

תורת האלקטרוניקה והחשמל ט'

מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים

(כיתה י"ג)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח ההערכה: בשאלון זה שלושה פרקים, ובהם עשר שאלות.

יש להשיב על חמש שאלות בלבד: שאלה אחת לפחות

מכל אחד משני הפרקים הראשונים, ושאלה אחת מן הפרק השלישי. לכל שאלה – 20 נקודות. סך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר לשימוש: מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

1. ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות

הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.

2. התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.

3. רשום את כל תשובותיך אך ורק בעט.

4. הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בבהירות.

5. כתוב את תשובותיך בכתב-יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.

6. אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.

7. בכתובת פתרונות חישוביים, קבלת מֶרב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:

* רישום הנוסחה המתאימה.

* הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.

* חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).

* רישום התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.

* ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.

בשאלון זה 11 עמודים ו-25 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר,

אך מכוונות הן לנבחנות והן לנבחנים.

השאלות

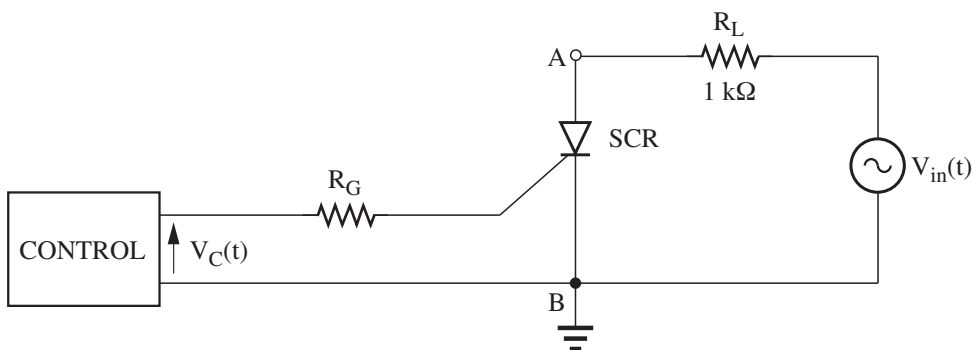
ענה על חמש מבין השאלות 1-10. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון, על שאלה אחת לפחות מן הפרק השני, ועל שאלה אחת מן הפרק השלישי.

פרק ראשון: אלקטרוניקה תקבילית א'

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 1-4 (לכל שאלה – 20 נקודות).

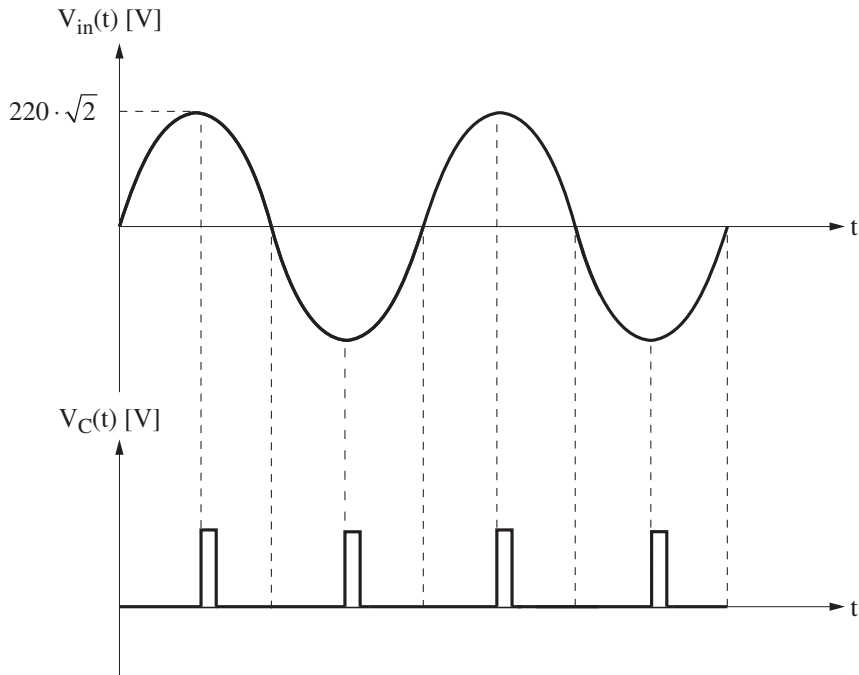
שאלה 1

המעגל החשמלי שבאיור א' לשאלה 1 משמש לבקרת ההספק על נגד-העומס R_L . הבקרה מבוצעת באמצעות SCR. מתח ההולכה של ה-SCR הוא $V_f = 1\text{ V}$, וזווית-ההצתה שלו היא $\alpha = 90^\circ$.



איור א' לשאלה 1

באיור ב' לשאלה מתוארות צורות הגלים של המתחים $V_{in}(t)$ ו- $V_C(t)$, כפונקציה של הזמן. המתח $V_{in}(t)$ קטן ממתח הפריצה הקדמי של ה-SCR (ללא אות הדירבון), ואות הדירבון $V_C(t)$ מאפשר הצתה של ה-SCR.

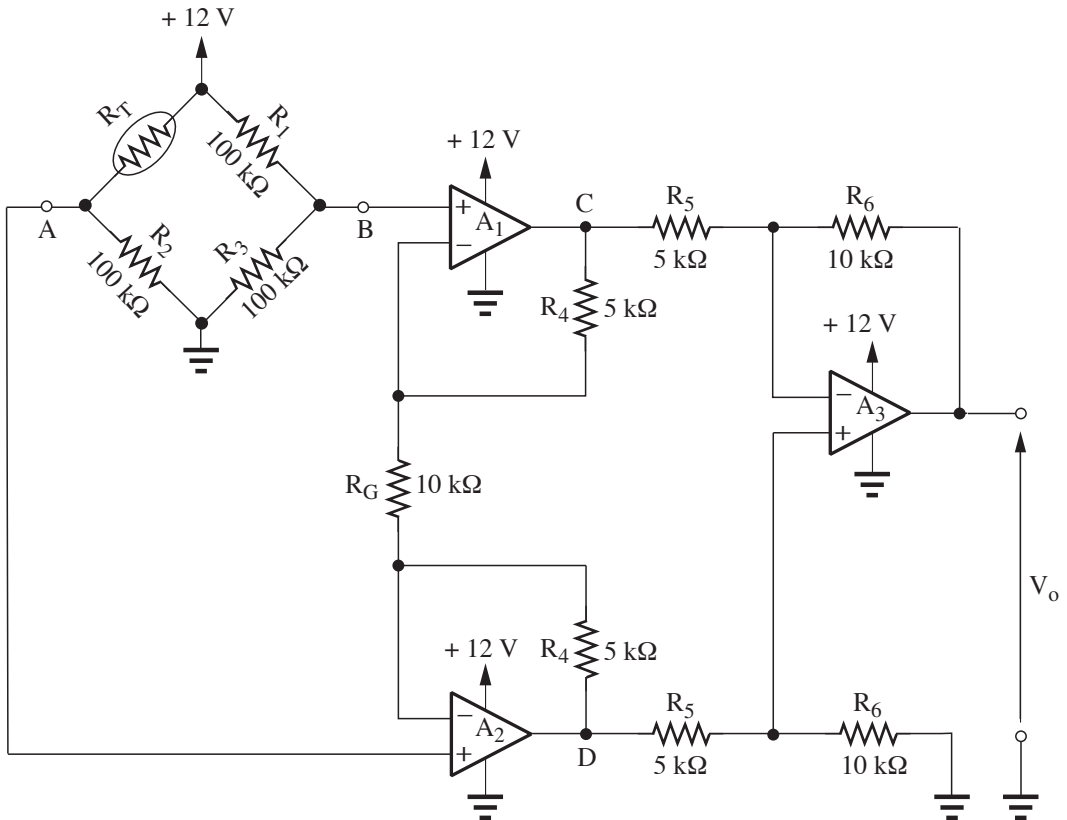


איור ב' לשאלה 1

- א. העתק למחברתך את צורות הגלים באיור ב', וסרטט מתחתיהן, בהתאמה, את V_{AB} (המתח בין הנקודות A ו-B במעגל) ו- V_{R_L} (המתח על הנגד R_L), כפונקציה של הזמן.
- ב. היעזר בגרף המתאים בנוסחאון (אלקטרוניקה תקבילית א'), וחשב את ההספק היעיל המועבר לעומס R_L , עבור ערכי α שלהלן:
1. $\alpha = 20^\circ$
 2. $\alpha = 90^\circ$ (כמו בנתוני-המעגל)
 3. $\alpha = 120^\circ$
- ג. בהסתמך על חישוביך בסעיף ב', רשום כיצד משפיעה זווית-ההצתה של ה-SCR על ההספק המועבר לעומס R_L .

