תוכן העניינים:

מבוא להנדסת חשמל

פונקציות תמסורת והתמרת לפלס

פונקציות תמסורת:

סיכום כללי:

רוחב סרט:

אוסף כל התדרים המרכיבים אות מסוים.

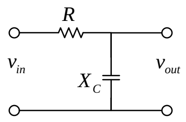
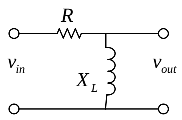
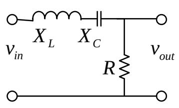
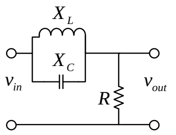
פונקצית תמסורת:

היחס שבין פאזור המוצא לבין פאזור הכניסה של מעגל כלשהו:

1. $H\left(j\omega\right)=\frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_{in}}$
2. $H\left(j\omega\right)=\frac{\hat{i}_{out}}{\hat{v}_{in}}$
3. $H\left(j\omega\right)=\frac{\hat{i}_{out}}{\hat{i}_{in}}$
4. $H\left(j\omega\right)=\frac{\hat{v}_{out}}{\hat{i}_{in}}$

לפונקצית התמסורת מקובל גם לקרוא "תגובת התדר של המעגל".

סוגי מסננים:

מסנן מעביר נמוכים Low Pass Filter	מסנן מעביר גבוהים High Pass Filter	מסנן מעביר פס Band Pass Filter	מסנן חוסם פס Band Stop Filter
			

שאלות:

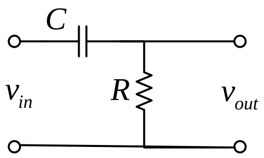
1) לפניך מספר פונקציות תמסורת שונות. קבע את סוגן בכל מקרה:

א. $H(j\omega)=\dfrac{1}{1+j\omega RC}$ ב. $H(j\omega)=\dfrac{j\omega L}{R+j\omega L}$

ג. $H(j\omega)=\dfrac{1-\omega^2 LC}{1-2\omega^2 LC}$ ד. $H(j\omega)=\dfrac{1}{1-\omega^2 LC+j\omega RC}$

ה. $H(j\omega)=\dfrac{R}{jR\left(\omega L-\dfrac{1}{\omega C}\right)+\dfrac{L}{C}}$ ו. $H(j\omega)=\dfrac{R\left(1-\omega^2 LC\right)}{R\left(1-2\omega^2 LC\right)+j\omega L}$

2) לפניך המעגל הבא ובו: $R=1k\Omega$, $C=4\mu F$.



א. כתוב את פונקצית התמסורת של המעגל.

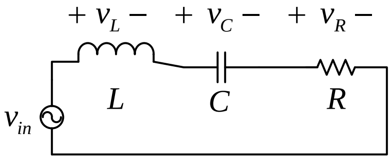
ב. מצא את תדר מחצית ההספק.

ג. מצא את אמפליטודת מתח המוצא עבור מתח כניסה של: $v_{in}(t)=5\sin(10t)\ [v]$.

ד. מצא את אמפליטודת מתח המוצא עבור מתח כניסה: $v_{in}(t)=5\sin(1000t)[v]$.

ה. הסבר את מהות ההבדל בין סעיפים ג' ו-ד'.

3) בשאלה זו נעמוד על המשמעות של גורם האיכות והיכולת לבטא באמצעותו גדלים שונים במעגלים. נתון המעגל RLC טורי הבא:
מסמנים את המתחים על פני כל רכיב כמתואר באיור.



א. מצא את פונקציות התמסורת הבאות:

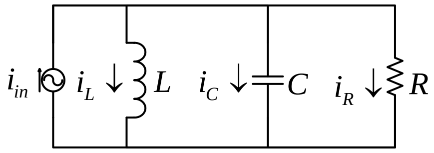
$H_C(j\omega)=\dfrac{\tilde{v}_C}{\tilde{v}_{in}}$, $H_L(j\omega)=\dfrac{\tilde{v}_L}{\tilde{v}_{in}}$, $H_R(j\omega)=\dfrac{\tilde{v}_R}{\tilde{v}_{in}}$.

