הגדרות

מקור DC = מקור מתח קבוע.

נתק: Open Circuit (OC)

$$I_s(t)=0\left[Amp=\frac{C}{\sec}\right]$$

קצר: Short Cirtcuit (SC)

$$V_s(t)=0\;[Volt=\frac{Joul}{C}]$$

יחידות – דוגמאות לגדלי יחידות שונים:

$$\mu FH=10^{-6}H$$
$$mF=10^{-3}F$$
$$k\Omega=10^{3}\Omega$$

התנגדות: $R\left[ohm,\Omega\right]$

מוליכות: $G\left[mho,siemens\right]$

נגד: **חוק אוהם** - $V=I\cdot R\Leftrightarrow I=V\cdot G$

קבל:

$$V_C(t)=\frac{1}{c}\int_{-\infty}^{t}I_C\,dt'=V_{C0}+\frac{1}{c}\int_{0}^{t}I_C\,dt'$$
$$I_C(t)=c\frac{dv_C}{dt}$$

- אוגר אנרגיה חשמלית.
- קבל באינסוף במתח שאינו מחזורי - הוא נתק.
- קבל ברגע ראשון הוא קצר (0+).
- קבל בתדר נמוך הוא נתק.

משרן:

$$I_L(t)=\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t}V_L\,dt'=I_{L0}+\frac{1}{L}\int_{0}^{t}V_L\,dt'$$
$$V_L(t)=L\frac{dI_L}{dt}$$

- אוגר אנרגיה מגנטית.
- סליל באינסוף במתח שאינו מחזורי הוא קצר.
- סליל ברגע ראשון הוא נתק (0+).
- סליל בתדר גבוה הוא נתק.

הארקה: מתח בנק' ההארקה = 0.

חוקי קירכהוף (Kirchoff)

KCL: סכום הזרמים הנכנסים **או** היוצאים מסביב לצומת ומסביב לכל רכיב הוא אפס.

KVL: סכום המתחים על לולאה הוא אפס.

הערות:

1. ב- KCL יש להקפיד על אחידות – או שעובדים עם זרמים נכנסים תמיד, או שעובדים עם זרמים היוצאים תמיד.
2. מתח חיובי = מה- "-" ל- "+".
3. ב- KVL יש לבחור כיוון שאיתו הולכים בתוך הלולאה ולשמור עליו לאורך כל הלולאות.
4. **כשמגדירים כיווני זרם ומתח – הזרם יכנס לכל הרכיבים (נגד, משרן קבל ומקורות מבוקרים) דרך ההדק החיובי, מלבד מקור זרם או מתח בו הזרם יהיה בכיוון המתח (יצא מההדק החיובי).**
5. **אם זרם מוגדר כיוצא מההדק החיובי, ברכיב שאינו מקור, צריך לקחת את המתח ב- "-".**

צורות גל

פונקציית ראמפ (Step) – r (רציפה):

$$3r(t-1)=r(3t-3)=\begin{cases}0 & t<1\\ 3t-3 & t\ge 1\end{cases}$$
$$3r(t-1)=3\int_{-\infty}^{+\infty}u(t-1)\,d(t-1)=$$
$$=3(t-1)\cdot u(t-1)=(3t-3)\cdot u(t-1)$$

קו ישר בגובה מסוים - $r(a\cdot t)-r(a\cdot t-b)$

פונקציית מדרגה (Unit) - u (תמיד שווה ל-0 או 1):

$$u(t-3)=\begin{cases}0 & t<0+3\\ 1 & t\ge 0+3\end{cases}$$

פונקציית הלם (Impulse / Delta) - δ:

$$\delta(t)=\frac{dU(t)}{dt}\Rightarrow\int_{0-}^{0+}\delta(t)dt=1$$

הערות:

$$u(at+b)=\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(at+b)=\frac{1}{a}u(at+b)\Big|_{-\infty}^{+\infty}=$$
$$=\frac{1}{a}\cdot 1-0=\frac{1}{a}$$

פונקציית דובלט:

$$\delta_1(t)=\frac{d}{dt}\delta(t)$$

פונקציית פולס (Pulse) - p:

$$p(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1/\Delta & 0<t<\Delta\\ 0 & t>0\end{cases}\Rightarrow\int_{-\infty}^{+\infty}P(t)dt=1$$