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתון מעגל חשמלי המורכב מגשר-נגדים ומגבר מכשור. גשר-הנגדים כולל מתמר טמפרטורה (תרמיסטור) R_T . מגברי-השרת במעגל אידיאליים, ומתחי ההזנה שלהם הם $+12\text{ V}$.



איור לשאלה 2

נתוני התרמיסטור R_T הם: $R_T = R_{25^\circ\text{C}} + K \cdot \Delta T$; $K = -1 \frac{\text{k}\Omega}{^\circ\text{C}}$; $R_{25^\circ\text{C}} = 100\text{ k}\Omega$ (ההפרש בין הטמפרטורה הנתונה ל- 25°C)

א. חשב את התנגדות התרמיסטור R_T בטמפרטורה של 60°C .

ב. 1. חשב את המתח בנקודה C ואת המתח בנקודה D בטמפרטורה של 60°C .

2. חשב את מתח-המוצא V_0 בטמפרטורה של 60°C .

ג. החלף את אחד מהנגדים $R_1 \div R_3$ בנגד אחר, כדי לקבל מתח-מוצא $V_0 = 0\text{ V}$ בטמפרטורה של 60°C . ציין איזה נגד בחרת להחליף, וחשב את התנגדותו של הנגד החדש.

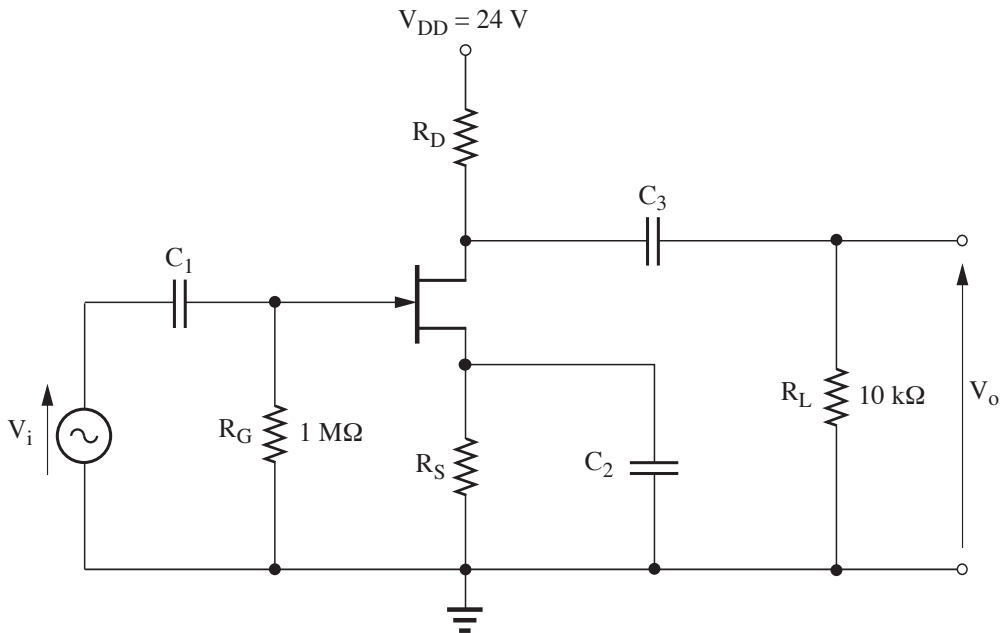
שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתון המעגל החשמלי של דרגת-הגברה עם טרנזיסטור תוצא-שדה (JFET).

היגבי הקבלים במעגל – זניחים.

$$V_P = -3 \text{ V} ; I_{DSS} = 10 \text{ mA} ; r_d = \infty$$

נתוני הטרנזיסטור הם:



איור לשאלה 3

א. חשב את ערכי הנגדים R_D ו- R_S , על-מנת שנקודת-העבודה של דרגת ההגברה הזו תהיה:

$$I_D = 3 \text{ mA}, V_{DS} = 10 \text{ V}$$

ב. סרטט את מעגל התמורה לאות-חילופין (AC) של הדרגה הזו.

ג. חשב את הגבר המתח של הדרגה $A_V = \frac{V_o}{V_i}$.

ד. מה צריכה להיות התנגדות הנגד R_L , אם מעוניינים לקבל הגבר מתח $A_V = -5$?

שאלה 4

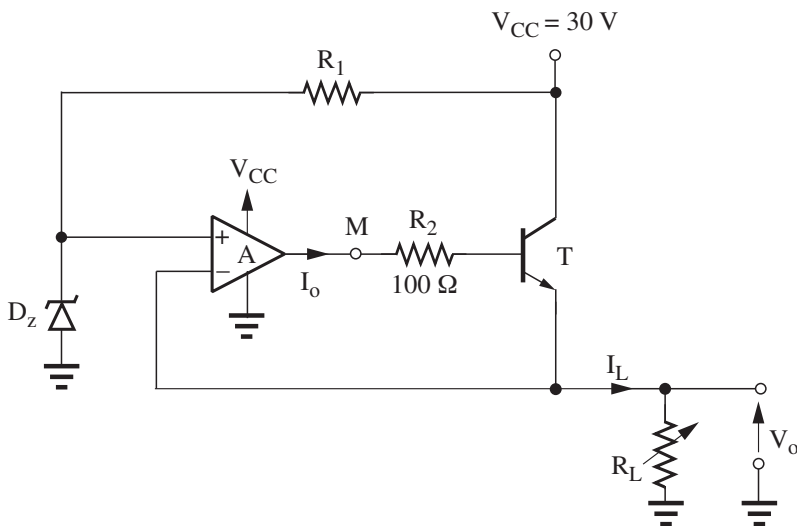
באיור לשאלה 4 נתון המעגל החשמלי של מייצב מתח-המוצא V_o , כאשר נגד-העומס R_L משתנה. זרם המוצא המרבי של מגבר-השרת הוא: $I_o = 20 \text{ mA}$.

נתוני דיודת-הזנר הם:

$$V_z = 12 \text{ V} ; \quad I_{z\min} = 10 \text{ mA} ; \quad P_{z\max} = 1 \text{ W}$$

נתוני הטרנזיסטור הם:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V} ; \quad \beta = 50$$



איור לשאלה 4

א. מהו ערכו של מתח-המוצא V_o ? נמק את תשובתך.

ב. חשב את ערכו המרבי של זרם העומס ($I_{L\max}$).

ג. 1. מה תפקידו של הנגד R_1 במעגל?

2. חשב את תחום הערכים האפשרי של התנגדות הנגד R_1 ($R_{1\min} \div R_{1\max}$).

