

תורת האלקטרוניקה והחשמל ט'

מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים

(כיתה י"ג)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח הערכה: 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 מִרְב 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 10 עמודים ו-26 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר,

אך מכוונות לנבחנות ולנבחנים כאחד.

השאלות

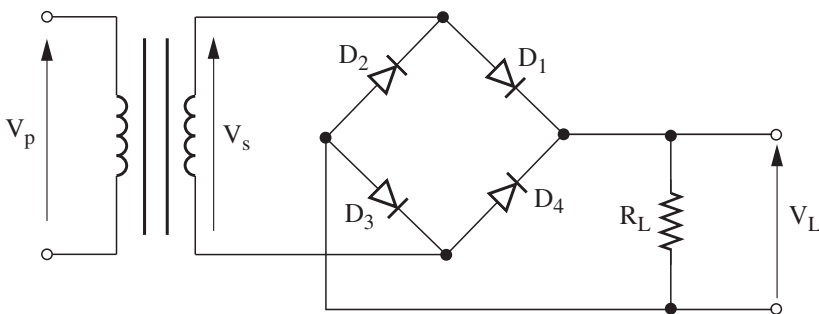
ענה על חמש מבין השאלות 1–10. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון, על שאלה אחת לפחות מן הפרק השני, ועל שאלה אחת מן הפרק השלישי.

פרק ראשון: אלקטרוניקה תקבילית א'

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

שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתון המעגל החשמלי של מיישר מתח. הדיודות במעגל – אידיאליות. התנגדות נגד העומס היא $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, והמתח בסליל המשני של השנאי הוא $V_s = 10 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t)$.



איור לשאלה 1

א. סרטט, זה מתחת לזה בהתאמה, את צורות הגלים V_s , V_L , V_{D1} ו- V_{D2} , כפונקציה של הזמן.

ב. חשב את הזרמים I_{AV} ו- I_{RMS} הזורמים בנגד העומס R_L , ואת ההספק P_{R_L} עליו.

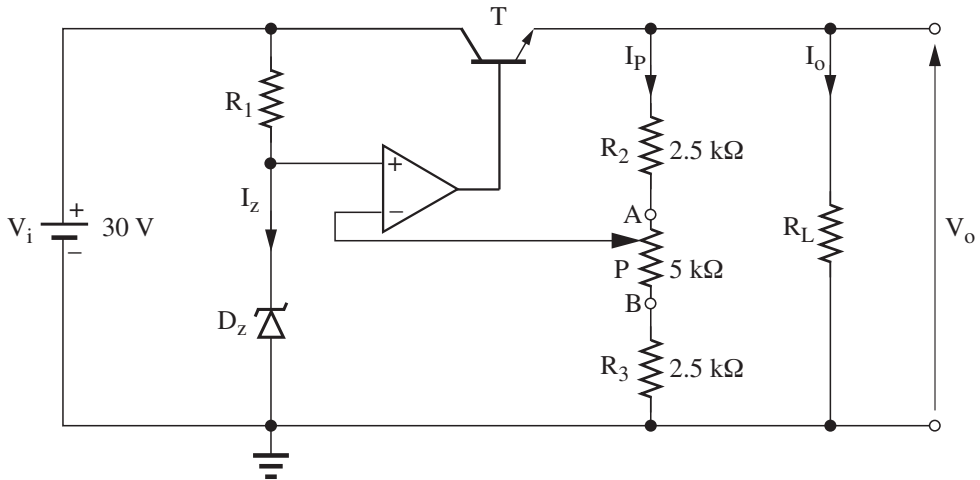
ג. מחברים קבל סינון שקיבולו $C = 100 \mu\text{F}$ על-פני נגד העומס R_L .

1. חשב את מתח האדווה על נגד העומס R_L .

2. סרטט את צורת הגל V_L כפונקציה של הזמן.

שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתון המעגל החשמלי של מייצב מתח, המוזן במתח מיושר $V_i = 30\text{ V}$.
תחום זרם-העומס, I_o , הוא $0 \div 1\text{ A}$.
נתוני דיודת-הזנר הם: $P_z = 500\text{ mW}$; $I_{z\min} = 2\text{ mA}$; $V_z = 5.6\text{ V}$,
ונתוני הטרנזיסטור הם: $\beta = 50$; $V_{BE} = 0.7\text{ V}$.