ב. פשט את הביטויים שקיבלת ע"י הצבה: $\omega_0=\dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ ו- $Q=\dfrac{1}{R}\sqrt{\dfrac{L}{C}}$.

ג. הראה כי עבור אות כניסה סינוסי בתדר ω_0 נקבל כי פונקציות התמסורת של הסליל
והקבל מתבטלים ופונקצית התמסורת של הנגד מעבירה את כל האות.

ד. האם ניתן לומר כי מפל המתח על הסליל או הקבל הוא אפס? נמק.

4) בשאלה זו נעמוד על המשמעות של גורם האיכות והיכולת לבטא באמצעותו גדלים שונים במעגלים. נתון המעגל RLC מקבילי הבא:
מסמנים את הזרמים על פני כל רכיב כמתואר באיור.



א. מצא את פונקציות התמסורת הבאות: $H_R(j\omega)=\frac{\tilde{i}_R}{\tilde{i}_{in}}$, $H_L(j\omega)=\frac{\tilde{i}_L}{\tilde{i}_{in}}$, $H_C(j\omega)=\frac{\tilde{i}_C}{\tilde{i}_{in}}$.

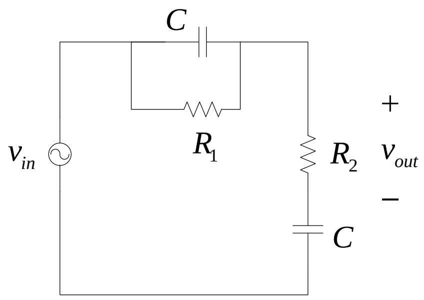
ב. פשט את הביטויים שקיבלת ע"י הצבה: $\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$ ו- $Q=R\sqrt{\frac{C}{L}}$.

ג. הראה כי עבור אות כניסה סינוסי בתדר ω_0 נקבל כי פונקציות התמסורת של הסליל והקבל מתבטלים ופונקצית התמסורת של הנגד מעבירה את כל האות.

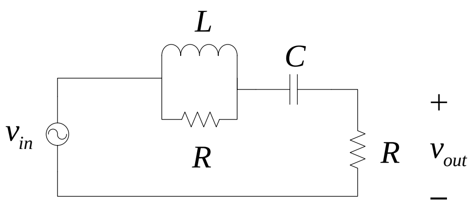
ד. האם ניתן לומר כי הזרם העובר בסליל או בקבל הוא אפס? נמק.

5) מצא את פונקצית התמסורת $H(j\omega)=\frac{\tilde{v}_{out}}{\tilde{v}_{in}}$ בכל אחד מהמעגלים הבאים וקבע איזה סוג מסנן מממש המעגל (הבע באמצעות הפרמטרים של המעגל הנתון):

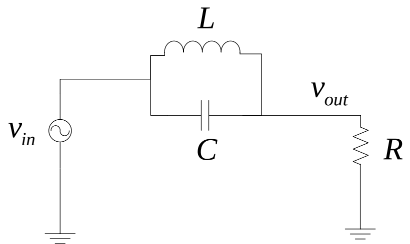
א.



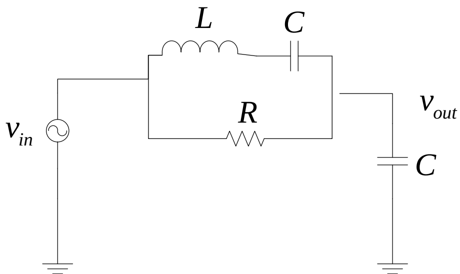
ב.



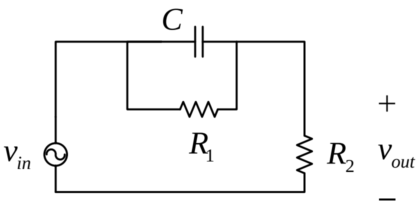
ג.



ד.