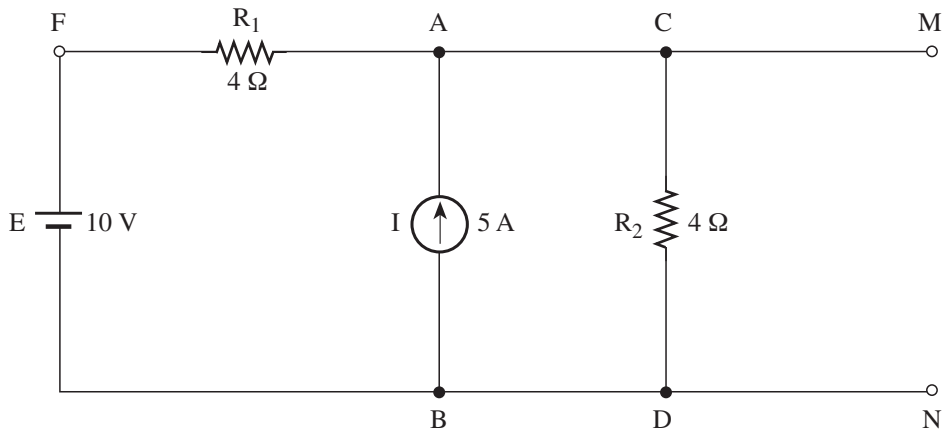
ד. חשב את ההתנגדות של הנגד R_L ואת המתח בנקודה M, כאשר $I_L = 100 \text{ mA}$.

פרק שני: מבוא להנדסת חשמל

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 5-8 (לכל שאלה – 20 נקודות).

שאלה 5

באיור לשאלה 5 נתון מעגל חשמלי. מקור המתח E ומקור הזרם I – אידיאליים.

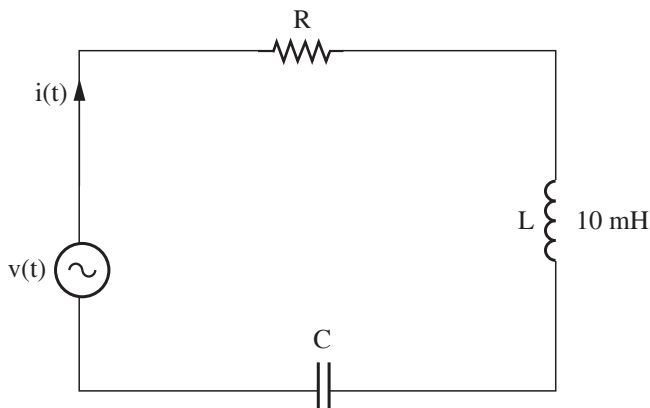


איור לשאלה 5

- א. חשב את המתח V_{MN} , וציין את קוטביותו.
- ב. חשב את הזרם בנגד R_2 , וציין את כיוונו (מ- C^- ל- D^- או מ- D^- ל- C^-).
- ג. חשב את הזרם בנגד R_1 , וציין את כיוונו (מ- A^- ל- F^- או מ- F^- ל- A^-).
- ד. מחברים בין הנקודות M ו- N צרכן שהתנגדותו $R_L = 3\Omega$. חשב את הזרם בצרכן R_L , וציין את כיוונו (מ- M^- ל- N^- או מ- N^- ל- M^-).

שאלה 6

באיור לשאלה 6 נתון מעגל חשמלי.



איור לשאלה 6

מתח המקור נתון בביטוי: $v(t) = 200 \cdot \sin(2000 t)$ [V]

הזרם במעגל נתון בביטוי: $i(t) = 4 \cdot \sin(2000 t + 36.87^\circ)$ [A]

א. חשב את עכבת המעגל Z . הצג אותה כמספר מרוכב שצורתו:

1. $Z = |Z| \angle \alpha$

2. $Z = A + jB$

ב. מהי ההתנגדות של הנגד R , ומהו ההיגב הכולל של המעגל?

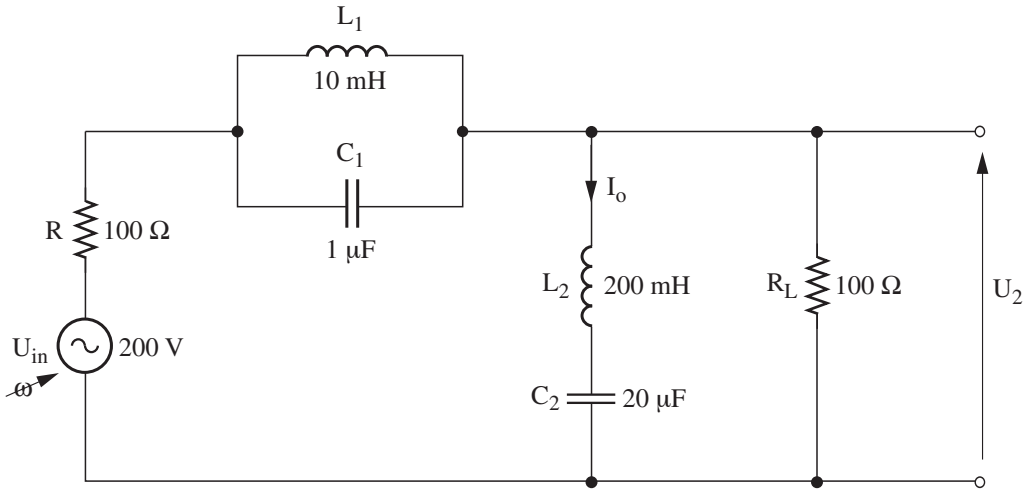
ג. חשב את ההיגב הסליל ואת ההיגב הקבל.

ד. חשב את קיבול הקבל.

ה. חשב את ההספק הפעיל, את ההספק העיוור ואת ההספק הכולל של המעגל, וסרטט את משולש ההספקים של המעגל.

שאלה 7

במעגל החשמלי המתואר באיור לשאלה 7, U_{in} הוא מקור מתח חילופין בעל תדר זוויתי (ω) משתנה.

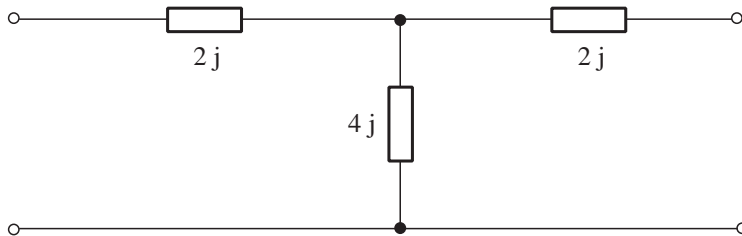


איור לשאלה 7

- א. חשב את תדר התהודה ω_2 של הענף הטורי במעגל (L_2, C_2) .
- ב. ציין את ערכו של המתח U_2 כאשר $\omega = \omega_2$, וחשב את הזרם I_0 במצב הזה.
- ג. חשב את זווית-המופע בין U_{in} ו- I_0 כאשר $\omega = \omega_2$, וציין את אופיו של המעגל (השראותי או קיבולי) במצב הזה.
- ד. חשב את תדר התהודה ω_1 של הענף המקבילי במעגל (L_1, C_1) .
- ה. מה יהיה ערכו של המתח U_2 ומה יהיה ערכו של הזרם I_0 כאשר $\omega = \omega_1$? נמק את תשובתך.

שאלה 8

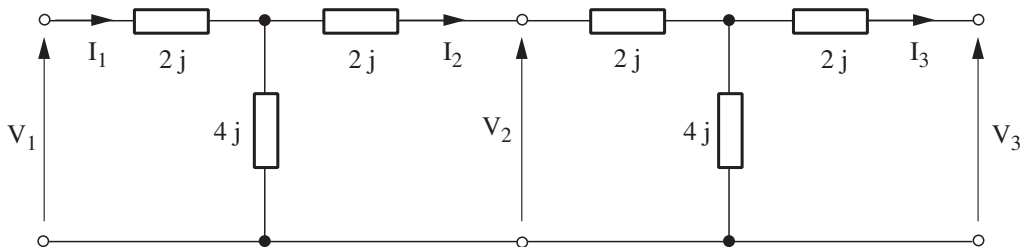
א. באיור א' לשאלה 8 נתונה רשת זוגיים סימטרית.