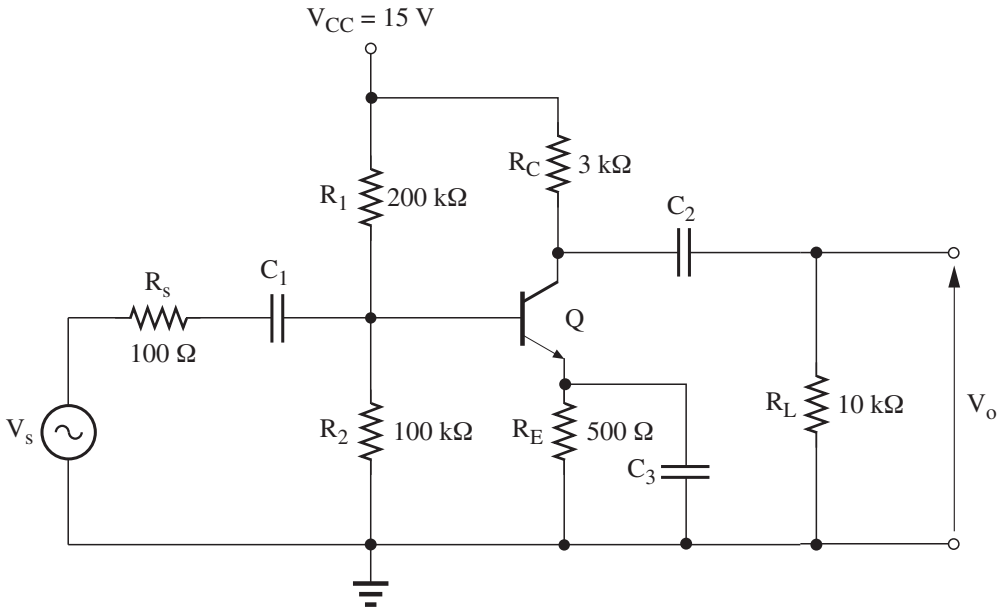
איור לשאלה 2

- א. 1. חשב את תחום הערכים של מתח המוצא V_o ($V_{o,\min} \div V_{o,\max}$), בהתאם למיקומו של זחלן הפוטנציומטר P (בנקודה A או בנקודה B).
2. חשב את המתח V_{CE} של הטרנזיסטור T, כאשר זחלן הפוטנציומטר נמצא בנקודה A.
- ב. 1. מה תפקידו של הנגד R_1 במעגל הנתון?
2. חשב את תחום הערכים האפשרי של התנגדות הנגד R_1 ($R_{1,\min} \div R_{1,\max}$).
- ג. הזנח את הזרם I_P , וחשב את הזרם המרבי הנדרש במוצא מגבר-השרת כדי לקבל זרם-עומס, I_o , של 1 A .

שאלה 3

באיור לשאלה 3 נתון המעגל החשמלי של דרגת-הגברה, המבוססת על טרנזיסטור דו-נושאי (BJT). היגבי הקבלים במעגל – זניחים.

נתוני הטרנזיסטור הם: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$; $\beta = h_{fe} = 50$; $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$.

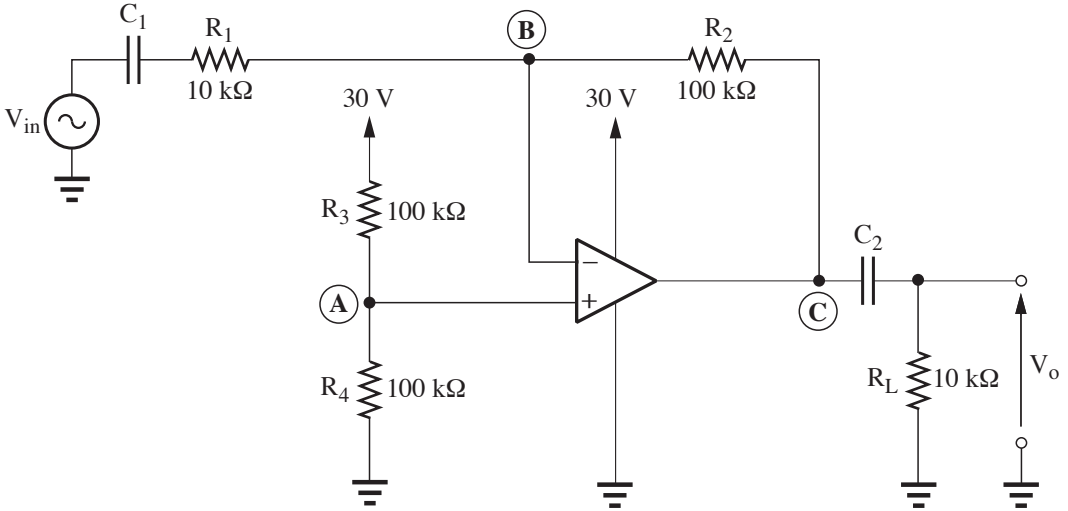


איור לשאלה 3

- א. חשב את נקודת-העבודה של הטרנזיסטור. (V_{CE} , I_C , I_B)
- ב. סרטט את מעגל התמורה לאות חילופין (AC) של דרגת-הגברה הנתונה באיור.
- ג. 1. רשום ביטוי להגבר המתח של המעגל, $A_{V_s} = \frac{V_o}{V_s}$, כפונקציה של הנגדים במעגל.
2. חשב את הגבר המתח של המעגל.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 נתון מעגל-הגברה. מגבר השרת שבמעגל – אידיאלי. היגבי הקבלים במעגל – זניחים.



איור לשאלה 4

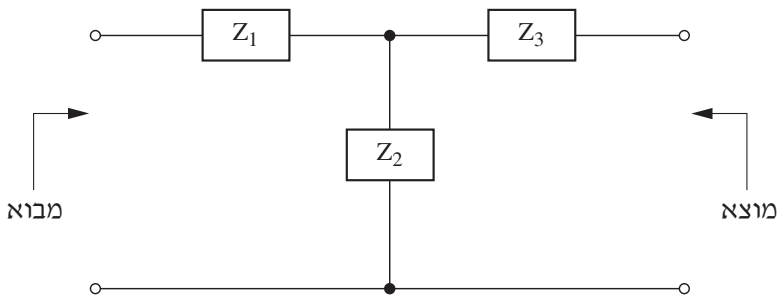
- א. מצא את המתח הישר (מתח DC) בכל אחת מן הנקודות (A), (B) ו-(C) (ביחס לאדמה) ואת המתח הישר במוצא V_o , כאשר: $V_{in} = 2 V_{DC} + 0.5 \cdot \sin(\omega t)$.
- ב. חשב את הגבר המתח $\left(\frac{V_o}{V_{in}} \right)$ לאות חילופין.
- ג. סרטט, זה מתחת לזה בהתאמה, את המתחים V_{in} , $V_{(C)}$ (המתח בנקודה (C)) ו- V_o כפונקציה של הזמן, כאשר: $V_{in} = 0.5 \cdot \sin(\omega t)$. רשום בסרטוטך את הערך המרבי ואת הערך המזערי של כל אחד מן המתחים הללו.
- ד. חשב את מתח-המבוא המרבי, $V_{in, max}$, שעבורו עדיין מתקבל מתח-מוצא V_o ללא עיוותי רוויה.