זהויות:

$$\int_{\alpha}^{\beta}f(t)\delta(t-t_0)dt=f(t_0)$$
$$f(t)\delta(t)dt=f(0)\cdot\delta(t)$$
$$\int_{-\infty}^{-\infty}f(t)\delta(t)dt=f(0)\cdot\int_{-\infty}^{-\infty}\delta(t)dt=f(0)$$
$$\int_{-\infty}^{-\infty}f(t-\tau)\delta(\tau)d\tau=\int_{-\infty}^{-\infty}f(\tau)\cdot\delta(t-\tau)d\tau$$
$$\int_{-\infty}^{-\infty}f(t)\delta^{(n)}(t)dt=(-1)^{n}f^{(n)}(0)$$

הספק ואנרגיה

הספק רגעי:

$$P=V\cdot I=I^2R=\frac{V^2}{R}\left[watt\right]$$

$P<0$ - הרכיב מספק אנרגיה.

$P>0$ - הרכיב צורך אנרגיה.

הערה: נוסחה זו נכונה **רק אם הזרם נכנס לרכיב מההדק החיובי.**

האנרגיה האגורה בקבל או סליל:

$$W=\int_{-\infty}^{t}Pdt=\int_{-\infty}^{t}V(t)\cdot I(t)\,dt\,[w]$$

בקבל:

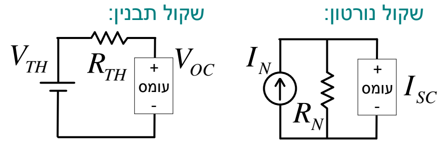
$$W_C=\frac{1}{2}cv_{(t)}^2\;[w]$$

בסליל:

$$W_L=\frac{1}{2}LI_{(t)}^2\;[w]$$

מעגלים שקולים

שקול נורטון: שקול תבנין:



$$V_{OC}=V_{TH}\quad R_N=R_{TH}$$

פתרון מעגלים ע"י שקול תבנין / נורטון:

1. חישוב התנגדות כללית ($R_{th}=R_n$) ע"י קיצור מקורות מתח, ניתוק מקורות זרם.
2. נשתמש בסופרפוזיציה למציאת המתח:
   א. ננתק כל מקור זרם בנפרד ונחשב את המתח.
   ב. נקצר כל מקור מתח בנפרד ונחשב את המתח.
   ג. נחבר את המתחים ונקבל את $V_{th}=V_{OC}$.
3. נמיר את המעגל המפושט לשקול נורטון ונחשב את $I_n=I_{SC}$.

הערה: בשקול נורטון / תבנין אם יש נגד בטור למקור זרם ובמקביל אליהם עומס, אפשר להתעלם מהנגד בטור.
כמו כן אם יש נגד במקביל למקור מתח, ובטור לשניהם יש עומס - ניתן להתעלם מהנגד במקביל.

חיבור טורי ומקבילי

רכיב	חיבור טורי	חיבור מקבילי
נגדים	$R_T=\sum_n R_n$	$\frac{1}{R_T}=\sum_n\frac{1}{R_n}$
קבלים	$\frac{1}{C_T}=\sum_n\frac{1}{C_n}$	$C_T=\sum_n C_n$
סלילים	$L_T=\sum_n L_n$	$\frac{1}{L_T}=\sum_n\frac{1}{L_n}$

חיבור מקורות מתח בטור: ע"פ KVL.
- אין לחבר מקורות מתח במקביל, אלא אם הם זהים.
- מקור מתח כופה מתחו על כל רכיב שמקביל לו.

חיבור מקורות זרם במקביל: ע"פ KCL.
- אין לחבר מקורות זרם בטור, אלא אם הם זהים.
- מקור זרם כופה את זרמו על כל רכיב שבטור אליו.

מחלק מתח (כיצד מתחלק המתח על נגדים בטור):

$$V_n=V_s\frac{R_n}{\sum R}$$

על הנגד הגדול יותר יהיה מתח גבוה יותר.

מחלק זרם (כיצד מתחלק הזרם על נגדים במקביל):

$$I_n=I_s\frac{G_n}{\sum G}$$
$$I_1=I_s\frac{R_2}{\sum R}$$

דרך הנגד הגדול יותר יעבור זרם נמוך יותר.