איור א' לשאלה 8

חשב את מקדמי ABCD של הרשת הזו.

ב. באיור ב' לשאלה 8 נתונה רשת זוגיים מורכבת.



איור ב' לשאלה 8

1. חשב את מקדמי ABCD של הרשת הזו.

2. האם הרשת הזו מהווה חוליה סימטרית? נמק את תשובתך.

פרק שלישי: אנגלית טכנית

ענה על שאלה אחת מבין השאלות 9-10 (לכל שאלה – 20 נקודות).

שאלה 9

בנספח לשאלה 9 מובא קטע של מאמר בשפה האנגלית, העוסק בנתח THD מסוג דיכוי יסודי (Fundamental Suppression Analyzer).

עליך לענות על הסעיפים שלהלן בעברית, רק על-פי הכתוב במאמר.

א. מה ייעודו של נתח THD ?

ב. מה קורה לתדר היסודי של אות-המבוא בנתח דיכוי יסודי (FS Analyzer)?

ג. 1. לאיזה תדר מכוונים את מתנד גשר וויין שבנתח הדיכוי היסודי?

2. מהו מתח-המוצא של הגשר בתדר הזה?

שאלה 10

בנספח לשאלה 10 מובא דף-מפרט בשפה האנגלית של מד-התאוצה ADXL322 .

עליך לענות על הסעיפים שלהלן בעברית, רק על-פי הכתוב בדף-המפרט.

א. רשום שלוש תכונות ושלושה יישומים של מד-התאוצה הזה.

ב. מהו תחום המדידה המלא של מד-התאוצה הזה?

ג. ציין את שני סוגי התאוצות שמד-התאוצה הזה מסוגל למדוד.

ד. מה תפקידם של הקבלים C_X ו- C_Y , המחוברים למוצאים של מד-התאוצה?

בהצלחה!

זכות היוצרים שמורה למדינת ישראל.
אין להעתיק או לפרסם אלא ברשות משרד החינוך.

THD Analyzer

Total Harmonic Distortion (THD) Analyzers calculate the total distortion introduced by all the harmonics of the fundamental frequency wave. In most cases, THD is the amount required to be calculated, rather than distortion caused by individual harmonics. This type of analysis is very important in systems (e.g. Audio) in which filters with extremely small passband/stopband are desired, such as a notch filter in a parametric equalizer.

Fundamental Suppression Analyzer

This is a specific type of THD analyzer, in which basically the fundamental frequency of the input wave is suppressed so as to remove it from the spectra of the meters used for distortion measurement, and the total gain of all the harmonics is calculated, thus obtaining the total distortion caused by the harmonics.

A block diagram of a Fundamental Suppression (FS) Analyzer is shown in Fig. 1. This basic construction consists of three main sections: Input section with impedance matcher, a rejection amplifier section and an output metering circuit. Notice the feedback from the bridge amplifier to the pre-amplifier section, that enables the rejection circuit to work more accurately.

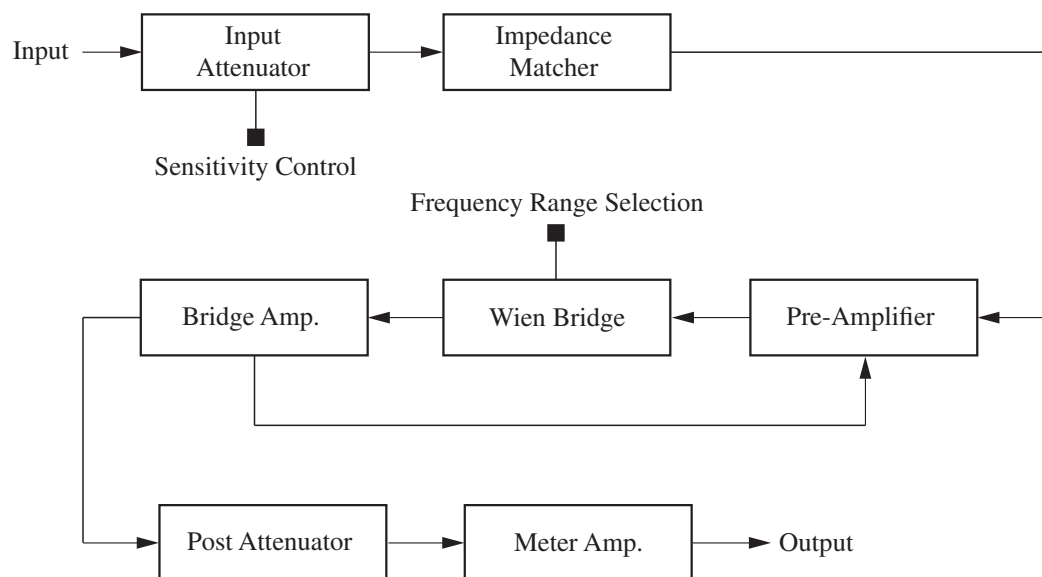


Fig. 1. Block Diagram of a Fundamental Suppression Analyzer

The Wien bridge in this block diagram is tuned to the fundamental frequency by frequency control and it is balanced for zero output by adjusting the bridge controls, thus giving a notch in the frequency response of the rejection section, as shown in Fig. 2.

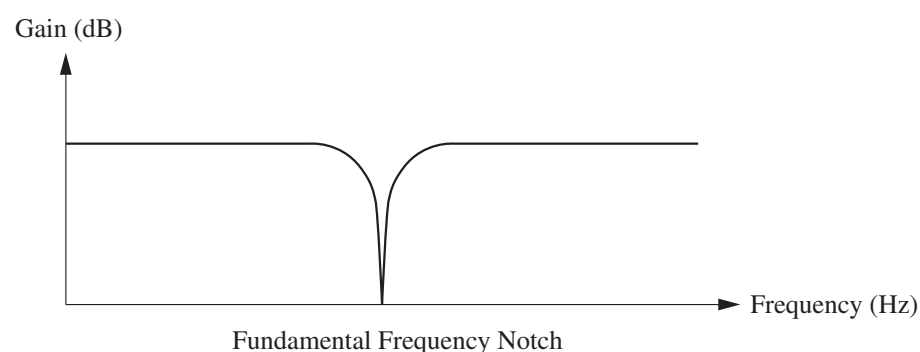


Fig. 2. The frequency response of a Fundamental Suppression Analyzer

Small and Thin ± 2 g Accelerometer

ADXL322

FEATURES

Small and thin

4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.45 mm LFCSP package

2 mg resolution at 60 Hz

Wide supply voltage range: 2.4 V to 6 V

Low power: 340 μ A at $V_s = 2.4$ V (typ)

Good zero g bias stability

Good sensitivity accuracy

X-axis and Y-axis aligned to within 0.1° (typ)

BW adjustment with a single capacitor

Single-supply operation

10,000 g shock survival

Pb Free: Compatible with Sn/Pb and Pb-free solder processes

APPLICATIONS

Cost-sensitive motion- and tilt-sensing applications

Smart hand-held devices

Mobile phones

Sports and health-related devices

PC security and PC peripherals

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL322 is a small, thin, low power, complete, dual-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs, which are all on a single monolithic IC. The product measures acceleration with a full-scale range of ± 2 g (typical). It can also measure both dynamic acceleration (vibration) and static acceleration (gravity).

The ADXL322's typical noise floor is $220 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, which allows signals below 2 mg to be resolved in tilt-sensing applications using narrow bandwidths (< 60 Hz).

The user selects the bandwidth of the accelerometer using capacitors C_X and C_Y at the X_{OUT} and Y_{OUT} pins. Bandwidths of 0.5 Hz to 2.5 kHz can be selected to suit the application.