6) לפניך המעגל הבא:



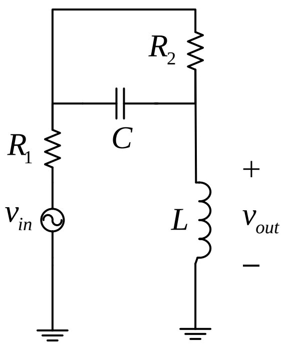
א. מצא את יחס התמסורת: $H(j\omega)=\frac{\tilde{v}_{out}}{\tilde{v}_{in}}$.

ב. בדוק לאלו ערכים שואפת פונקציית התמסורת כאשר $\omega\to 0$ וכאשר $\omega\to\infty$.

ג. צייר גרף תדרי של הערך המוחלט של פונקציית התמסורת.

ד. מה תוכל להסיק על פונקציית התמסורת של המעגל?
האם המעגל הנ"ל מתפקד כמסנן כלשהו? אם כן איזה?

7) המעגל שלפניך מוזן ע"י מקור מתח $v_{in}(t)$ שהוא פונקציה סינוסידיאלית בתדר ω. מתח המוצא של המעגל מסומן על הסליל בתור $v_{out}(t)$ כמתואר באיור.



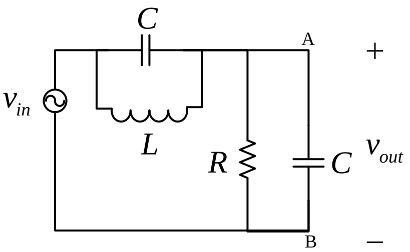
א. מצא את יחס הפאזורים $H(j\omega)=\frac{\tilde{v}_{out}}{\tilde{v}_{in}}$ כפונקציה של R_1R_2C,L,ω.

ב. תחת ההנחה כי $v_{in}(t)$ מתאר כניסה כלשהי למערכת (בתדרים שונים) ו-$v_{out}(t)$ מתאר את מוצא המערכת הנ"ל, איזה סוג של מסנן מממש המעגל?

ג. נתון אות כניסה: $[v]$ $v_{in}(t)=\sqrt{8}\sin\left(10t+\frac{\pi}{3}\right)$.
רכיבי המעגל הם: $L=1mH$, $C=10\mu F$, $R_2=6\Omega$, $R_1=4\Omega$. מצא את $v_{out}(t)$.

ד. כיצד תשתנה התוצאה של הסעיף הקודם אם כעת: $[v]$ $v_{in}(t)=\sqrt{8}\sin\left(10^3t+\frac{\pi}{3}\right)$?

8) נתון המעגל הבא:



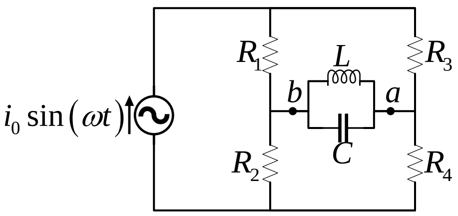
א. מצא את פונקצית התמסורת של המעגל: $H(j\omega)=\frac{\tilde{v}_{out}}{\tilde{v}_{in}}$.

ב. חשב את $|H(j\omega)|$ וקבע באיזה סוג מסנן מדובר. תן הסבר אינטואיטיבי לקביעתך.

ג. מצא עומס בתדר ω_L : $Z_L(\omega_L)$, שיש לחבר בין ההדקים A ו-B על מנת שנקבל עליו הספק ממוצע מירבי בתדר הנ"ל.

ד. נתונים: $C=1\mu F$, $L=10mH$, $R=1\Omega$.
באיזה תדר ירד ההספק על העומס לרבע מערכו המירבי?

9) במעגל שלפניך נתונים: i_0,R_1,R_2,R_3,R_4,C,L.
הנח כי הקבל והסליל הינם אידיאליים.



א. מצא את שקולי נורטון (i_N ו- R_N) שמעגל ה-RLC המקבילי רואה מבעד הנקודות a ו- b.
הערה: תוכל למצוא תחילה את שקולי תבנין, V_{TH} ו- R_{TH} תחילה ואז לבצע המרה למעגל נורטון מתאים.