פרק שני: מבוא להנדסת חשמל

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

שאלה 5

באיור לשאלה 5 נתונה רשת זוגיים.



איור לשאלה 5

מקדמי Z של הרשת הזו הם:

$$\begin{pmatrix} Z_{11} = j6 & Z_{12} = j4 \\ Z_{21} = j4 & Z_{22} = j1 \end{pmatrix}$$

א. האם רשת הזוגיים הזו סימטרית? נמק את תשובתך.

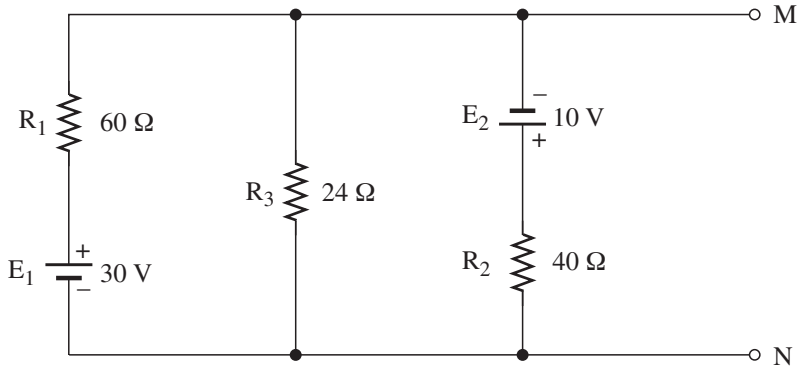
ב. חשב את העכבות Z_1 , Z_2 ו- Z_3 .

ג. חשב את מקדמי ABCD של רשת הזוגיים הזו.

ד. חשב את עכבת הבבואה של הרשת בצד המבוא.

שאלה 6

באיור לשאלה 6 נתון מעגל חשמלי.

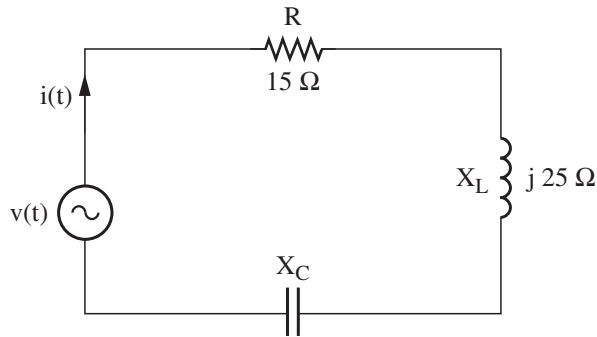


איור לשאלה 6

- א. 1. המר את מקורות המתח E_1 ו- E_2 למקורות זרם מתאימים, I_1 ו- I_2 , וסרטט את המעגל החשמלי שווה-הערך המתקבל כתוצאה מכך.
2. חשב את המתח V_{MN} , וציין את קוטביותו.
- ב. מחברים בין הנקודות M ו-N נגד-עומס R_L . חשב את ההספק על הנגד R_L , כאשר התנגדותו היא:
 1. $R_{L1} = 18 \Omega$
 2. $R_{L2} = 8 \Omega$
- ג. קבע את התנגדותו של R_L כך שההספק עליו יהיה מרבי, וחשב את ההספק הזה.

שאלה 7

באיור לשאלה 7 נתון מעגל חשמלי.



איור לשאלה 7

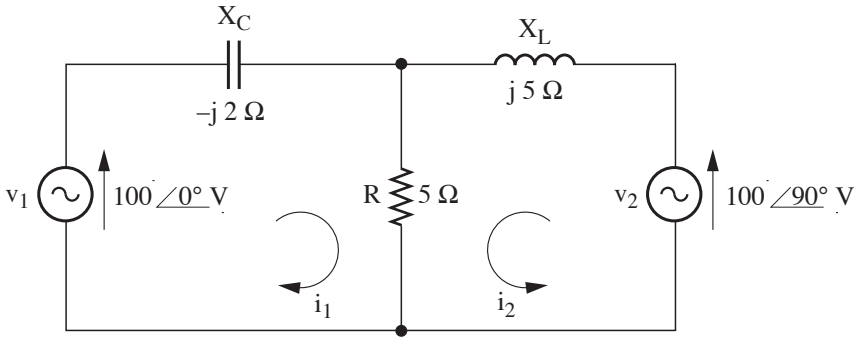
מתח המקור נתון בביטוי: $v(t) = 30 \cdot \sin(5000 t) \text{ [V]}$

והזרם במעגל נתון בביטוי: $i(t) = 2 \cdot \sin(5000 t) \text{ [A]}$

- א. הסבר, על-סמך נתוני המעגל, מדוע הוא נמצא במצב תהודה.
- ב. חשב את הערכים של רכיבי המעגל L ו- C .
- ג. חשב את המתח על הנגד R , את המתח על הקבל C ואת המתח על הסליל L .
- ד. חשב את ההספק הפעיל של מקור המתח $v(t)$.
- ה. חשב את גורם הטיב (Q) של המעגל, ואת רוחב-הפס (BW) שלו.