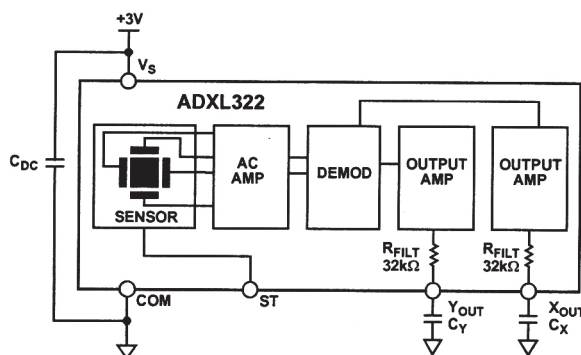
THEORY OF OPERATION

The ADXL322 is a complete acceleration measurement system on a single monolithic IC. The ADXL322 has a measurement range of ± 2 g. It contains a polysilicon surface micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltages that are proportional to acceleration. The accelerometer measures static acceleration forces, such as gravity, which allows it to be used as a tilt-sensor.

The sensor is a polysilicon surface-micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out-of-phase square waves. Acceleration deflects the beam and unbalances the differential capacitor, resulting in an output square wave whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to rectify the signal and determine the direction of the acceleration.

The demodulator's output is amplified and brought off-chip through a $32 \text{ k}\Omega$ resistor. The user then sets the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנחשת נכתב

נוסחאון באלקטרוניקה תקבילית א' לכיתה י"ג (8 עמודים)

דיודת צומת

משוואת זרם-מתח של דיודה מעשית:

זרם הדיודה	-	I_D	[A]
זרם זליגה אחורי	-	I_S	[A]
מתח הדיודה	-	V_D	[V]
מתח התלוי בטמפרטורה	-	V_T	[V]

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

$$\eta = \begin{cases} 1 - \text{גרמניום} \\ 2 - \text{סיליקון} \end{cases}$$

$$V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right)$$

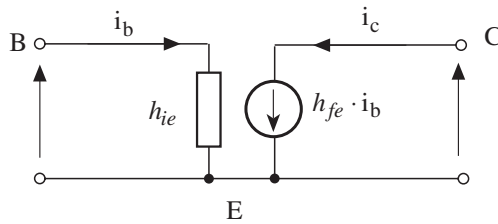
טרנזיסטור דו-נושאי (בתחום הפעיל)

זרם קולט	-	I_C	[A]
זרם פולט	-	I_E	[A]
זרם בסיס	-	I_B	[A]

$$I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1) I_B, I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{\beta + 1}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

תרשים תמורה מקורב מסוג h של טרנזיסטור דו-נושאי



טרנזיסטור FET (איזור הרוויה)

זרם האפיק - I_D [A]

זרם האפיק עבור $V_{gs} = 0$ - I_{DSS} [A]

המתח בין השער למקור - V_{gs} [V]

מתח צביטה - V_p [V]

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{gs}}{V_p} \right)^2$$

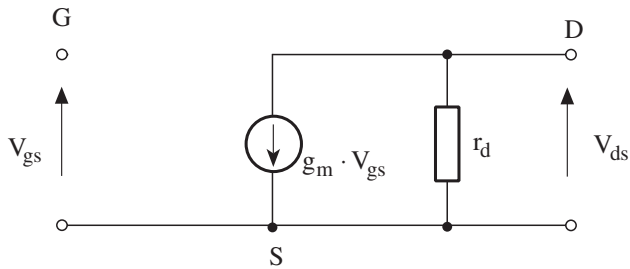
$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} \left(1 - \frac{V_{gs}}{V_p} \right)$$

מוליכות הדדית - $g_m \left[\frac{1}{\Omega} \right]$

מוליכות הדדית עבור $V_{gs} = 0$ - $g_{m0} \left[\frac{1}{\Omega} \right]$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|}$$

תרשים תמורה מקורב של FET



טרנזיסטור MOSFET (איזור הרוויה)

עבור טרנזיסטור מסוג N – CHANNEL :

מתח צביטה - V_T [V]

מקדם - $k \left[\frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \right]$

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

תנאי הרוויה:

$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

הערה: מעגל התמורה לאות חילופין של טרנזיסטור MOSFET זהה לזה של טרנזיסטור JFET .

מתחים וזרמים בגל סינוס עם זווית הצתה

א. בקרת חצי גל בעומס אומי

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos \alpha]$$

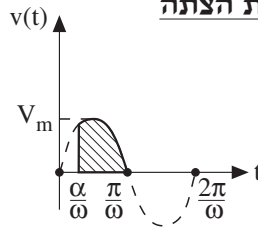
$$V_L = V_{RMS} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

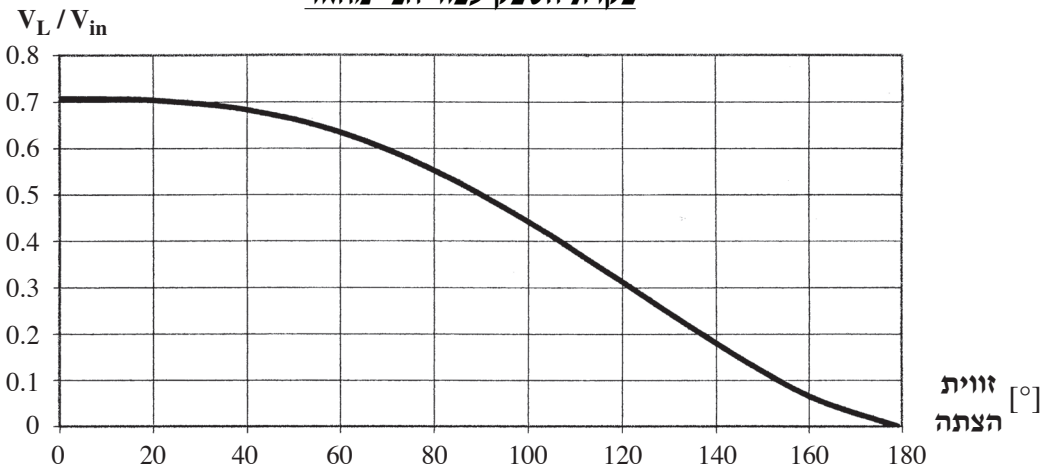
$$V_{in} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$



α [rad] - זווית הצתה

מתח הגל בתלות בזמן	-	$v(t)$ [V]
הערך הממוצע של המתח	-	V_{AV} [V]
הערך היעיל של המתח	-	V_{RMS} [V]
הערך המרבי של המתח	-	V_m [V]
מהירות זוויתית (תדר זוויתי)	-	ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$
זמן	-	t [sec]
התנגדות העומס	-	R [Ω]
הספק על העומס	-	P [W]
הערך הממוצע של הזרם	-	I_{AV} [A]
הערך היעיל של הזרם	-	I_{RMS} [A]
הערך היעיל של המתח על העומס	-	V_L [V]
הערך היעיל של מתח הכניסה	-	V_{in} [V]

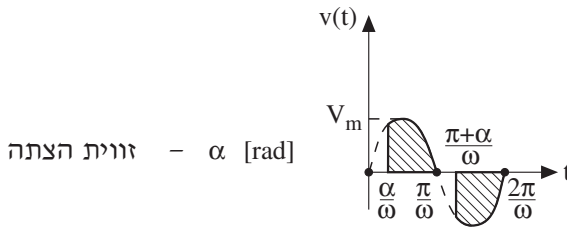
בקרת הספק עבור חצי מחזור



המשך בעמוד 5

ב. בקרת גל שלם בעומס אומי

ב.