בסעיפים הבאים תוכל להשתמש ב- i_N ו- R_N כך שהם לא תלויים בתשובה שקיבלת בסעיף א'.

ב. כתוב ביטוי לפונקצית התמסורת $H(j\omega)=\frac{i_{ab}}{i_0}$.
הגדר את ω_0 ו- Q וכלול בביטוי הסופי אך ורק אותם.

ג. מהו סוג המסנן שהמעגל מממש? הסבר ע"י חישוב מתאים.

תשובות סופיות:

1) א. מעביר נמוכים. ב. מעביר גבוהים. ג. חוסם פס.
ד. מעביר נמוכים. ה. מעביר פס. ו. חוסם פס.

2) א. $H(j\omega)=\dfrac{j\omega RC}{1+j\omega RC}$ ב. $f_{1/2}\approx 39.78\text{Hz}$.

ג. $A=0.2\text{V}$ ד. $A=4.85\text{V}$ ה. הפונקציה שמממש המעגל היא HPF ולכן ככל שתדר הכניסה גדול יותר כך אמפליטודת המוצא תהיה גדולה יותר ותשאף לאמפליטודת הכניסה.

3) א. $H_L(j\omega)=\dfrac{-\omega^2LC}{1-\omega^2LC+j\omega RC}$; $H_R(j\omega)=\dfrac{j\omega RC}{1-\omega^2LC+j\omega RC}$

$H_C(j\omega)=\dfrac{1}{1-\omega^2LC+j\omega RC}$.

ב. $H_L(j\omega)=\dfrac{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}$; $H_R(j\omega)=\dfrac{j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}$

$H_C(j\omega)=\dfrac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}$. ד. לא.

4) א. $H_L(j\omega)=\dfrac{1}{1-\omega^2LC+j\omega\frac{L}{R}}$; $H_R(j\omega)=\dfrac{j\omega\frac{L}{R}}{1-\omega^2LC+j\omega\frac{L}{R}}$

$H_C(j\omega)=\dfrac{-\omega^2LC}{1-\omega^2LC+j\omega\frac{L}{R}}$

ב. $H_L(j\omega)=\dfrac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}$; $H_R(j\omega)=\dfrac{j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}$

$H_C(j\omega)=\dfrac{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\frac{\omega}{\omega_0}\frac{1}{Q}}$ ד. לא.

5) א. $H(j\omega)=\dfrac{-\omega^2R_1R_2C+j\omega R_2C}{1-\omega^2C^2R_1R_2+j\omega C(R_2+2R_1)}$, מסנן מעביר גבוהים (HPF).

ב. $H(j\omega)=\dfrac{-\omega^2RLC+j\omega R^2C}{R(1-2\omega^2LC)+j\omega(\omega R^2C+L)}$, מסנן מעביר גבוהים (HPF).

ג. $H(j\omega)=\dfrac{R(1-\omega^2LC)}{R(1-\omega^2LC)+j\omega L}$, מסנן חוסם פס (BSF).

ד. $H(j\omega)=\dfrac{1-\omega^2LC+j\omega RC}{1-\omega^2LC+j\omega RC(2-\omega^2LC)}$, מסנן מעביר נמוכים (LPF).

6) א. $H(j\omega)=\dfrac{R_2(1+j\omega R_1C)}{R_1+R_2+j\omega R_1C}$

ב. $H(j\omega\to 0)=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}$, $H(j\omega\to\infty)=1$

ד. המעגל לא מתפקד כמסנן היות ולא קיים תחום תדרים אותם הוא חוסם.

7) א. $H(j\omega)=\dfrac{-\omega^2R_2LC+j\omega L}{R_1+R_2-\omega^2R_2LC+j\omega(L+R_1R_2C)}$

ב. HPF.