זרמי חוגים (Mesh Currents) - למציאת זרם

$$\begin{bmatrix}R\\ n\times n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I\\ 1\times n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}V\\ 1\times n\end{bmatrix}$$

1. n - מספר החוגים (לולאות).
2. **נמיר מקורות זרם למקורות מתח.**
3. מגדירים את כל זרמי החוגים בכיוון השעון.
4. על אלכסון מטריצת R - סכום ההתנגדויות בחוג i = R_{ii}.
5. המטריצה סימטרית וסכום ההתנגדויות המשותפות לחוג i ו- j הוא $R_{ij}=R_{ji}$ **במינוס.**
6. בוקטור המתח – כותבים את סכום מקורות המתח בלולאה, כאשר מקור מתח ילקח בחיוב אם זרם החוג יוצא מההדק החיובי שלו.
7. לא נפתור בשיטת זרמי חוגים מעגל בעל יותר ממקור זרם אחד ללא נגד מקבילי.
8. כדי לבדוק את הפתרון – נחשב באחת הלולאות את סכום המתחים ונצפה לקבל 0.

הערה: שיטה זו לא עובדת עם מקורות מבוקרים, במקרה זה צריך להגיע למטריצה ממשוואות כירכוף.

מתחי צמתים (Node Voltages) - למציאת מתח

$$\begin{bmatrix}G\\ n\times n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V\\ 1\times n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I\\ 1\times n\end{bmatrix}$$

1. n - מספר הצמתים.
2. **נגדיר צומת ייחוס (הערקה).**
3. **נמיר מקורות מתח למקורות זרם.**
4. על אלכסון מטריצת G - סכום המוליכויות המתחברות לצומת i = G_{ii}.
5. המטריצה סימטרית וסכום המוליכויות בין צומת i ל- j הוא $G_{ij}=G_{ji}$ **במינוס.**
6. בוקטור הזרם – כותבים את סכום הזרמים הנכנסים לצומת ע"פ מקורות הזרם, כאשר זרם נכנס לצומת – "+", זרם יוצא מצומת – "-".
7. לא נפתור בשיטת מתחי צמתים מעגל בעל יותר ממקור מתח אחד ללא נגד טורי.
8. כדי לבדוק את הפתרון – נחשב באחת הצמתים את סכום הזרמים ונצפה לקבל 0.
9. לא נבחר בשיטה זו 2 צמתים כשרק מקור זרם ביניהם.

הערה: שיטה זו לא עובדת עם מקורות מבוקרים, במקרה זה צריך להגיע למטריצה ממשוואות כירכוף.

מעגלים מסדר ראשון

כללי:

1. ע"י משוואות KCL, KVL נגיע למד"ר.
2. **פתרון ZIR (Zero Input Response):**
   א. אין מקור (מקצרים מקור מתח, מנתקים מקור זרם) = פתרון הומוגני בלבד.
   ב. יש רק תנאי התחלה.

$$\left.\begin{array}{r}\dot{y}+s\cdot y=0\\ y(0^-)=K\end{array}\right\} y_{(t)}=Ke^{-s\cdot t}$$

הערה: ת.ה ב- 0^- שווים לת.ה ב- 0^+ כי 0 היא פונקציה קבועה – חסומה ורציפה.

3. **פתרון ZSR (Zero State Response):**
   א. יש מקור.
   ב. תנאי התחלה שווים לאפס.
   ג. קיים פתרון הומוגני + פרטי.

$$\left.\begin{array}{r}\dot{y}+s\cdot y=f_{(t)}\\ y(0^-)=0\end{array}\right\} y^{ZSR}{}_{(t)}=(y_P+y_H)\cdot U_{(t)}$$

   ד. הפתרון ההומוגני דומה בצורתו ל- ZIR:

$$y_H=Ne^{-s\cdot t}$$

   ה. הפתרון הפרטי:
   - מקור מסוג $\sin(\omega_0 t)$ או $\cos(\omega_0 t)$ יגרור תגובה מסוג:

$$y_p=A\cos(\omega_0 t)+B\sin(\omega_0 t)$$

   - מקור מסוג $a\cdot t^2$ יגרור תגובה מסוג:

$$y_p=b\cdot t^2+c\cdot t+d$$

מציאת קבועים – ע"י הצבת **הפתרון הפרטי + ההומוגני** במד"ר המקדמים והשוואת המקדמים בהתאמה לפונקציה המתאימה באגף ימין, או וגם ע"י שימוש בת.ה.