$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = 0$$

$$V_L = V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

$$I_{AV} = 0$$

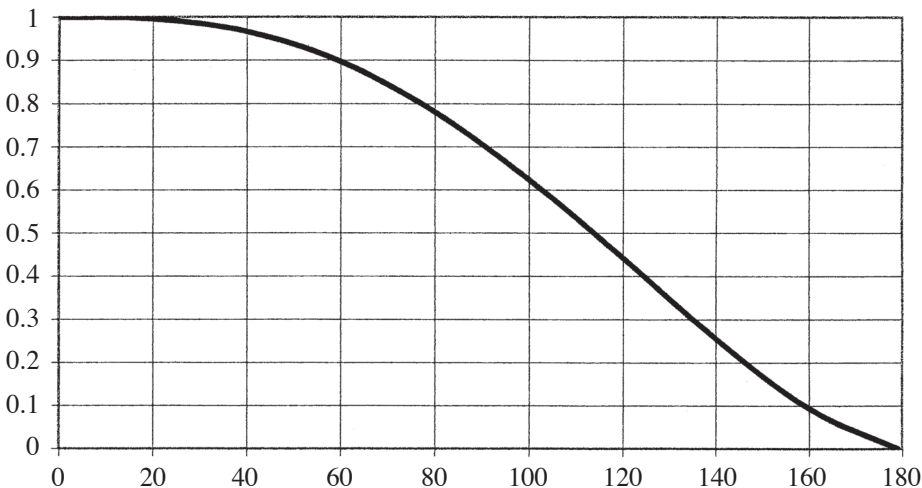
$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

$$V_{in} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

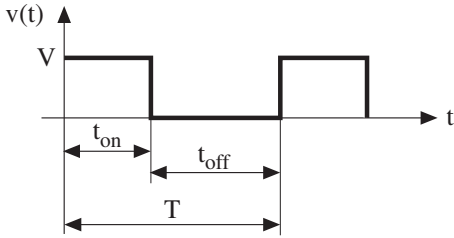
- $v(t)$ [V] - מתח הגל בתלות בזמן
- V_{AV} [V] - הערך הממוצע של המתח
- V_{RMS} [V] - הערך היעיל של המתח
- V_m [V] - הערך המרבי של המתח
- ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$ - מהירות זוויתית (תדר זוויתי)
- t [sec] - זמן
- R [Ω] - התנגדות העומס
- P [W] - הספק על העומס
- I_{AV} [A] - הערך הממוצע של הזרם
- I_{RMS} [A] - הערך היעיל של הזרם
- V_L [V] - הערך היעיל של המתח על העומס
- V_{in} [V] - הערך היעיל של מתח הכניסה

בקרת הספק עבור מחזור שלם

V_L / V_{in}



המשך בעמוד 6



- D – מחזור פעולה (Duty Cycle)
- t_{on} [sec] – זמן הולכה
- t_{off} [sec] – זמן פוגה
- T [sec] – זמן המחזור

מתחים וזרמים בגל מלבני

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$V_{AV} = D \cdot V$$

$$V_{RMS} = \sqrt{D} \cdot V$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

מיישרים

א. יישור חד-מופעי – חצי גל בעומס אומי

- V_{AV} [V] – הערך הממוצע של המתח
- V_m [V] – הערך המרבי של המתח
- V_{RMS} [V] – הערך היעיל של המתח
- I_{AV} [A] – הערך הממוצע של הזרם
- I_{RMS} [A] – הערך היעיל של הזרם
- R [Ω] – התנגדות העומס
- P [W] – הספק על העומס

$$V_{AV} = \frac{V_m}{\pi}$$

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{2}$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

ב. יישור חד-מופעי – גל שלם בעומס אומי

הערך הממוצע של המתח	-	V_{AV} [V]
הערך המרבי של המתח	-	V_m [V]
הערך היעיל של המתח	-	V_{RMS} [V]
הערך הממוצע של הזרם	-	I_{AV} [A]
הערך היעיל של הזרם	-	I_{RMS} [A]
התנגדות העומס	-	R [Ω]
הספק על העומס	-	P [W]

$$V_{AV} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

מתח אדווה במיישר חצי גל

מתח גליות (אדווה)	-	ΔV [V]
מתח מרבי במוצא	-	$V_{o_{max}}$ [V]
תדר מתח הכניסה	-	f [Hz]
התנגדות העומס	-	R [Ω]
קיבול קבל הסינון	-	C [F]

$$\Delta V \approx \frac{V_{o_{max}}}{R \cdot C \cdot f}$$

מתח אדווה במיישר גל שלם

$$\Delta V \approx \frac{V_{o_{max}}}{2 \cdot R \cdot C \cdot f}$$

מגברי הפרש

$$V_o = A_1 \cdot V_1 + A_2 \cdot V_2$$

מתח מבוא $- V_1$ [V]

$$A_1 = \frac{V_o}{V_1} \Big|_{V_2 = 0}$$

מתח מבוא $- V_2$ [V]

$$A_2 = \frac{V_o}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

הגבר הפרשי $- A_d$

$$A_d = \frac{A_1 - A_2}{2}$$

הגבר האות המשותף $- A_c$

$$A_c = A_1 + A_2$$

יחס דחיית האות המשותף $- CMRR$

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

$$V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$

הפרש מתחי המבוא $- V_d$ [V]

$$V_d = V_1 - V_2$$

ממוצע הסכום של מתחי המבוא $- V_c$ [V]

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$A_d = \frac{V_o}{V_d} \Big|_{V_c = 0} = \frac{V_o}{2V_i}$$

$$A_c = \frac{V_o}{V_c} \Big|_{V_d = 0} = \frac{V_o}{V_i}$$

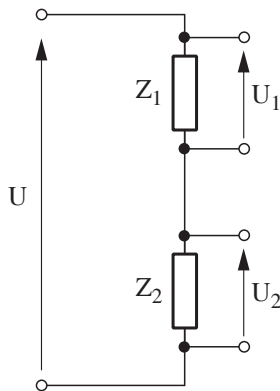
בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנכתוב תשובות

נוסחאון במבוא להנדסת חשמל לכיתה י"ג

(15 עמודים)

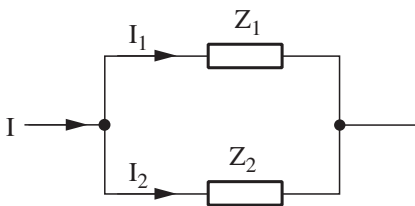


מחלק מתח

$$U_1 = \frac{U \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$U_2 = \frac{U \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

מחלק זרם



$$I_1 = \frac{I \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

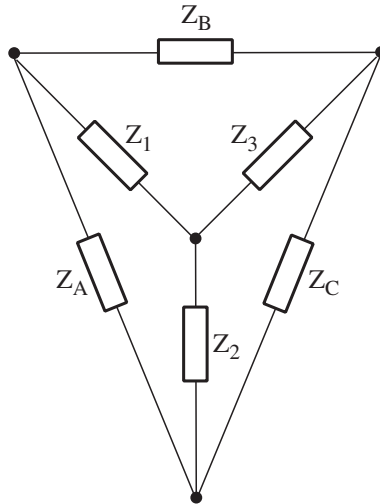
$$I_2 = \frac{I \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

ההמרה של כוכב במשולש

$Y \rightarrow \Delta$
$Z_A = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_3}$
$Z_B = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_2}$
$Z_C = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_1}$

ההמרה של משולש בכוכב

$\Delta \rightarrow Y$
$Z_1 = \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B + Z_C}$
$Z_2 = \frac{Z_A Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$
$Z_3 = \frac{Z_B Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$



זרם חילופין סינוסואידלי

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\max}$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{\max}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$$

$$X_L = j\omega L$$

$$M = k \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$X_M = j\omega M = j k \sqrt{|X_{L1}| \cdot |X_{L2}|}$$

ערך רגעי של הזרם - $i(t)$ [A]

ערך מרבי של הזרם
(תנופת הזרם) - $I_{\max}$ [A]

זווית מופע - α [rad]

זמן - t [sec]

ערך רגעי של המתח - $u(t)$ [V]

ערך מרבי של המתח
(תנופת המתח) - $U_{\max}$ [V]

ערך יעיל של הזרם - I_{eff} [A]

