (10 נק')</u>

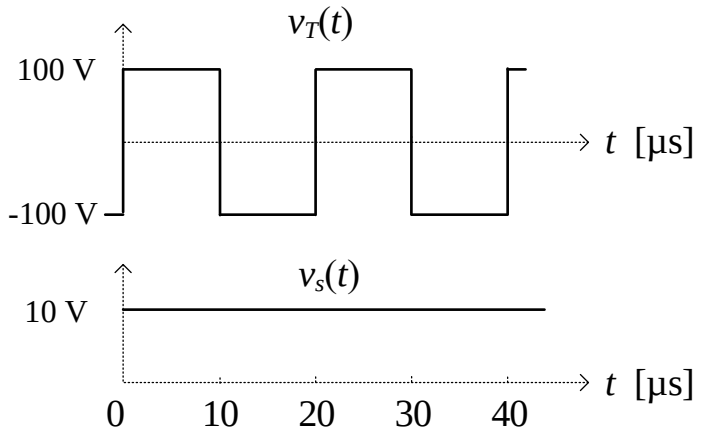
שרטטו את המתחים $v_T(t), v_s(t)$ כפונקציה של הזמן.

<u>פתרון סעיף א</u>

המתח $v_T(t)$ שווה ל- V_g כאשר מוליכים הטרנזיסטורים Q_1, Q_4, ושווה ל- $(-V_g)$ כאשר מוליכים הטרנזיסטורים Q_2, Q_3. המתח $v_s(t)$ נתון על ידי

$$v_s(t) = \frac{n_2}{n_1}\left|v_T(t)\right|$$

להלן המתחים כפונקציה של הזמן:



<u>סעיף ב (10 נק')</u>

חשבו את המתח במוצא הממיר (V), ואת הזרם הממוצע בכניסה לממיר (I_g).

<u>פתרון סעיף ב</u>

לפי הסעיף הקודם ניתן לראות שמתח המוצא הוא

$$V = 10\ \text{V}$$

ואת זרם הכניסה אפשר לחשב לפי שימור הספק:

$$V_g I_g = \frac{V^2}{R} \quad \Rightarrow \quad I_g = \frac{V^2}{V_g R} = \frac{10^2}{100 \cdot 2} = 0.5\ \text{A}$$

בסעיפים הבאים נתונים פרמטרים של הליבה המגנטית של השנאי:

חריץ אוויר	אין
שטח החתך של הליבה המגנטית	$A_c = 1\ \text{cm}^2$
אורך המסלול המגנטי במרכז הליבה	$l_m = 2\ \text{cm}$
פרמאביליות של החומר המגנטי	$\mu = \infty$
רוויה של החומר המגנטי	$B_{sat} = 0.1\ \text{T}$

<u>סעיף ג (10 נק')</u>

בסעיף זה בלבד נתון שמספר הליפופים בצד הראשוני הוא $n_1 = 100$.

שרטטו את $H(t), B(t)$ בליבה המגנטית, כפונקציה של הזמן.

ניתן להניח שהממוצע של $B(t)$ הוא אפס.

<u>פתרון סעיף ג</u>

לפי חוק פאראדיי:

$$v_T(t) = n_1 A_c \frac{dB}{dt}$$

ולכן

$$\Delta B = \frac{\lambda}{n_1 A_c} \qquad with \qquad \lambda = \int_{v_T(t)>0} v_T(\tau) d\tau$$

כאשר

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

λ - הוא האינטגרל על <u>החלק החיובי</u> של המתח $v_T(t)$

נציב מספרים ונקבל

$$\lambda = (100\ \text{V})(10\ \text{us}) = 1000\ \ V\cdot\text{us} = 10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{s}$$