שאלה 8

באיור לשאלה 8 נתון מעגל חשמלי. i_1 ו- i_2 הם זרמי החוגים במעגל.



איור לשאלה 8

- א. רשום מערכת משוואות של זרמי-החוגים במעגל.
- ב. פתור את מערכת המשוואות שרשמת בסעיף א', וחשב את הזרם העובר דרך הנגד R .
- ג. חשב את ההספק הנצרך על-ידי הנגד R .
- ד. חשב את ההספק הפעיל שמספק כל אחד מן המקורות E_1 ו- E_2 . בדוק את נכונות חישוביך על-פי ההספק שחישבת בסעיף ג'.

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.

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

- א.** כיצד מגדיר מחבר המאמר ממיר אות ספרתי לאות אנלוגי, וכיצד הוא מגדיר ממיר אות אנלוגי לאות ספרתי?
- ב.** רשום **שלושה** מכשירים, שבהם משתמשים בממיר אות ספרתי לאות אנלוגי.
- ג.** מהו הקשר בין הרזולוציה של ממיר אות ספרתי לאות אנלוגי ובין מספר הסיביות האפקטיבי שלו?
- ד.** להלן שני מושגים הקשורים לממיר אות ספרתי לאות אנלוגי:
 1. תחום דינמי
 2. תדר דגימה מרביכיצד מגדיר מחבר המאמר כל אחד מן המושגים הללו?

שאלה 10

בנספח לשאלה 10 מובאים דפי-מפרט בשפה האנגלית של הרכיב XR-8038A.

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

- א.** רשום **שלוש** מתוך שבע התכונות (FEATURES) של הרכיב XR-8038A.
- ב.**
 1. בכמה תחומי-תדרים עובד הרכיב הזה, וכיצד נקבעים התחומים הללו?
 2. מהו התדר המזערי ומהו התדר המרבי שבהם עובד הרכיב?
- ג.** מהו תחום ערכי הנגדים R_A ו- R_B , הקובעים את זמן-המחזור של האות המופק על-ידי הרכיב XR-8038A?
- ד.** מהו התחום של מחזור הפעולה (Duty Cycle) של גל ריבועי המופק על-ידי הרכיב הזה?
- ה.** מהי עוצמת הגל הטיפוסית (יחסית לעוצמת מתח-המקור V_{SPLY}) המתקבלת בכל אחד מסוגי הגלים המופקים על-ידי הרכיב הזה?

בהצלחה!

זכות היוצרים שמורה למדינת ישראל.

אין להעתיק או לפרסם אלא ברשות משרד החינוך.

Digital-to-analog converter

In electronics, a **digital-to-analog converter** (**DAC**, **D/A** or **D to A**) is a device for converting a digital (usually binary) code to an analog signal (current, voltage or electric charge).

A DAC converts an abstract finite-precision number (usually a fixed-point binary number) into a concrete physical quantity (e.g., a voltage or a pressure). In particular, DACs are often used to convert finite-precision time series data to a continually-varying physical signal.

The reverse operation is performed by an **analog-to-digital converter** (abbreviated **ADC**, **A/D** or **A to D**), a device which converts continuous signals to discrete digital numbers.

Typically, an ADC is an electronic device that converts an input analog voltage (or current) to a digital number proportional to the magnitude of the voltage or current. However, some non-electronic or only partially electronic devices, such as rotary encoders, can also be considered ADCs. The digital output may use different coding schemes, such as binary, Gray code or two's complement binary.

DAC Applications

Audio

Most modern audio signals are stored in digital form (for example MP3s and CDs) and in order to be heard through speakers they must be converted into an analog signal. DACs are therefore found in CD players, digital music players, and PC sound cards.

Specialist stand-alone DACs can also be found in high-end hi-fi systems. These normally take the digital output of a CD player (or dedicated transport) and convert the signal into a line-level output that can then be fed into a pre-amplifier stage.

Similar digital-to-analog converters can be found in digital speakers such as USB speakers, and in sound cards.

Video

Video signals from a digital source, such as a computer, must be converted to analog form if they are to be displayed on an analog monitor. As of 2007, analog inputs are more commonly used than digital, but this may change as flat panel displays with DVI and/or HDMI connections become more widespread. A video DAC is, however, incorporated in any Digital Video Player with analog outputs. The DAC is usually integrated with some memory (RAM), which contains conversion tables for gamma correction, contrast and brightness, to make a device called a RAMDAC.

A device that is distantly related to the DAC is the digitally controlled potentiometer, used to control an analog signal digitally.

DAC Performance

DACs are at the beginning of the analog signal chain, which makes them very important to system performance. The most important characteristics of these devices are:

- **Resolution:** This is the number of possible output levels the DAC is designed to reproduce. This is usually stated as the number of bits it uses, which is the base two logarithm of the number of levels. For instance a 1 bit DAC is designed to reproduce 2 (2^1) levels while an 8 bit DAC is designed for 256 (2^8) levels. Resolution is related to the **Effective Number Of Bits** (ENOB) which is a measurement of the actual resolution attained by the DAC.
- **Maximum sampling frequency:** This is a measurement of the maximum speed at which the DACs circuitry can operate and still produce the correct output. As stated in the Nyquist–Shannon sampling theorem, a signal must be sampled at over twice the frequency of the desired signal. For instance, to reproduce signals in all the audible spectrum, which includes frequencies of up to 20 kHz, it is necessary to use DACs that operate at over 40 kHz. The CD standard samples audio at 44.1 kHz, thus DACs of this frequency are often used. A common frequency in cheap computer sound cards is 48 kHz – many work at only this frequency, offering the use of other sample rates only through (often poor) internal resampling.
- **Monotonicity:** This refers to the ability of a DAC's analog output to move only in the direction that the digital input moves (i.e., if the input increases, the output doesn't dip before asserting the correct output). This characteristic is very important for DACs used as a low frequency signal source or as a digitally programmable trim element.
- **Dynamic range:** This is a measurement of the difference between the largest and smallest signals the DAC can reproduce expressed in decibels. This is usually related to DAC resolution and noise floor.