ערך יעיל של המתח - U_{eff} [V]

זמן המחזור - T [sec]

תדירות זוויתית - ω [rad / sec]

תדירות - f [Hz]

היגב השראותי - X_L [Ω]

היגב קיבולי - X_C [Ω]

השראות הדדית - M [H]

מקדם הצימוד ($0 \leq k \leq 1$) - k

השראות עצמית של סליל 1 - L_1 [H]

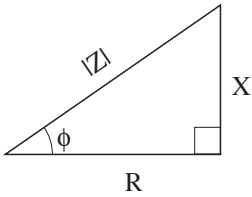
השראות עצמית של סליל 2 - L_2 [H]

היגב ההשראות ההדדית - X_M [Ω]

התנגדות המעגל	-	R	[Ω]
היגב המעגל	-	X	[Ω]
עכבת המעגל	-	Z	[Ω]

$$Z = R \pm jX$$

משולש העכבות



$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\sin \phi = \frac{X}{|Z|}$$

;

$$\cos \phi = \frac{R}{|Z|}$$

;

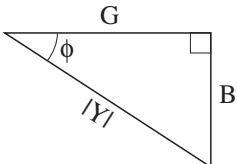
$$\tan \phi = \frac{X}{R}$$

מוליכות המעגל	-	G	[S]
מניחות המעגל	-	B	[S]
מתירות המעגל	-	Y	[S]

$$Y = G \pm jB$$

$$Y = \frac{1}{Z}$$

משולש המתירויות



$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$\sin \phi = \frac{B}{|Y|}$$

;

$$\cos \phi = \frac{G}{|Y|}$$

;

$$\tan \phi = \frac{B}{G}$$

הספקים בזרם חילופין

$$P = |I_R| \cdot |U_R| = |I_R|^2 \cdot R = \frac{|U_R|^2}{R}$$

$$Q = |I_X| \cdot |U_X| = |I_X|^2 \cdot |X| = \frac{|U_X|^2}{|X|}$$

$$|S| = |I_Z| \cdot |U_Z| = |I_Z|^2 \cdot |Z| = \frac{|U_Z|^2}{|Z|}$$

$$S = P \pm jQ = U_Z \cdot I_Z^*$$

הספק פעיל - P [W]

הערך המוחלט של הזרם בנגד - $|I_R|$ [A]

הערך המוחלט של המתח על הנגד - $|U_R|$ [V]

הספק היגבי - Q [VAr]

הערך המוחלט של זרם ההיגב - $|I_X|$ [A]

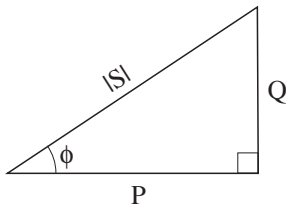
הערך המוחלט של מתח ההיגב - $|U_X|$ [V]

הספק מדומה - S [VA]

הערך המוחלט של זרם העכבה - $|I_Z|$ [A]

הערך המוחלט של מתח העכבה - $|U_Z|$ [V]

הצמוד של זרם העכבה - $|I_Z^*|$ [A]



משולש ההספקים

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$Q = |S| \cdot \sin \phi$$

$$P = |S| \cdot \cos \phi$$

מעגל תהודה

טורי/מקבילי

תדירות התהודה	-	f_0	[Hz]
השראות	-	L	[H]
קיבול	-	C	[F]
גורם הטיב של המעגל בתהודה	-	Q_0	
רוחב הפס	-	BW	[Hz]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$BW = \frac{f_0}{Q_0}$$

גורם הטיב במעגל טורי

תדירות זוויתית בתהודה	-	ω_0	[rad / sec]
התנגדות	-	R	[Ω]

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R}$$

גורם הטיב במעגל מקבילי

$$Q_0 = \frac{R}{\omega_0 L}$$

מקדמים של רשת זוגיים

ABCD מקדמי

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$V_1 = A \cdot V_2 + B \cdot I_2$$

$$I_1 = C \cdot V_2 + D \cdot I_2$$

Z מקדמי

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$V_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2$$

$$V_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2$$

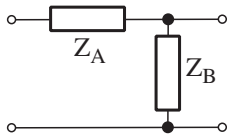
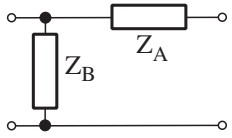
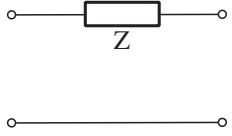
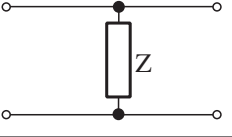
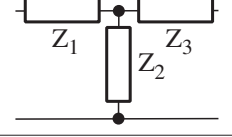
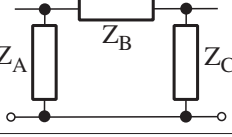
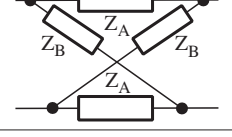
Y מקדמי

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

$$I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2$$

$$I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2$$

מקדמי ABCD של רשת זוגיים

	A	B	C	D
	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_B}$	Z_A	$\frac{1}{Z_B}$	1
	1	Z_A	$\frac{1}{Z_B}$	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_B}$
	1	Z	0	1
	1	0	$\frac{1}{Z}$	1
	$1 + \frac{Z_1}{Z_2}$	$\frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2} + Z_1 + Z_3$	$\frac{1}{Z_2}$	$1 + \frac{Z_3}{Z_2}$
	$1 + \frac{Z_B}{Z_C}$	Z_B	$\frac{Z_A + Z_B + Z_C}{Z_A \cdot Z_C}$	$1 + \frac{Z_B}{Z_A}$
	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_B - Z_A}$	$\frac{2 Z_A + Z_B}{Z_B - Z_A}$	$\frac{2}{Z_B - Z_A}$	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_B - Z_A}$

הערה: זרם המבוא I_1 נכנס לרשת, וזרם המוצא I_2 יוצא מהרשת.

מקדמי Z ו- Y של רשת זוגיים

	Z			Y		
	Z_{11}	$Z_{12} = Z_{21}$	Z_{22}	Y_{11}	$Y_{12} = Y_{21}$	Y_{22}
	$Z_A + Z_B$	Z_B	Z_B	$\frac{1}{Z_A}$	$-\frac{1}{Z_A}$	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_A \cdot Z_B}$
	Z_B	Z_B	$Z_A + Z_B$	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_A \cdot Z_B}$	$-\frac{1}{Z_A}$	$\frac{1}{Z_A}$
	∞	∞	∞	$\frac{1}{Z}$	$-\frac{1}{Z}$	$\frac{1}{Z}$
	Z	Z	Z	∞	∞	∞
	$Z_1 + Z_2$	Z_2	$Z_2 + Z_3$	$\frac{Z_2 + Z_3}{Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3)}$	$\frac{-Z_2}{Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3)}$	$\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3)}$
	$\frac{Z_A(Z_B + Z_C)}{Z_A + Z_B + Z_C}$	$\frac{Z_A \cdot Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$	$\frac{Z_C(Z_A + Z_B)}{Z_A + Z_B + Z_C}$	$\frac{Z_A + Z_B}{Z_A \cdot Z_B}$	$-\frac{1}{Z_B}$	$\frac{Z_B + Z_C}{Z_B \cdot Z_C}$
	$\frac{Z_B + Z_A}{2}$	$\frac{Z_B - Z_A}{2}$	$\frac{Z_A + Z_B}{2}$	$\frac{Z_A + Z_B}{2 Z_A \cdot Z_B}$	$\frac{Z_A - Z_B}{2 Z_A \cdot Z_B}$	$\frac{Z_A + Z_B}{2 Z_A \cdot Z_B}$

הערה: זרם המבוא I_1 וזרם המוצא I_2 נכנסים לרשת.