ג. $v_{out}(t)=\sqrt{8}\sin\left(10t+\dfrac{5\pi}{6}\right)\ [v]$

ד. $v_{out}(t)=0.28\sin(1000t+0.81\pi)\ [v]$

8) א. $H(j\omega)=\dfrac{R(1-\omega^2LC)}{R(1-2\omega^2LC)+j\omega L}$

ב. $|H(j\omega)|=\dfrac{R|1-\omega^2LC|}{\sqrt{R^2(1-2\omega^2LC)^2+(\omega L)^2}}$

מסנן חוסם פס (BSF).

ג. $Z_L(\omega_L)=\left(\dfrac{j\omega_L L}{1-2\omega_L^2LC+j\omega_L\dfrac{L}{R}}\right)^*$

ד. $\omega_L\approx 173\dfrac{\text{rad}}{\text{sec}}\ \rightarrow\ f_L\approx 27.56\text{Hz}$.

9) א. $R_N=\dfrac{(R_1+R_3)(R_2+R_4)}{R_1+R_2+R_3+R_4}\ ;\ I_N=\dfrac{R_2(R_3+R_4)-R_4(R_1+R_3)}{(R_1+R_3)(R_2+R_4)}i_0$

ב. $H(j\omega)=\dfrac{\varepsilon\cdot\left(1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)}{1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2+j\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)Q}$

ג. BSF.

התמרות לפלס:

סיכום כללי:

הגדרות:

הגדרה מתמטית של התמרת לפלס: $\Im\{f(t)\}=\int_0^{\infty} f(t)e^{-st}dt$.

התמרת לפלס מתאימה בין לפונקציה $f(t)$, פונקציה חדשה שתסומן $F(s)$.

סימון ההתמרה יהיה באופן הבא: $F(s)=\Im\{f(t)\}$.

טבלת התמרות של פונקציות נפוצות:

שם האות	ערך הפונקציה $f(t)$ עבור $t>0^-$	ערך ההתמרה $F(s)$
הלם (Impulse)	$\delta(t)$	1
מדרגה (Step)	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
רמפה (Ramp)	t	$\frac{1}{s^2}$
דעיכה מעריכית (Exponential)	$e^{-\alpha t}\ ;\ \alpha>0$	$\frac{1}{s+\alpha}$
סינוס (Sine)	$\sin\omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
קוסינוס (Cosine)	$\cos\omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
רמפה דועכת (Dumped ramp)	$te^{-\alpha t}\ ;\ \alpha>0$	$\frac{1}{(s+\alpha)^2}$
סינוס דועך (Dumped sine)	$e^{-\alpha t}\sin\omega t\ ;\ \alpha>0$	$\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$
קוסינוס דועך (Dumped cosine)	$e^{-\alpha t}\cos\omega t\ ;\ \alpha>0$	$\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$

טבלת תכונות ההתמרה:

פעולה	ערך הפונקציה $f(t)$	ערך ההתמרה $F(s)$
כפל בקבוע	$k\cdot f(t)$	$k\cdot F(s)$
חיבור/חיסור	$f_1(t)\pm f_2(t)$	$F_1(s)\pm F_2(s)$
נגזרת ראשונה	$\frac{df(t)}{dt}$	$sF(s)-f(0^-)$
נגזרת כללית	$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$	$s^nF(s)-s^{n-1}f(0^-)-s^{n-2}\frac{df(0^-)}{dt}-s^{n-3}\frac{d^2f(0^-)}{dt^2}-\ldots-\frac{d^{n-1}f(0^-)}{dt^{n-1}}$
אינטגרל זמני	$\int_0^t f(x)dx$	$\frac{F(s)}{s}$
הזזה בזמן	$f(t-a)u(t-a)\ ,\ a>0$	$e^{-as}F(s)$
הזזה במישור לפלס (בתדר)	$e^{-at}f(t)$	$F(s+a)$
שינוי סקלה	$f(at)\ ;\ a>0$	$\frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)$
גזירה במישור לפלס (בתדר)	$tf(t)$	$-\frac{dF(s)}{ds}$
אינטגרציה במישור לפלס (בתדר)	$\frac{f(t)}{t}$	$\int_s^\infty F(x)dx$