4. פתרון כללי:

$$y=y_{ZSR}+y_{ZIR}$$

מעגל מסדר ראשון עם ערור הלם:

$$p\cdot\dot{y}+q\cdot y=h\cdot\delta(t)$$

לגבי פתרון ה- ZSR קיימות 3 דרכים:

1. פתרון כערור מדרגה וגזירת פתרון ה- ZSR.
2. המרה לבעיית ZIR עם ת.ה חדשים:

$$\left.\begin{array}{r}p\cdot\dot{y}+q\cdot y=0\\ y(0^+)=?\end{array}\right. \quad (t>0)$$

נבצע אינטגרל $\int_{0-}^{0+}(\ )dt$ על המד"ר המקורית ונקבל:

$$y(0^+)=\frac{h}{p}$$

3. פתרון ישיר של בעיית ה- ZSR.

הערות:

1. ZSR בלבד מקיים את **תכונת הלינאריות:**
   אם נתון ש- $f(t)$ בכניסה גורר $g(t)$ ביציאה אז:
   א. סופרפוזיציה: $\sum$ על ערורים גורר $\sum$ על המוצא. **ניתן לעשות סופרפוזיציה למקורות אך לא לת.ה.**
   ב. הזזה בזמן: $f(t-t_0)$ גורר $g(t-t_0)$.
   ג. גזירה: $\frac{df(t)}{dt}$ גורר $\frac{dg(t)}{dt}$.
   ד. אינטגרציה: $\int_0^t f(t')dt'$ גורר $\int_0^t g(t')dt'$.
   ה. לכל אופרטור לינארי:

$$G(af_1(t)+bf_2(t))=aG(f_1)+bG(f_2)$$

2. **פרט לערור הלם וגזירותיו מתקיים:**
   רציפות מתח על קבל - $V_C(0^-)=V_C(0^+)$.
   רציפות זרם על סליל - $I_L(0^-)=L_L(0^+)$.
3. יש לכפול את ה-ZSR ב- $u_{(t)}$ לפני חיבור ל-ZIR.
4. היחידות של $RC\ ;\ \frac{L}{R}\ ;\ \sqrt{LC}\Leftarrow[\sec]$.
5. ב- ZSR: אם הפתרון הפרטי זהה בצורתו להומוגני – יש למצוא פתרון פרטי אחר (בד"כ יש לכפול את הפתרון הפרטי ב- t).
6. הנגזרת מהסדר הגבוה ביותר במד"ר תקבל תמיד את אי הרציפות מהאגף השני במשוואה.

מעגלים מסדר שני

כללי:

$$\frac{d^2y_{(t)}}{dt^2}+2\alpha\frac{dy_{(t)}}{dt}+\omega_0^2y_{(t)}=f_{(t)}$$

$$y(0^-)=y_0$$

$$\dot{y}(0^-)=\dot{y}_0$$

$\alpha=\left[\frac{1}{\sec}\right]$ - קבוע הריסון של המעגל.

$\omega_0=\left[\frac{rad}{\sec}\right]$ - תדר התהודה של המעגל.

$Q=\frac{\omega_0}{2\alpha}$ - גורם האיכות של מד"ר מסדר 2.

הערה: Q מלמד עד כמה פתרון המשוואה אוסילטורי ולא דועך.

סד"פ לפתרון:

1. מציאת ת.ה מתאימים ב- 0^- וחישוב Q,ω_0,α.
2. מציאת מד"ר:
   - ע"י KCL נקבל מד"ר כפונקציה של v.
   - ע"י KVL נקבל מד"ר כפונקציה של i.
3. ZIR:
   א. פולינום / משוואה אופיינית:

$$P(s)=s^2+2\alpha s+\omega_0^2=0$$

   ב. שורשי הפולינום האופייני:

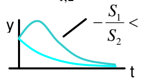
$$S_{1,2}=-\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2}$$

   ג. מציאת פתרון הומוגני:

1) ריסון יתר: $S_{1,2}$ ממשיים ושליליים ושונים:

$$Q<1/2\ ;\ \alpha>\omega_0$$

$$y_H=Ae^{S_1t}+Be^{S_2t}$$

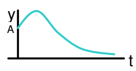


תנאי לפיתרון זה: $-\frac{S_1}{S_2}<\frac{B}{A}<0$

2) ריסון קריטי: $S_{1,2}$ ממשיים ושליליים וזהים:

$$Q=1/2\ ;\ \alpha=\omega_0\ ;\ S_1=S_2=-\alpha$$

$$y_H=Ae^{-\alpha t}+Bte^{-\alpha t}$$



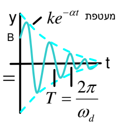
3) תת ריסון: $S_{1,2}$ מרוכבים:

$$Q>1/2\ ;\ \alpha<\omega_0$$

$$\omega_d=\sqrt{\omega_0^2-\alpha^2}\ ;\ S_{1,2}=-\alpha\pm j\omega_d$$

$$y_H=e^{-\alpha t}(A\sin(\omega_d t)+B\cos(\omega_d t))=$$

$$=Ke^{-\alpha t}\cos(\omega_d t+\rho)$$

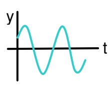


4) אין ריסון: $S_{1,2}$ דמיוניים טהורים:

$$Q\to\infty\ ;\ \alpha\to 0\ ;\ S_{1,2}=\pm j\omega_0$$

$$y_H=A\sin(\omega_0 t)+B\cos(\omega_0 t)=$$

$$=K\cos(\omega_0 t+\rho)$$



   ד. הצבת ת.ה בפתרון למציאת המקדמים + הגזירה של הפתרון.

4. ZSR:
   א. פתרון הומוגני בצורת פתרון ה- ZIR.
   ב. מציאת פתרון פרטי.
   ג. הצבת הפ. הפרטי במד"ר למציאת המקדמים שלו.
   ד. הצבת ת.ה בפיתרון ZSR ובנגזרתו למציאת המקדמים של הפ. ההומוגני.
   ה. אם הערור תלוי בפונק' הלם יש להפוך את הבעיה לבעיית ZIR עם ת.ה חדשים – ראה "מעגל מסדר ראשון עם ערור הלם" בעמ' 1, עמוד ראשונה משמאל.
5. פתרון כללי: $y=y_{ZSR}+y_{ZIR}$

הערה: את הפולינום / משוואה אופיינית פיתחו ע"י הצבת פתרון הומוגני מסוג $y_H=e^{st}$ במד"ר ההומוגנית.

תגובה לערור אקספוננציאלי

הגדרה: אופרטור גזירה - $S\triangleq\frac{d}{dt}\Leftrightarrow\frac{1}{S}\triangleq\int_{-\infty}^{t}$

נגד: $V_{(t)}=R\cdot I_{(t)}=RI_0e^{S\cdot t}$

קבל: $V_{(t)}=\frac{1}{sc}I_{(t)}$ עכבה / אימפדנס = $\frac{1}{sc}$

משרן: $V_{(t)}=SLI_{(t)}$ עכבה / אימפדנס = SL

מציאת מד"ר ע"י אופרטור גזירה S:

1. נפעיל שיטת מתחי צמתים / זרמי חוגים, כאשר מתייחסים לקבלים ולסלילים כנגדים ע"פ ההגדרות הנ"ל.
2. ע"י כלל קריימר נמצא ביטוי למשתנה הרצוי.
3. מגיעים לפונקציית תמסורת:
4. המכנה הוא למעשה הפולינום האופייני.
5. כופלים במכנה, עוברים למישור t (איפה שמופיע S גוזרים) ומקבלים את המד"ר.

סד"פ למציאת פתרון פרטי ע"י S:

1. מתייחסים לקבלים ולסלילים כנגדים.
2. מחשבים את העכבה של המעגל (Z) כאשר S הוא המעריך של e.
3. מוצאים פתרון פרטי ע"י הנוסחה:

$$V_{(t)}=I_{(t)}Z=I_0e^{s\cdot t}\cdot Z$$

הערה: רק אם כל המקורות אקספוננציאלים אז ניתן למצוא פתרון פרטי ע"י שימוש באופרטור גזירה S.

קונבולוציה

שימוש: מציאת התגובה לעירור כלשהו, בעזרת התגובה להלם של המערכת הנתונה.