טבלה השוואתית של מקדמי זוגיים

	[Z]		[Y]		A B C D	
[Z]	Z_{11}	Z_{12}	$\frac{Y_{22}}{ Y }$	$\frac{-Y_{12}}{ Y }$	$\frac{A}{C}$	$\frac{AD - BC}{C}$
	Z_{21}	Z_{22}	$\frac{-Y_{21}}{ Y }$	$\frac{Y_{11}}{ Y }$	$\frac{1}{C}$	$\frac{D}{C}$
[Y]	$\frac{Z_{22}}{ Z }$	$\frac{-Z_{12}}{ Z }$	Y_{11}	Y_{12}	$\frac{D}{B}$	$\frac{-(AD - BC)}{B}$
	$\frac{-Z_{21}}{ Z }$	$\frac{Z_{11}}{ Z }$	Y_{21}	Y_{22}	$\frac{-1}{B}$	$\frac{A}{B}$
A	$\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$	$\frac{ Z }{Z_{21}}$	$\frac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	$\frac{-1}{Y_{21}}$	A	B
B						
C	$\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{Z_{22}}{Z_{21}}$	$\frac{- Y }{Y_{21}}$	$\frac{-Y_{11}}{Y_{21}}$	C	D
D						

הערות

- א. עבור מקדמי ABCD – זרם המוצא I_2 יוצא מהרשת.
עבור מקדמי Y ו-Z – זרם המוצא I_2 נכנס לרשת.
- ב. $|Y|$, $|Z|$ הם דטרמיננטים של המטריצות [Z] ו-[Y], בהתאמה.

רשתות זוגיים

$$Z_O = \sqrt{Z_{SC} Z_{OC}}$$

עכבה אופיינית $- Z_O \quad [\Omega]$

עכבת המבוא כאשר
המוצא בקצר $- Z_{SC} \quad [\Omega]$

עכבת המבוא כאשר
המוצא בנתק $- Z_{OC} \quad [\Omega]$

מקדם זוגיים $- B$

מקדם זוגיים $- C$

(עבור רשת
סימטרית בלבד)

$$Z_O = \sqrt{\frac{B}{C}}$$

מהצד
האחד { עכבת הברואה $- Z_{O1} \quad [\Omega]$
עכבת המבוא כאשר
המוצא בקצר $- Z_{SC1} \quad [\Omega]$
עכבת המבוא כאשר
המוצא בנתק $- Z_{OC1} \quad [\Omega]$

מהצד
האחר { עכבת הברואה $- Z_{O2} \quad [\Omega]$
עכבת המבוא כאשר
המוצא בקצר $- Z_{SC2} \quad [\Omega]$
עכבת המבוא כאשר
המוצא בנתק $- Z_{OC2} \quad [\Omega]$

$$Z_{O1} = \sqrt{Z_{SC1} Z_{OC1}}$$

$$Z_{O2} = \sqrt{Z_{SC2} Z_{OC2}}$$

קבוע ההתפשטות $- \gamma$

קבוע הניחות $- \alpha \quad [\text{neper}]$

קבוע המופע, זווית המופע $- \beta \quad [\text{rad}]$
בין הזרמים I_1 ו- I_2

ניחות $- N$

$$e^\gamma = e^{\alpha + j\beta} = e^\alpha \angle \beta$$

$$N = e^\alpha = \left| \frac{I_1}{I_2} \right|$$

$$N_{[\text{dB}]} = 20 \log N$$

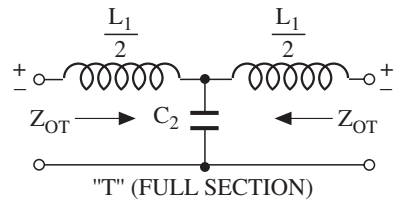
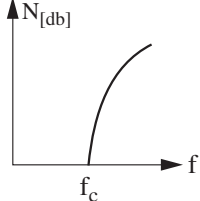
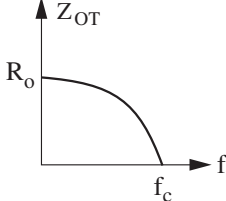
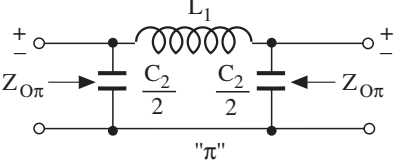
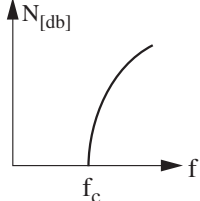
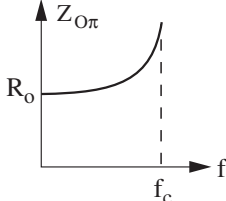
$$1 \text{ neper} = 8.69 \text{ dB}$$

מסננים מסוג K קבוע

התנגדות אופיינית R_o [Ω] -

$$R_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

מסנן LPF

constant-K LOW PASS FILTER		
CONFIGURATION	ATTENUATION	IMPEDANCE
 "T" (FULL SECTION)		
 "pi"		
$L_1 = \frac{R_o}{\pi f_c} \quad ; \quad C_2 = \frac{1}{\pi f_c R_o}$		$R_o = \text{LINE IMPEDANCE}$

תדר פוגה f_c [Hz] -

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$

כאשר $\omega < \omega_c$:

$$\beta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)$$

כאשר $\omega > \omega_c$:

$$\alpha = 2 \cosh^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)$$

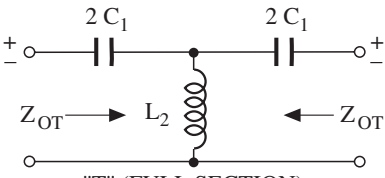
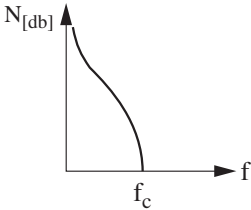
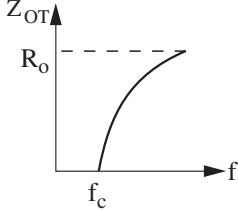
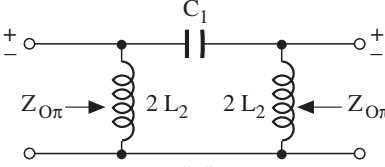
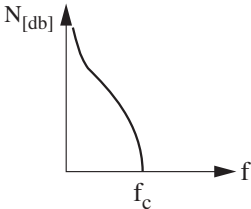
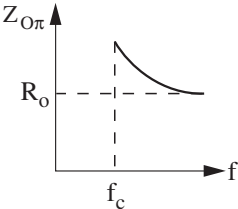
עכבה אופיינית של רשת T - Z_{OT} [Ω]
סימטרית מעבירה נמוכים

$$Z_{OT}(\omega) = R_o \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2}$$

עכבה אופיינית של רשת π - $Z_{O\pi}$ [Ω]
סימטרית מעבירה נמוכים

$$Z_{O\pi}(\omega) = \frac{R_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2}}$$

מסנן HPF

constant-K HIGH PASS FILTER		
CONFIGURATION	ATTENUATION	IMPEDANCE
 "T" (FULL SECTION)		
 "pi"		
$L_2 = \frac{R_0}{4 \pi f_c} \quad ; \quad C_1 = \frac{1}{4 \pi f_c R_0}$		$R_0 = \text{LINE IMPEDANCE}$

תדר פוגה - f_c [Hz]

$$f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}$$

כאשר $\omega > \omega_c$:

$$\beta = -2 \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)$$

כאשר $\omega < \omega_c$:

$$\alpha = 2 \cosh^{-1} \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)$$

עכבה אופיינית של רשת T - Z_{OT} [Ω]
סימטרית מעבירה גבוהים

$$Z_{OT}(\omega) = R_o \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^2}$$

עכבה אופיינית של רשת π - $Z_{O\pi}$ [Ω]
סימטרית מעבירה גבוהים

$$Z_{O\pi}(\omega) = \frac{R_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^2}}$$

בהצלחה!