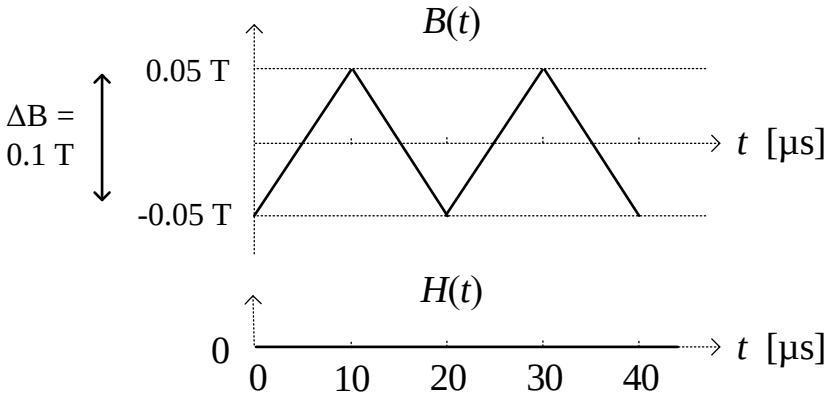
$$\Delta B = \frac{\lambda}{n_1 A_c} = \frac{10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{s}}{100\cdot(1\ \text{cm}^2)} = \frac{10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{s}}{100\cdot(10^{-4}\ \text{m}^2)} = 0.1\,\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} = 0.1\ \text{T}$$

את $H(t)$ ניתן לחשב כך:

$$H(t) = \frac{B(t)}{\mu} = 0$$

וזאת מכיוון שלפי הנתון $\mu = \infty$.

להלן $H(t), B(t)$ כפונקציה של הזמן:



<u>סעיף ד (10 נק')</u>

חשבו את הערך המינימאלי של n_1 שעבורו החומר המגנטי אינו ברוויה.

עבור ערך זה, חשבו גם את n_2.

גם בסעיף זה ניתן להניח שהממוצע של $B(t)$ הוא אפס.

<u>פתרון סעיף ד</u>

נעזר שוב בתוצאה הבאה:

$$\Delta B = \frac{\lambda}{n_1 A_c} \qquad with \qquad \lambda = \int_{v_T(t)>0} v_T(\tau)\,d\tau$$

על מנת שהחומר המגנטי לא יהיה ברוויה, צריך להתקיים

$$\Delta B = \frac{\lambda}{n_1 A_c} \le 2B_{sat} \qquad \Rightarrow \qquad n_1 \ge \frac{\lambda}{2B_{sat}A_c} = \frac{10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{s}}{2(0.1\,\text{T})(1\,\text{cm}^2)} = \frac{10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{s}}{2(0.1\,\text{T})(10^{-4}\ \text{m}^2)} = 50$$

הערך המינימאלי הוא $n_1 = 50$.

עבור ערך זה מקבלים גם

$$n_2 = n_1\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 50\cdot 0.1 = 5$$

ולסיכום התשובה היא

$$n_1 = 50 \qquad n_2 = 5$$

<u>סעיף ה' (10 נק')</u>

בסעיף זה נתון שהתנגדות העומס במוצא הממיר אינסופית, כלומר $R=\infty$.

בנוסף, נניח שהשנאי אינו אידיאלי לחלוטין, ויש לו <u>השראות מגנוט סופית</u> L_m .

כמו בסעיפים הקודמים השראות הזליגה של השנאי היא אפס, והממיר חסר הפסדים.

נסמן:

$i_g(t)$ - הזרם <u>הרגעי</u> בכניסה לממיר.

I_g - הזרם <u>הממוצע</u> בכניסה לממיר.

אילו מהמשפטים הבאים נכון במקרה זה?

א. $i_g(t)=0 \quad \text{and} \quad I_g=0$

ב. $i_g(t)\neq 0 \quad \text{and} \quad I_g=0$

ג. $i_g(t)=0 \quad \text{and} \quad I_g>0$

ד. $i_g(t)=0 \quad \text{and} \quad I_g<0$

ה. $i_g(t)\neq 0 \quad \text{and} \quad I_g>0$

ו. $i_g(t)\neq 0 \quad \text{and} \quad I_g<0$

נמקו את תשובתכם.

(התשובה לא תתקבל ללא נימוק)

<u>פתרון סעיף ה'</u>

התנגדות העומס במוצא הממיר אינסופית, ולכן הספק המוצא הוא $P=0$.

בנוסף, הממיר חסר הפסדים, ולכן:

$$V_g I_g = P = 0 \quad \Rightarrow \quad I_g = 0$$

כלומר, הזרם <u>הממוצע</u> בכניסה לממיר הוא אפס.

אבל השראות המגנוט אינה אינסופית במקרה זה, ולכן חייב להיות זרם $i_g(t)$ <u>שאינו אפס</u> בכניסה לממיר.

זרם זה טוען ופורק את השראות המגנוט של השנאי בחלקים השונים של המחזור.

לסיכום, התשובה הנכונה היא ב':

$$i_g(t)\neq 0 \quad \text{and} \quad I_g=0$$