קטבים ואפסים של התמרת לפלס:

הביטוי שעליו נבצע התמרה הפוכה מיוצגת ע"י פונקציה רציונאלית מהצורה:

$$F(s)=\frac{P_N(s)}{Q_M(s)}=\frac{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\ldots+a_1s+a_0}{b_ms^m+b_{m-1}s^{m-1}+\ldots+b_1s+b_0}=\frac{k_0\cdot\prod_{n=1}^{N}(s+z_n)}{\prod_{m=1}^{M}(s+p_m)}.$$

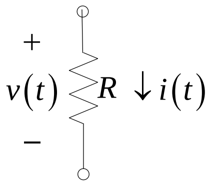
קוטב: ערך s שמאפס את המונה, כלומר: $s_n=-z_n$ הם אפסים של הפונקציה $F(s)$.

אפס: ערך s שמאפס את המכנה, כלומר: $s_n=-p_n$ הם קטבים של הפונקציה $F(s)$.

סימון רכיבים חשמליים במישור לפלס:

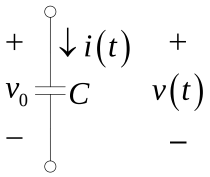
נסמן אותות זמניים באותיות קטנות, כגון : $v=v(t)$ ו- $i=i(t)$,
ואותות במישור לפלס באותות גדולות כגון : $\Im\{v\}=V=V(s)$ ו- $\Im\{i\}=I=I(s)$.

נגד:



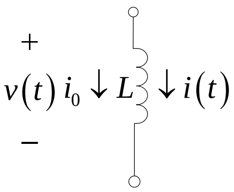
רכיב התנגדות טהורה מקיים את חוק אוהם : $v=i\cdot R$
וכן גם במישור לפלס נקבל : $V=I\cdot R$ מאחר ו- R הוא גודל קבוע.

קבל:



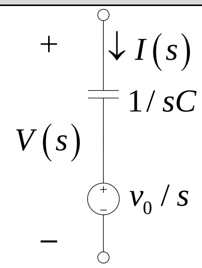
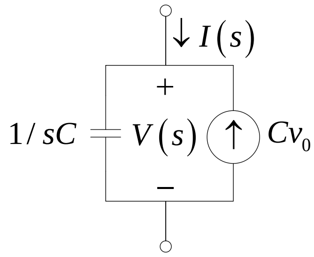
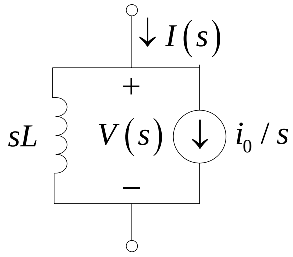
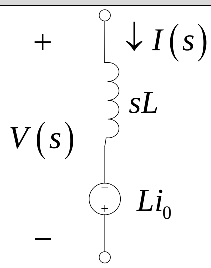
קבל מקיים : $i=C\dfrac{dv_c}{dt}$ ולכן נקבל: $I=C\left[sV-v\left(0^-\right)\right]$
ובפרט אם : $v\left(0^-\right)=0\,\mathrm{V}$ אז נקבל: $I=sCV$.

סליל:



סליל מקיים : $v=L\dfrac{di}{dt}$ ולכן נקבל: $V=L\left(sI-i\left(0^-\right)\right)$
ובפרט אם : $i\left(0^-\right)=0\,\mathrm{A}$ אז נקבל: $V=sLI$.