Other measurements, such as phase distortion and sampling period instability, can also be very important for some applications.

XR-8038A

Precision Waveform Generator

FEATURES

- Low Frequency Drift, 50ppm/°C, Typical
- Simultaneous Sine, Triangle, and Square Wave Outputs
- Low Sine Wave Distortion - THD $\approx$ 1%
- High FM and Triangle Linearity
- Wide Frequency Range 0.001Hz to 200 kHz
- Variable Duty Cycle, 2% to 98%
- Low Distortion Variation with Temperature

APPLICATIONS

- Precision Waveform Generation
- Sweep and FM Generation
- Tone Generation
- Instrumentation and Test Equipment Design
- Precision PLL Design

GENERAL DESCRIPTION

The XR-8038A is a precision waveform generator IC capable of producing sine, square, triangular, sawtooth, and pulse waveforms, with a minimum number of external components and adjustments. The XR-8038A allows the elimination of the external distortion adjusting resistor which greatly improves the temperature drift of distortion, as well as lowering external parts count. Its operating frequency can be selected over eight decades of frequency, from 0.001Hz to 200kHz, by the choice of external R-C components. The frequency of oscillation is highly stable over a wide range of temperature and supply

voltage changes. Both full frequency sweeping as well as smaller frequency variations (FM) can be accomplished with an external control voltage. Each of the three basic waveform outputs, (i.e., sine, triangle and square) are simultaneously available from independent output terminals.

The XR-8038A monolithic waveform generator uses advanced processing technology and Schottky-barrier diodes to enhance its frequency performance.

PIN DESCRIPTION

Pin #	Symbol	Type	Description
1	SA1	I	Wave Form Adjust Input 1.
2	SWO	O	Sine Wave Output.
3	TWO	O	Triangle Wave Output.
4	DCA1	I	Duty Cycle Adjustment Input.
5	DCA2	I	Duty Cycle Adjustment Input.
6	V _{CC}		Positive Power Supply.
7	FMBI	I	Frequency Modulation Input.
8	FMSI	I	Frequency Sweep Input.
9	SQO	O	Square Wave Output.
10	TC	I	Timing Capacitor Input.
11	V _{EE}		Negative Power Supply.
12	SA2	I	Wave Form Adjust Input 2.

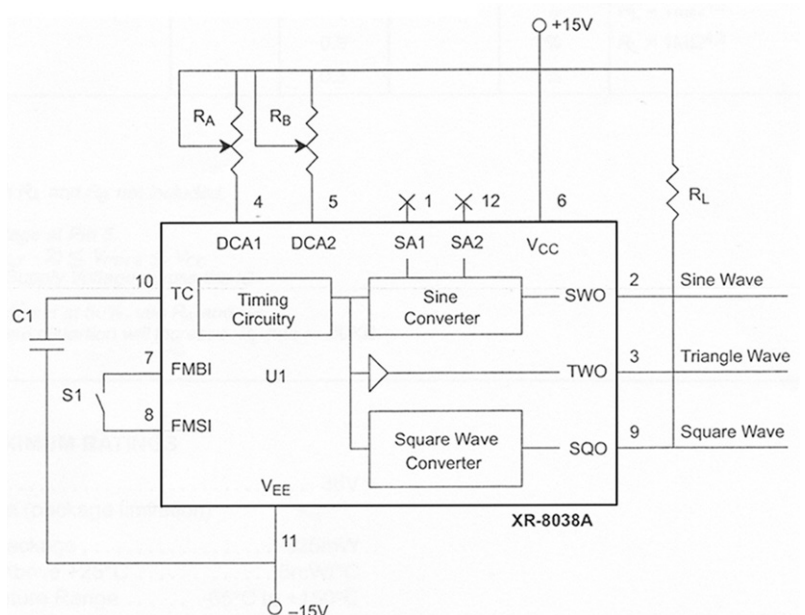


figure 1. XR-8038A Test Circuit

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: $V_S = \pm 5V$ to $\pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, $R_L = 1M\Omega$, $R_A = R_B = 10k\Omega$, $C_1 = 3300pF$, S_1 closed, unless otherwise specified (See Figure 1).

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
General Characteristics					
Supply Voltage, V_S					
Single Supply	10		30	V	
Dual Supplies	± 5		± 15	V	
Supply Current		12	20	mA	$V_S = \pm 10V^1$
Frequency Characteristics (Measured at Pin 9)					
Range of Adjustment					
Max. Operating Frequency	200			kHz	$R_A = R_B = 1.5k\Omega$, $C_1 = 680pF$; $R_L = 10k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.001		Hz	$R_A = R_B = 1M\Omega$, $C_1 = 500\mu F$ (Low Leakage Capacitor)
Max. Sweep Frequency of FM Input		100		kHz	
FM Sweep Range		1000:1			S_1 Open ^{2,3}
FM Linearity 10:1 Ratio		0.2		%	S_1 Open ³
Range of Timing Resistors	0.5		1000	k Ω	Values of R_A and R_B
Temperature Stability		50		PPM/ $^\circ C$	$T_A = 0^\circ C$ to $70^\circ C$
Power Supply Stability		0.05		%/V	$10V \leq V_S \leq 30V$ or $\pm 5V \leq V_S \leq 15V$
Output Characteristics					
Square-Wave					Measured at Pin 9
Amplitude (Peak-to-Peak)	0.9	0.98		$\times V_{SPLY}$	$R_L = 100k\Omega$
Saturation Voltage		0.2	0.5	V	$I_{SINK} = 2mA$
Rise Time		100		ns	$R_L = 4.7k\Omega$
Fall Time		40		ns	$R_L = 4.7k\Omega$
Duty Cycle Adjustment	2		98	%	
Triangle/Sawtooth/Ramp					Measured at Pin 3
Amplitude (Peak-to-Peak)	0.3	0.33		$\times V_{SPLY}$	$R_L = 100k\Omega$
Linearity		0.1		%	
Output Impedance		200		Ω	$I_{OUT} = 5mA$
Sine-Wave Amplitude (Peak-to-Peak)	0.2	0.22		$\times V_{SPLY}$	$R_L = 100k\Omega$
Distortion		0.8	3	%	$R_L = 1M\Omega^{4,5}$
Unadjusted		0.5		%	$R_L = 1M\Omega^{4,5}$
Adjusted		0.3		%	

Notes

¹ Currents through R_A and R_B not included.

² $V_{SUPPLY} = 20V$.

³ Apply sweep voltage at Pin 8.

$$V_{CC} - (1/3 V_{SUPPLY} - 2) \leq V_{PIN 8} \leq V_{CC}$$

V_{SUPPLY} = Total Supply Voltage across the IC

⁴ Triangle duty cycle set at 50%, use R_A and R_B .

⁵ As R_L is decreased distortion will increase, R_L min $\approx 50k\Omega$.

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנחשת נבחן

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]

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

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

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

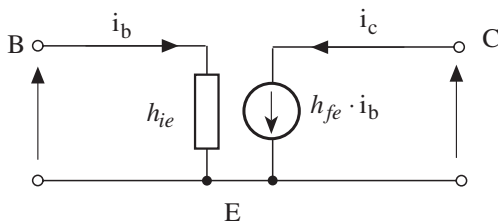
טרנזיסטור דו-נושאי (בתחום הפעיל)

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]

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

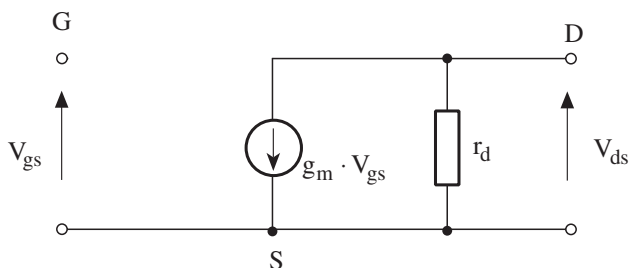
$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} \left(1 - \frac{V_{gs}}{V_p} \right)$$

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

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

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

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

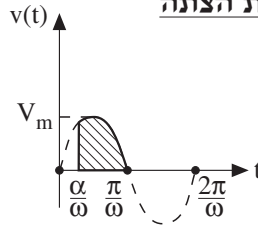
$$V_L = V_{RMS} = \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

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

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

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

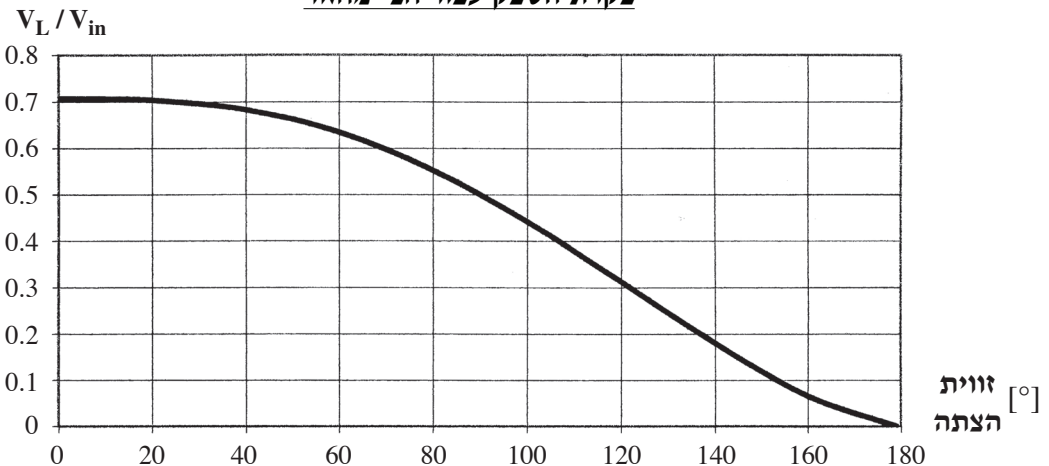
$$V_{in} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$



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

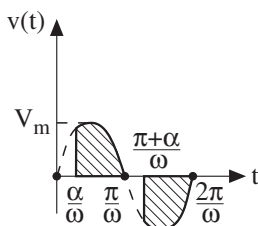


המשך בעמוד 5

ב. בקרת גל שלם בעומס אומי

ב.

זווית הצתה α [rad] -



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

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

$$V_{AV} = 0$$

$v(t)$ [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

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

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

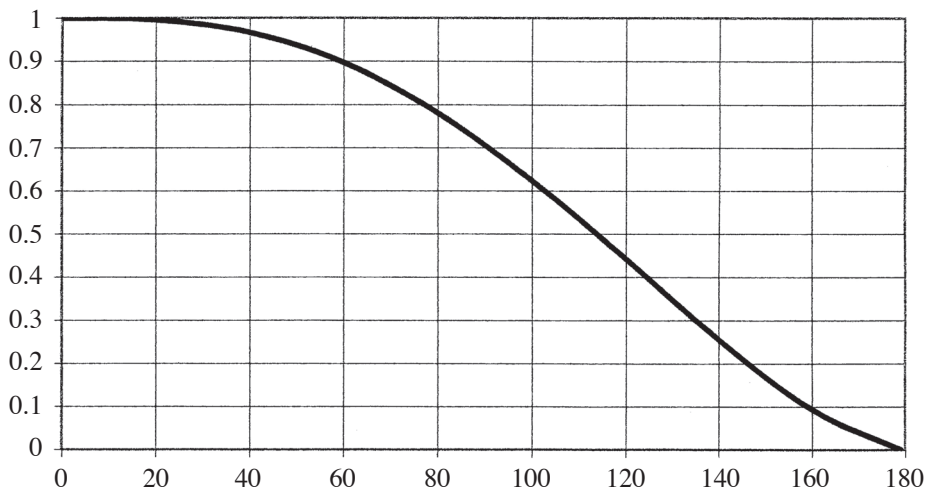
$$I_{AV} = 0$$

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

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

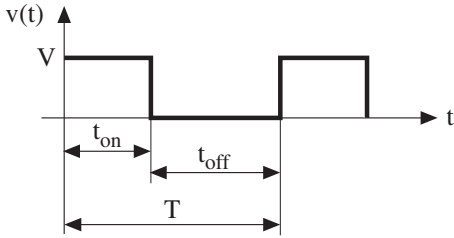
בקרת הספק עבור מחזור שלם

V_L / V_{in}



זווית הצתה $[\circ]$

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]

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

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

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

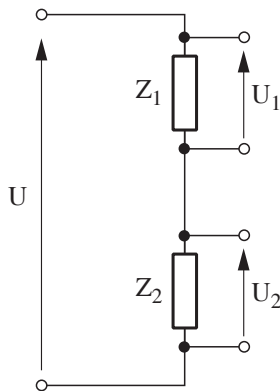
בהצלחה!

אין להעביר את הנוסחאון
לנבחן אחר

מקום לנכתוב תשובות

נוסחאון במבוא להנדסת חשמל לכיתה י"ג

(14 עמודים)

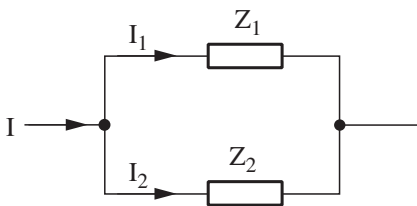


מחלק מתח

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

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

מחלק זרם



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

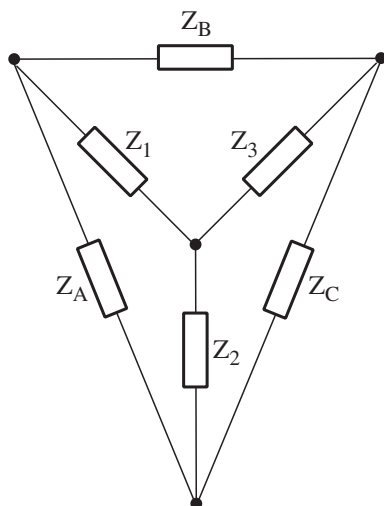
$$I_2 = \frac{I \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

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

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

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

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

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

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

$$\omega = 2\pi f$$

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

$$X_L = j\omega L$$

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

$$X_M = j\omega M = j k \sqrt{|X_{L_1}| \cdot |X_{L_2}|}$$

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]

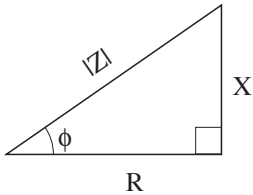
התנגדות המעגל - R [Ω]

היגב המעגל - X [Ω]

עכבת המעגל - Z [Ω]

$$Z = R \pm jX$$

משולש העכבות



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

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

;

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

;

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X}{R}$$

מוליכות המעגל - G [S]

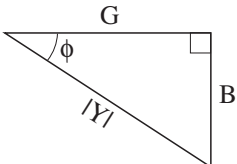
מניחות המעגל - B [S]

מתירות המעגל - Y [S]

$$Y = G \pm jB$$

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

משולש המתירויות



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

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

;

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

;

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{B}{G}$$

הספקים בזרם חילופין

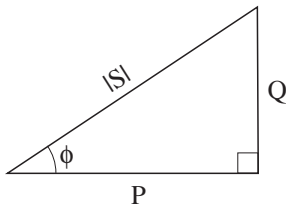
הספק פעיל	-	P	[W]
הערך המוחלט של הזרם בנגד	-	$ I_R $	[A]
הערך המוחלט של המתח על הנגד	-	$ U_R $	[V]
הספק היגבי	-	Q	[VAr]
הערך המוחלט של זרם ההיגב	-	$ I_X $	[A]
הערך המוחלט של מתח ההיגב	-	$ U_X $	[V]
הספק מדומה	-	S	[VA]
הערך המוחלט של זרם העכבה	-	$ I_Z $	[A]
הערך המוחלט של מתח העכבה	-	$ U_Z $	[V]
הצמוד של זרם העכבה	-	$ I_Z^* $	[A]