נתונה מערכת לינארית ב"ת בזמן – LTI.

כניסת המערכת: ערור – מקור מתח / זרם: $x(t)$.

מוצא המערכת: תגובה – מתח / זרם על רכיב: $y(t)$.

תגובת הלם (התגובה לערור הלם): $h(t)$.

$$y(t)_{Total}=y^{ZIR}_{(t)}+y^{ZSR}_{(t)}=y^{ZIR}_{(t)}+convolution$$

פתרון ZIR יימצא באופן רגיל.

פתרון ZSR יימצא ע"י קונבולוציה:

$$y^{ZSR}_{(t)}=x(t)*h(t)=\int_{-\infty}^{t}x(\tau)\cdot h(t-\tau)\,d\tau$$

$$=\int_{0}^{\infty}x(t-\tau)\cdot h(\tau)\,d\tau$$

מערכת סיבתית:

מערכת בה התגובה לא תתחיל לפני הערור. במציאות – כל מעגל חשמלי הוא מערכת סיבתית.

הערות:

1. פתרון הקונבולוציה יהיה כפונקציה של t.
2. נשתמש בשיטה גרפית לפיתרון – כאשר נבדוק איך מתנהג האינטגרל לערכים שונים של t.

סד"פ למציאת פתרון ZSR בעזרת קונבולוציה:

1. בוחרים את h או x לפי נוחות – והופכים את הפונקציה על ציר τ (בגלל $(t-\tau)$).
2. מזיזים את הפונקציה שהפכנו לפי t, ורצים על כל הערכים האפשריים של t.
3. כאשר בתחום מסוים של t, יש חפיפה בין הפונקציות, מחשבים את אינטגרל הקונבולוציה (תחומי אינטגרציה - ע"פ התחום של t).
4. מחברים את כל תוצאות האינטגרלים וזהו הפיתרון.

תכונות הקונבולוציה:

1. $x*h=h*x$.
2. $(g+h)*x=g*x+h*x$.
3. $x(t)*\delta(t)=x(t)$.
4. $(h*x)'=h'*x=h*x'$.
5. אם: $y(t)=x(t)*h(t)$
   אז: $x(t)*h(t-t_0)=y(t-t_0)$
6. עבור דובלט:
   $x(t)*\delta'(t)=x'(t)*\delta(t)=x'(t)$.
7. $$x(t)*u(t)=x(t)*\int_{-\infty}^{t}\delta(t)=\int_{-\infty}^{t}x(t)*\delta(t)=\int_{-\infty}^{t}x(t)$$
8. $$x(t)*\sum h(t)=\sum[x(t)*h(t)]$$
9. $$h(t)_{eq}=h_1(t)*h_2(t)$$

מצב סינוסי עמיד

זהו המצב לאחר אינוסף זמן, כאשר התגובה הדועכת כבר לא משפיעה.
(ערור – z)

$z = A_m \cdot \cos(\omega t + \theta) = \mathrm{Re}\left\{\hat{A} \cdot e^{j\omega t}\right\}$

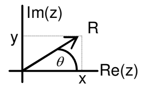
$\hat{A} = A_m \cdot e^{j\theta}$ הצגה פולרית

$\hat{A} = x + jy$ הצגה קרטזית

$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{|\mathrm{Im}(\hat{A})| = |y|}{|\mathrm{Re}(\hat{A})| = |x|}\right)$

$A_m = \sqrt{x^2 + y^2}$

הערה: בקביעת θ יש לשים לב לרביע בו נמצאים x ו- y.



אימפדנסים:

מרגע שמציגים את כל הרכיבים במעגל בפאזורים ואימפדנסים (עכבות), מתייחסים לאימפדנסים כהתנגדות רגילה.

Z – שקול התנגדות, Y – שקול למוליכות.

בקבל:

$Z_c = \frac{1}{j\omega c} = \frac{-j}{\omega c}$, $Y_c = jwc$

בסליל:

$Z_L = j\omega L$, $Y_L = \frac{1}{j\omega L} = \frac{-j}{\omega L}$

מצב תהודה (רזוננס):

המתח שמספק מקור סינוסי למעגל השקול והזרם שנכנס למעגל יהיו באותה פאזה. לכן:

$\mathrm{Im}(Z_{in}) = \mathrm{Im}(Y_{in}) = 0$

הערה: במעגל כללי אין חפיפה בין תדר התהודה ω_0 לבין הערך של ω_0 המופיע בנוסחאות מד"ר מסדר שני. אבל במעגלי RLC טורי ומקבילי פשוטים – יש זהות.

מקדם טיב – Q בתהודה:

זהו היחס בין גודל הזרם בסליל או קבל, לגודל זרם המקור. **במצב תהודה**.

$Q = \frac{|\hat{I}_C|}{|\hat{I}_S|} = \frac{|\hat{I}_L|}{|\hat{I}_S|}$

לגבי מעגל RLC מקבילי וטורי **בתהודה**:

1. Y_{in} - ממשי ומינימלי (Z_{in} - ממשי ומקסימלי).
2. בתהודה הזרם שמספק ע"י המקור עובר דרך הנגד, והזרמים בסליל ובקבל מבטלים זה את זה.
3. $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

מעגל RLC מקבילי – Band Pass:

1. בתדר נמוך רוב הזרם זורם בסליל (ב- DC הסליל הוא קצר).
2. בתדר גבוה רוב הזרם זורם בקבל (הקבל שואף לקצר).
3. בתהודה הזרם דרך הנגד יהיה מקסימלי.
4. **3dB Pass Band:** הנקודות בהן הערך המוחלט של תגובת התדר H הוא $1/\sqrt{2}$ מערכו המירבי.

תגובת תדר:

$H(j\omega) = \frac{\text{פאזור מוצא}}{\text{פאזור כניסה}}$

הערה:בתהודה תגובת התדר מקסימלית.

ניתן לחלק פאזור מתח בפאזור זרם או ההפך.

הספק רגעי:

$P_{(t)} = v_{(t)} \cdot i_{(t)} =$

$= \frac{1}{2}|\hat{V}||\hat{I}|\cos(\measuredangle V - \measuredangle I) + \frac{1}{2}|\hat{V}||\hat{I}|\cos(2\omega t + \measuredangle V + \measuredangle I)$

הספק קבוע   הספק משתנה בזמן, בתדר כפול

הערה: הספק רגעי תמיד יהיה רק במישור הזמן.

נאי להספק מקסימלי:

$Z_L = Z_{TH}^* \quad or \quad Z \in \mathbb{R}$

$R_L = R_S$

תנאי לבליעת הספק:

$\mathrm{Re}\{v/I\} > 0$

הספק ממוצע:

$P_{av} = \frac{1}{2}|\hat{V}||\hat{I}|\cos(\measuredangle V - \measuredangle I) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left\{\hat{V} \cdot \hat{I}^*\right\} =$

$= \frac{1}{2}|\hat{I}|^2 \mathrm{Re}\{Z\} = \frac{1}{2}|\hat{V}|^2 \mathrm{Re}\{Y\}$ Y* – מקור

$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, $V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$

$P_{av} = I_{eff} \cdot V_{eff} \cdot \cos(\measuredangle V - \measuredangle I)$

הספק מרוכב:

$S = \frac{1}{2}\hat{V} \cdot \hat{I}^*$

Power Factor:

$P.F = \cos\theta = \frac{P}{|S|} = \frac{P}{\left|\frac{1}{2}\hat{V} \cdot \hat{I}^*\right|}$

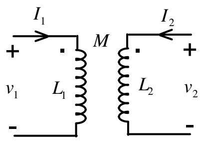
אלמנטים מצומדים

הכוונה לסלילים שינוי בזרם באחד גורר מתח מושרה בסליל השני.

M – השראה הדדית.

$v_1 = L_1\frac{dI_1}{dt} + M\frac{dI_2}{dt}$

$v_2 = L_2\frac{dI_2}{dt} + M\frac{dI_1}{dt}$

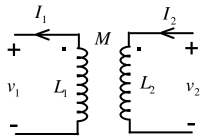


דוגמא:

מצב סינוסי עמיד, וזרמים בכיוונים הפוכים:

$\hat{v}_1 = -j\omega L_1\hat{I}_1 + j\omega M\hat{I}_2$

$\hat{v}_2 = +j\omega L_2\hat{I}_2 - j\omega M\hat{I}_1$



הערה: הנקודה ליד הסליל קובעת את סימנו של האיבר עם M ביחס לאיבר עם L.

מקדם צימוד - K:

K = 1 – צימוד מלא.

K = 0 – אין צימוד.

$K \triangleq \frac{|M|}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \Rightarrow 0 \le K \le 1$

שנאי אידיאלי:

1. אין בזבוז אנרגיה.
2. צימוד מלא: אין זליגת שטף מגנטי - כל השפעת השדה המגנטי עוברת לסליל השני.
3. $L_1, L_2 \to \infty$.
4. בכל רגע סכום ההספקים הוא אפס:

$v_1(t) \cdot I_1(t) + v_2(t) \cdot I_2(t) = 0$

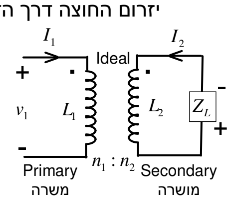
א. אין אגירת אנרגיה ואין בזבוז אנרגיה.

ב. כל הספק שנכנס לשנאי דרך זוג הדקים אחד יוצא דרך הזוג השני.

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

$\frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$

$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2$



בעיות עם שנאי אידיאלי ניתן לפתור ב- 2 דרכים:

1. ע"י משוואות אלמנטים מצומדים והשאפת L לאינסוף.
2. ע"י שיקוף.

שיקוף:

הפיכת מעגל עם שנאי אידיאלי למעגל אחד.

מעבירים אלמנטים ומקורות מהמעגל המשני למעגל הראשוני באופן הבא, **כאשר 2 הזרמים נכנסים לנקו':**

ערך במשני	ערך חדש בראשוני
Z_L	$Z_L \cdot (n_1/n_2)^2$
R	$R \cdot (n_1/n_2)^2$
L	$L \cdot (n_1/n_2)^2$
C	$C \cdot (n_2/n_1)^2$
v_2	$v_2 \cdot (n_1/n_2)$
I_2	$-I_2 \cdot (n_1/n_2)$

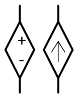
הערות:

- כאשר זרם אחד יוצא מהנקו' והשני נכנס – אז I_2 יעבור ב- "+".
- בהעברת אלמנטים מהראשוני למשני (n_1/n_2) יוחלף ב- (n_2/n_1).

מקורות מבוקרים

למקור מבוקר מתייחסים כרכיב / אלמנט (מבחינת מוסכמות) ולא כמקור רגיל.

סימון:



קיימים 4 סוגי מקורות מבוקרים:

1. מקור זרם מבוקר מקור זרם:

$\left.\begin{matrix} v_1 = 0 \\ I_2 = \alpha \cdot I_1 \end{matrix}\right\} Current\ Ratio: \alpha = \frac{I_2}{I_1}$

2. מקור זרם מבוקר מתח:

$\left.\begin{matrix} I_1 = 0 \\ I_2 = g_m \cdot v_1 \end{matrix}\right\} Transfer\ Conoductance: g_m = \frac{I_2}{I_1}$

3. מקור מתח מבוקר מתח:

$\left.\begin{matrix} I_1 = 0 \\ v_2 = \mu \cdot v_1 \end{matrix}\right\} Voltage\ Ratio: \mu = \frac{v_2}{v_1}$

4. מקור מתח מבוקר זרם:

$\left.\begin{matrix} v_1 = 0 \\ v_2 = r_m \cdot I_1 \end{matrix}\right\} Transfer\ Resistance: r_m = \frac{v_2}{I_1}$

הערה: אסור לנתק / לקצר מקור מבוקר ביוזמתנו.

מקור מבוקר שלילי:

יתכן שבו מצב שיווצר Z_{in} ,שכולל בין היתר מקור מבוקר, יקבל ערך התנגדות שלילי (Z_{in} - נותן הספק למעגל).

תוספות:

מד"ר ל RLC טורי:

$V_c'' + \frac{R}{L}V_c' + \frac{1}{LC}V_c = \frac{1}{LC}V_S$

$I'' + \frac{R}{L}I' + \frac{1}{LC}I = \frac{1}{L}V_s'$

מד"ר ל RLC מקבילי:

$V'' + \frac{1}{RC}V' + \frac{1}{LC}V = \frac{1}{C}I_S'$

$I_L'' + \frac{1}{RC}I_L' + \frac{1}{LC}I_L = \frac{1}{LC}I_s$