סכמות הכוללות תנאי התחלה:

<table>
<tr><td>$V=\left(\frac{1}{sC}\right)I+\frac{v\left(0^-\right)}{s}$</td><td>$I=sCV-C\cdot v\left(0^-\right)$</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>$V=sLI-i\left(0^-\right)L$</td><td>$I=\frac{V}{sL}+\frac{i\left(0^-\right)}{s}$</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

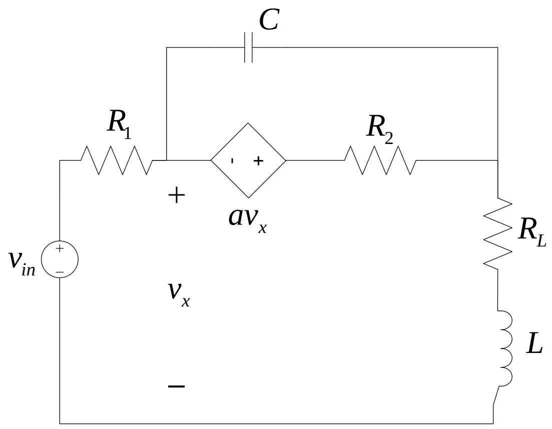
שימוש בהתמרת לפלס במעגלים חשמליים:

התמרת לפלס מאפשרת להפוך משוואות דיפרנציאליות למשוואות אלגבריות.
נבצע את השלבים הבאים :

1) נמיר את כל רכיבי המעגל לביטוי השקול שלהם במישור לפלס.
2) נחבר משוואות לפי חוקי ניתוח מעגלים (KCL , KVL, סופרפוזיציה, שקולי תבנין ונורטון וכו').
3) נבודד את הגודל הרצוי מהמשוואות.
4) נבצע התמרה הפוכה למציאת אות המוצא.

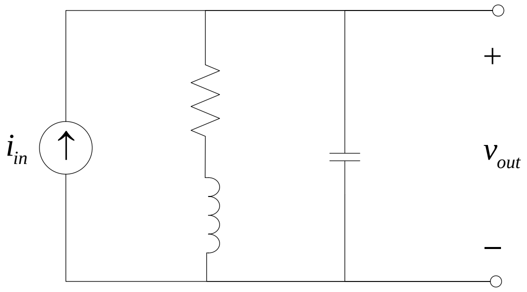
שאלות:

1) לפניך המעגל הבא ובו נתון:
$v_{in}(t)=12u(t)$, $R_1=4\Omega$, $R_2=2\Omega$, $a=0.2$, $R_L=10\Omega$, $C=400\text{mF}$, $L=2\text{H}$.
ידוע כי לא אגורה אנרגיה ברכיבים.



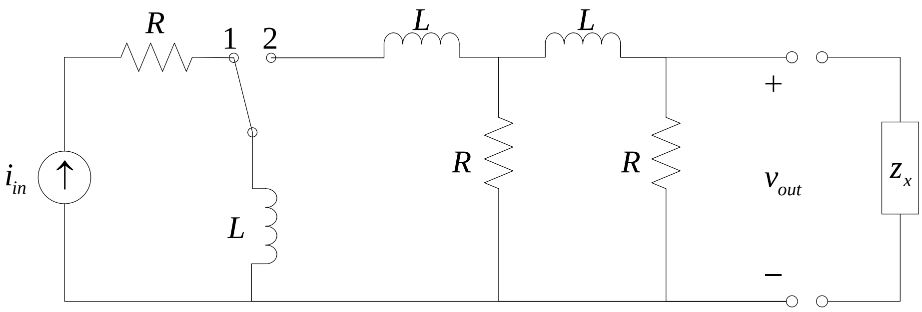
א. מצא את שקול תבנין במישור לפלס.
ב. מצא את הביטוי במישור לפלס עבור הזרם שמגיע לעומס במעגל (כלומר ל- R_L ו- L).
ג. מצא את אות הזרם הזמני שמגיע לעומס ובדוק את נכונות הביטוי שקיבלת.

2) נגד של 2Ω, סליל של 1H וקבל של 0.1F מחוברים באופן המתואר בסמוך.
אות הכניסה הוא i_{in} ומוצא המעגל הוא המתח v_{out}. ידוע כי לא אגורה אף אנרגיה בקבל ובסליל.