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

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

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

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



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

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

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

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

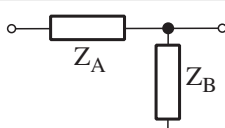
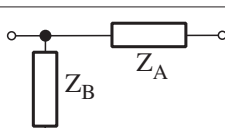
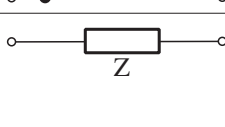
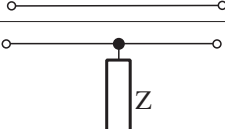
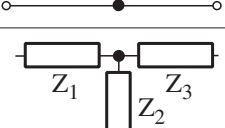
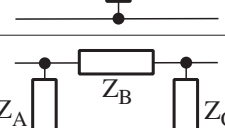
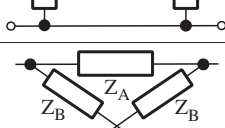
Y מקדמי

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

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

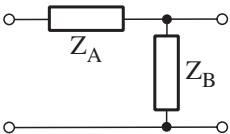
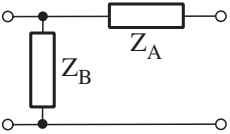
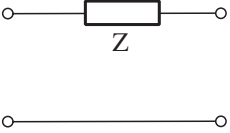
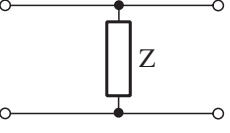
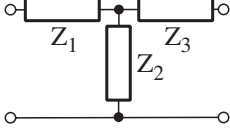
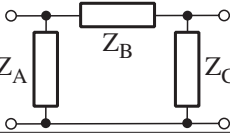
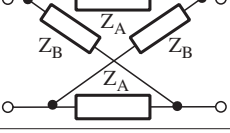
$$I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2$$

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 $- Z_O$ $[\Omega]$

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

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

מקדם זוגיים $- B$

מקדם זוגיים $- C$

(עבור רשת סימטרית בלבד)

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

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

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

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

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

קבוע ההתפשטות $- \gamma$

קבוע הניחות $- \alpha$ [neper]

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

ניחות $- N$

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

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

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

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

מסננים מסוג K קבוע

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

התנגדות אופיינית R_o $[\Omega]$ -

מסנן LPF

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

תדר פוגה f_c $[\text{Hz}]$ -

כאשר $\omega < \omega_c$:

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

כאשר $\omega > \omega_c$:

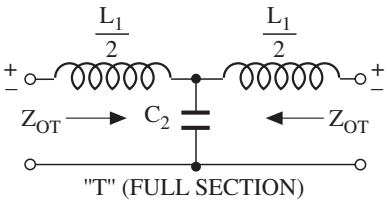
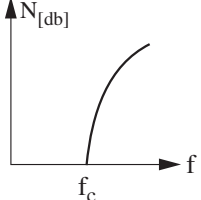
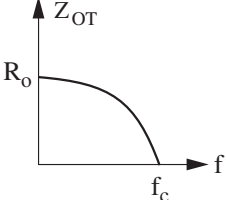
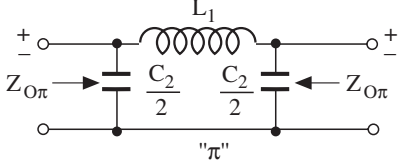
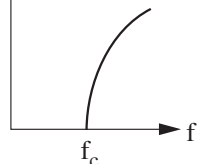
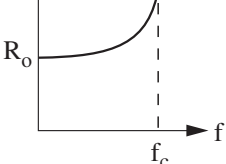
$$\alpha = 2 \cosh^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)$$

עכבה אופיינית של רשת T - Z_{OT} $[\Omega]$
 סימטרית מעבירה נמוכים

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

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

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

constant-K LOW PASS FILTER		
CONFIGURATION	ATTENUATION	IMPEDANCE
 "T" (FULL SECTION)		
 "pi"		
$L_1 = \frac{R_0}{\pi f_c} \quad ; \quad C_2 = \frac{1}{\pi f_c R_0}$		$R_0 = \text{LINE IMPEDANCE}$

מסנן HPF

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

תדר פוגה f_c [Hz] -

כאשר $\omega > \omega_c$:

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

כאשר $\omega < \omega_c$:

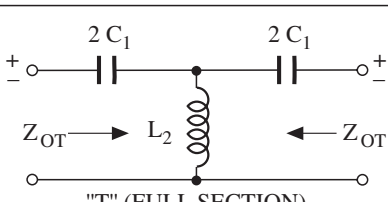
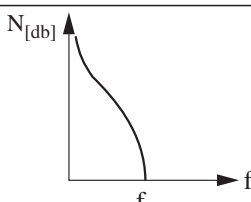
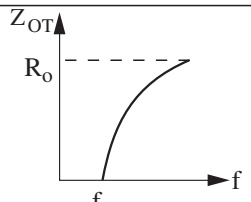
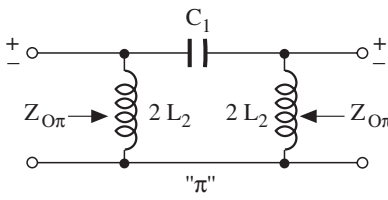
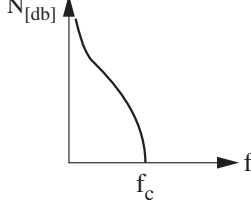
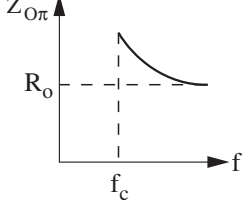
$$\alpha = 2 \cosh^{-1} \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)$$

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

$Z_{OT} [\Omega]$ - עכבה אופיינית של רשת T
 סימטרית מעבירה גבוהים

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

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

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

בהצלחה!