א. כתוב את פונקצית התמסורת: $H(s)=\dfrac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)}$.
ב. צייר מפת קטבים ואפסים של פונקצית התמסורת והסבר מה ניתן ללמוד על המעגל.
ג. מוסיפים רכיב לא ליניארי במקביל לקבל אשר הזרם העובר דרכו נתון ע"י הביטוי: $i_x(t)=k\cdot\dfrac{d}{dt}v_L(t)$ כאשר k הוא קבוע חיובי כלשהו. כיצד תשתנה פונקצית התמסורת כעת וכיצד k ישפיע על מפת הקטבים והאפסים שלה?

3) במעגל שלפניך ישנו מקור זרם קבוע בגודל i_0 ומפסק דו-כיווני אשר נמצא במצב 1 במשך הרבה זמן. ברגע $t=0$ מעבירים אותו למצב 2.
כל הסלילים במעגל הם בעלי השראות L וכל הנגדים בעלי התנגדות R.
מסמנים את זרם הכניסה ב- $i_{in}(t)$ ואת מתח המוצא ב- $v_{out}(t)$.
בצד העומס מחובר רכיב כלשהו z_x.

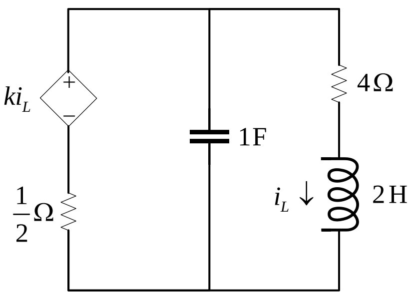


א. מצא ביטוי למתח המוצא במישור לפלס.
ב. ידוע כי z_x מורכב משני רכיבים פאסיביים שונים (לכל היותר) המחוברים יחדיו (בטור או במקביל). האם קיים צירוף של רכיבים עבורו לזרם המוצא תהיה אי-רציפות כלשהי? נמק.

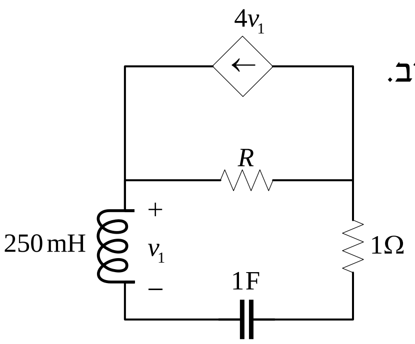
הערה:

השאלות הבאות עוסקות בשימוש בהתמרת לפלס לשם מציאת תחומי יציבות של מעגלים חשמליים.

4) לפניך המעגל הבא:
מצא את התחום של k עבורו המעגל יציב.
כל ערכי רכיבי המעגל נתונים בתרשים.



5) נתון המעגל שלפניך ובו כל ערכי הרכיבים מופיעים.
מצא את תחום הערכים של R עבורו המעגל יהיה יציב.



תשובות סופיות:

1) א. $V_{TH}(s)=\dfrac{24(2s+3)}{s(4s+5)}$, $z_{TH}(s)=\dfrac{34+16s}{5+4s}$.

ב. $I_L(s)=\dfrac{24(2s+3)}{s(8s^2+66s+84)}$ ג. $i_L(t)=\left(\dfrac{6}{7}+0.43e^{-s(8s^2)1.57t}-7.3e^{-6.67t}\right)u(t)$.

2) א. $H(s)=\dfrac{10(s+2)}{s^2+2s+10}$ ב. סרטוט מפת קטבים ואפסים למטה.

ג. $H(s)=\dfrac{R+sL}{s^2(k+C)L+RCs+1}$ הפרמטר k משפיע על הקטבים של פונקצית התמסורת ובכך קובע את מידת האוסילציות שלה.

3) א. $V_{out}(s)=\dfrac{-R^2Li_0}{2L^2s^2+5RLs+R^2}$ ב. לא.

4) המעגל יציב עבור: $-0.5\le k<0.5$.

5) המעגל לא יציב כלל (הוכחה מלאה ניתנת בסרטון הוידאו).

מפת קטבים ואפסים לשאלה 2 סעיף ב: