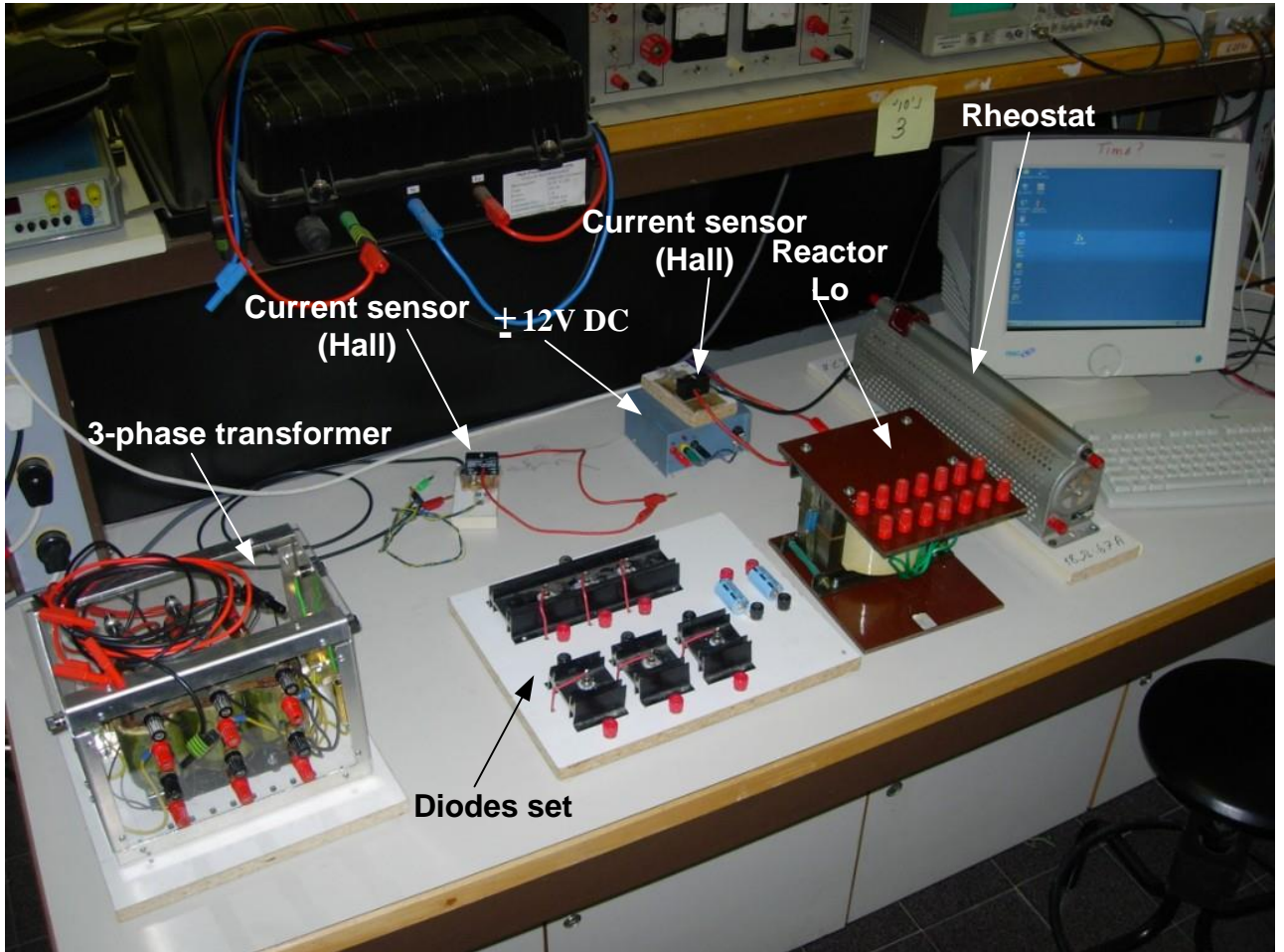


אוניברסיטת בן גוריון
 הפקולטה לטכנולוגיה
 המחלקה להנדסת חשמל ומחשבים
 מעבדה לאלקטרוניקה תעשייתית
 361-1-4373

ניסוי מס' 2a
 מעגלי מישרים המבוססים על דיודות
 (תדריך)

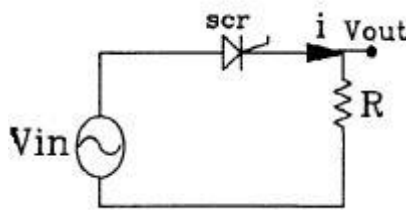


מעגלים עקרוניים

1. מבוא:

המעגלים הבסיסיים ביותר באלקטרוניקה תעשייתית, כוללים רכיבים כגון: נגדים, סלילים, קבלים, וכן אחד או שני רכיבים מוליכים למחצה, כגון: דיודות SCR-ים, טרנזיסטורים וכד'.
מעגלים אלו הינם הבסיס להבנת מעגלים מורכבים יותר, ניתוחם יאמן אותנו בניתוח מעגלים מורכבים יותר, כגון: מהפכים, מיישרים, ממירי DC ועוד. כמו כן נקבל רקע על ממירים שונים ואופן פעולתם המיוחד, התלוי בתזמון הצתות מדויק ובהתאם גם ברכיבי המעגל.

2. מעגל א': מעגל נגד ו-SCR



איור מס' 2.1: סכימת מעגל א' - מעגל נגד ו-SCR

משוואת מעגל זה:

$$V_{in} = V_{scr} + V_R = V_{scr} + iR$$

ה-SCR יוליד כאשר יתקיימו התנאים הבאים:

א. המתח על פניו יהיה חיובי.

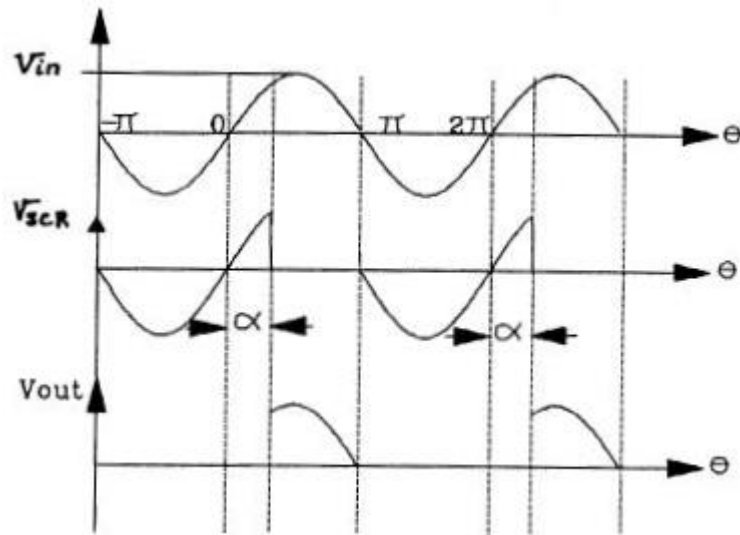
ב. נספק לו פולס הצתה.

במשך המחזור השלילי ה-SCR לא יוליד. כלומר, הזרם על פניו הינו אפס.

מתח היציאה יהיה לכן 0 במצב זה.

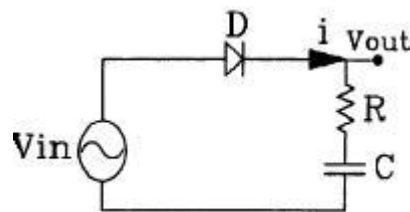
בעת שה-SCR מוליד (כלומר סיפקנו לו פולס המצה ומתח חיובי, וכן הזרם דרכו אינו אפס), מתח היציאה ישווה

למתח הכניסה, בקירוב טוב.



איור מס' 2.2: צורות המתים והזרמים במעגל א'

3. מעגל ב': נגד, קבל ודיודה



איור 2.3 - מעגל ב' - נגד, קבל ודיודה

משוואת מעגל זה היא:

$$V_{IN} = V_D + V_R + V_C$$

$$V_R = Ri, \quad V_C = \frac{1}{C} \int i dt$$

כאשר מתח המקור הינו שלילי הדיודה לא תוליך. המתח על הקבל יהיה 0 (בהנחה שהמתח ההתחלתי עליו היה 0).
 כאשר מתח המקור הינו חיובי הדיודה תוליך. המתח על הדיודה יהיה $V_D = 0.7 \div 1.2V$ עבור דיודה תעשייתית רגילה. בכל מקרה, תמיד יש מפל מתח כלשהו על דיודה מוליכה. ניתן להזניח מפל זה, רק כאשר מטפלים במתחים שמשמעותית גדולים יותר ורק כאשר מציינים זאת במפורש.

משוואת המעגל בהזנחת מפל המתח על הדיודה, תהיה במצב זה:

$$V_{IN} = Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

$$(2. א'), \quad \frac{V_m}{RC} \sin(\omega t) = \dot{V}_c + \frac{V_c}{RC}$$

$$\phi = \text{Arctg}(\omega RC)$$

$$\tau = RC$$

$$A = \frac{V_m}{RC}$$

במחזור הראשון $V_c(0) = 0$, ולכן נקבל:

$$V_c = \frac{V_m}{1 + \omega^2 \tau^2} \left[\sin(\phi) e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t - \phi) \right]$$

הדיודה תפסיק להוליך כאשר הזרם הזורם דרכה יהיה 0.

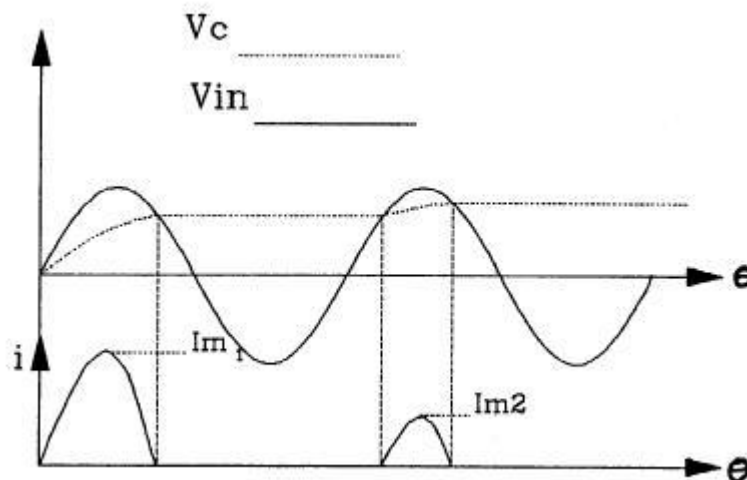
$$i_D = C \frac{dV_c}{dt} = 0$$

המתח על הקבל החל מהרגע שבה הדיודה מפסיקה להוליך יישאר קבוע, כיוון שאין לקבל מסלול פריקה. מצב זה ימשך עד אשר מתח הכניסה ישווה למתח הקבל (שלא נפרק), לכן נפתור שוב את משוואה 2. א' עם מתח התחלתי $V_c(T_1) = V_c(T_0)$. תהליך זה נמשך וחוזר על עצמו עד אשר מתח הקבל מגיע למתח המקסימאלי V_m .

הזרם במעגל:

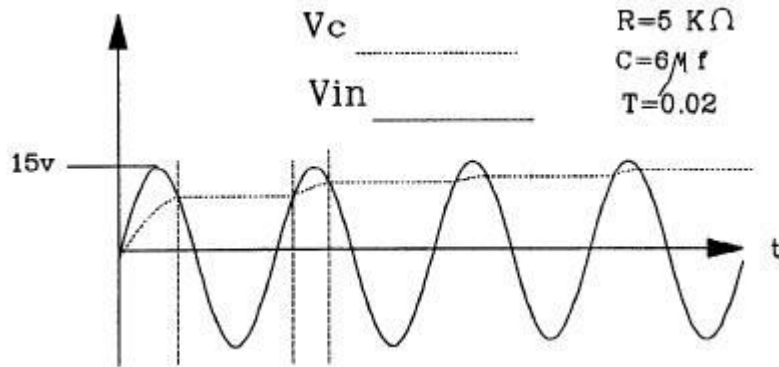
הזרם במעגל הינו: $i = C \frac{dV_c}{dt}$. והוא ניתן ע"י גזירת המשוואה 2. א' והכפלה

ב- C. כאשר מתח הקבל V_c נשאר קבוע (בזמן שהדיודה לא מוליכה) הזרם יהיה 0. בעת שהקבל נטען, הזרם יעלה מ-0 עד ל- I_{max} , וירד ל- 0 כאשר הדיודה תפסיק להוליך. I_{max} ילך ויקטן ככל שנתקדם בציר הזמן.



איור 2.4 - מעגל ב' - צורות המתחים והזרמים

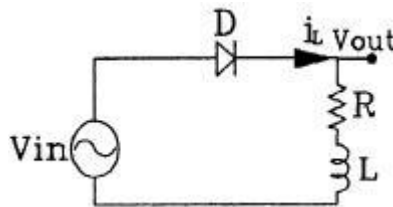
מעגל ב' - תוצאות מעשיות:



איור מס' 2.5 - תוצאות מעשיות

4. מעגל ג' - נגד, סליל ודיודה:

במעגל זה ישנם נגד, סליל ודיודה המחוברים בטור.



איור מס' 2.6 - מעגל ג' - נגד, סליל ודיודה

משוואת המעגל הינה:

$$V_{in} = V_D + iR + L \frac{di}{dt}$$

$$V_{in} = V_m \sin(\omega t)$$

כאשר הדיודה אינה מוליכה, המתח על הסליל $V_L = 0$.

כאשר הדיודה מוליכה, המתח על הדיודה יהיה $V_D = 0.7 \div 1.2 \text{ V}$ עבור דיודה תעשייתית רגילה. בכל מקרה, תמיד יש מפל מתח כלשהו על דיודה מוליכה. ניתן להזניח מפל זה, רק כאשר מטפלים במתחים שמשמעותית גדולים יותר ורק כאשר מציינים זאת במפורש.

משוואת המעגל תהיה בהזנחת מפל המתח על הדיודה:

$$V_{in} = iR + L \frac{di}{dt} \quad (2.2 \text{ ב.})$$

$$\tau = \frac{L}{R}, A = \frac{V_m}{L} \quad \text{נקבע:}$$

זרם הסליל בתחילה $I(0) = 0$. נקבל פתרון למשוואה 2.2 ב.:

$$i_L = \frac{V_m}{R^2 + \omega^2 \tau^2} \left[\sin(\phi) e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t - \phi) \right] \quad (2.2 \text{ ג.})$$

$$\phi = \text{Arctg}(\omega \tau)$$

הדיודה תפסיק להוליך כאשר הזרם דרכה יתאפס, כלומר $i_L = 0$.

וכן, ניתן למצוא את T_1 , שבו $i = 0$.

כלומר:

$$\sin(\phi)e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t - \phi) = 0$$

המתח על הסליל יהיה:

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$V_L = \frac{L \cdot V_m}{R^2 + \omega^2 \tau^2} \left[\frac{-\sin(\phi)e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau} + \omega \tau \cos(\omega t - \phi) \right]$$

ברגע T_1 נקבל: $V_L = V_m \sin(\omega T_1)$, כלומר, המתח על הסליל יהיה מתח הכניסה ברגע זה.

ניתוח מצב קיצוני בו $L > 0, R = 0$:

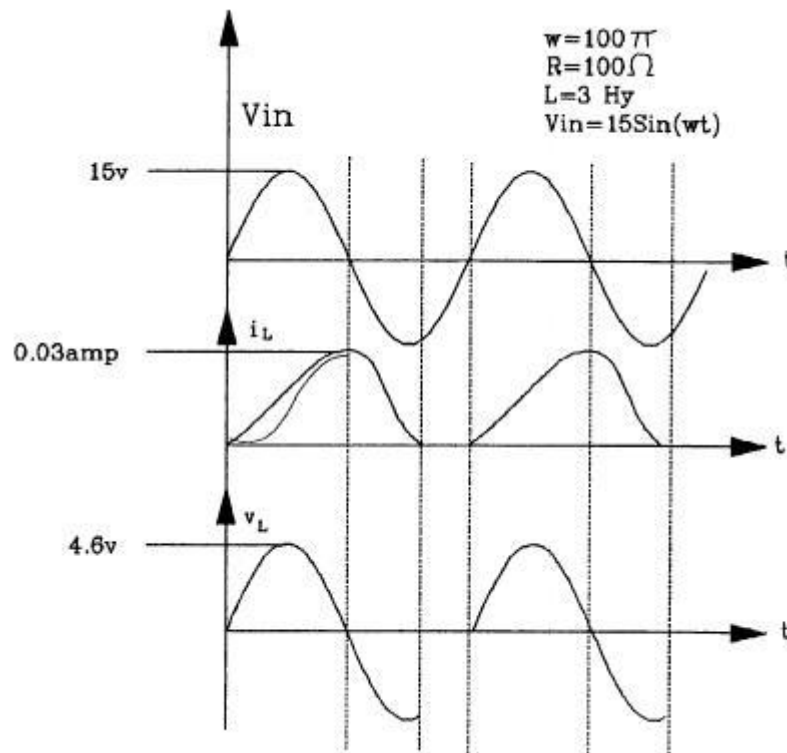
במצב זה נקבל:

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ שואף לאינסוף.}$$

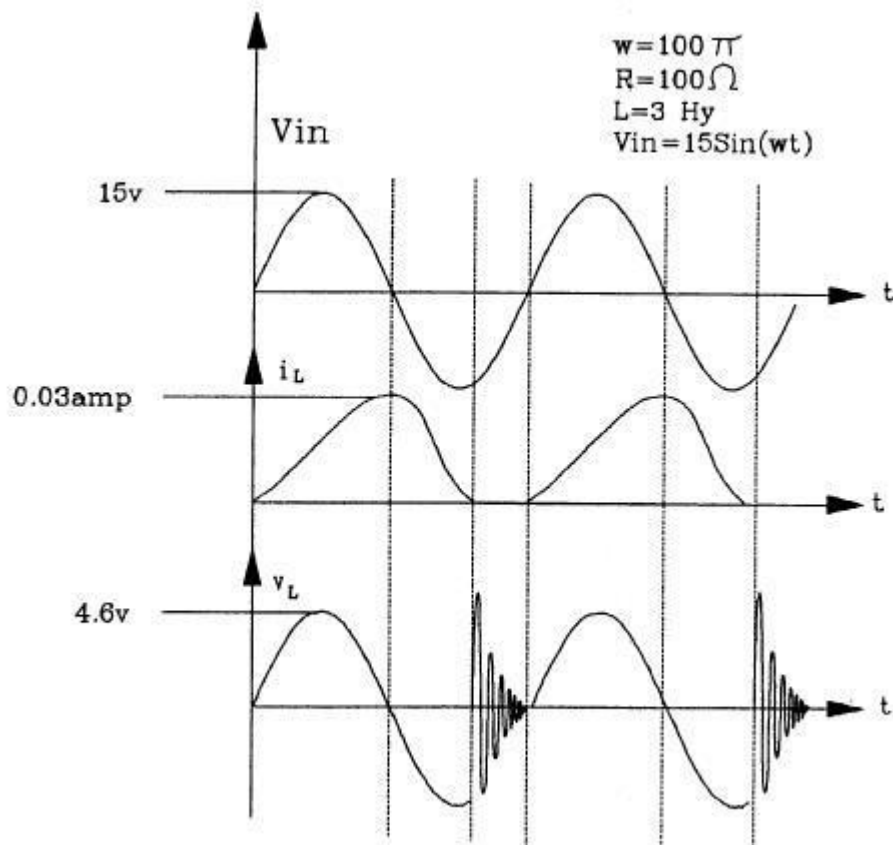
$$\phi = \text{Arctg}(\omega\tau) = \frac{\pi}{2}$$

נציב במשוואה 2.7 ונקבל ביטוי ל- i_L .

$$i_L = \frac{V_m}{\omega L} [1 - \text{Cos}(\omega t)]$$



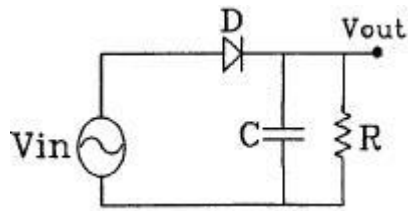
איור מס' 2.7 - זרמים ומתחים במעגל ג'



איור מס' 2.8 - תוצאות מעשיות

אנו רואים שהתוצאות תואמות את התיאוריה, מלבד V_L .
 כאשר הדיודה מפסיקה להוליך, אנו רואים שהמעגל מתנהג כמעגל RLC . דבר זה נובע מאי אידיאליות של הרכיבים,
 המכילים קיבולים פרזיטיים על הדיודה, הקבל והסליל.

5. מעגל ד' - דיודה, קבל ונגד במקביל:



איור מס' 2.9 - מעגל ד' - דיודה, קבל ונגד במקביל

במעגל זה הקבל הינו במקביל לנגד. פעולת המעגל הינה:

א. כאשר הדיודה מוליכה: $V_C = V_{in}$ בהזנחת מפל המתח על הדיודה.

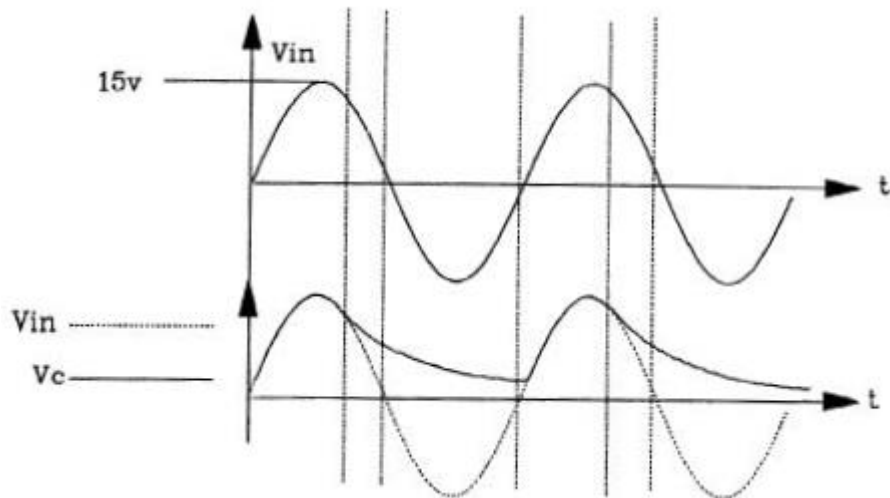
ב. כאשר הדיודה מפסיקה להוליך, הקבל נפרק דרך הנגד בקבוע זמן $\tau = RC$.

הדיודה לא תוליך עד אשר הממתח עליה יהיה שוב חיובי.

כלומר, כאשר נקבל:

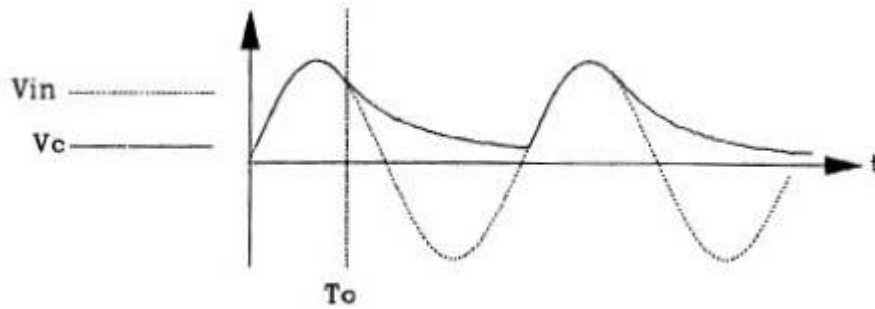
$$V_{in} \sin(\omega t) = V_C(t_0) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

t_0 - הרגע בו הדיודה מפסיקה להוליך.



איור מס' 2.10 - צורות המתחים במעגל ד'

חישוב זמן הפסקת ההולכה t_0 :



איור מס' 2.11 - חישוב זמן הפסקת ההולכה

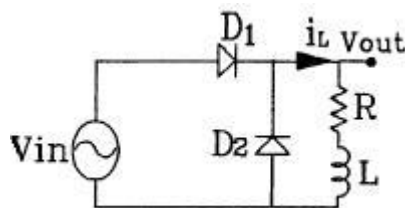
כפי שנאמר, הדיודה תפסיק להוליך כאשר הזרם דרכה יתאפס. כלומר, כאשר $I_D = 0$.

$$i_D = C \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R}$$

$$i_D = C\omega V_m \cos(\omega t_0) + \frac{V_m}{R} \sin(\omega t_0)$$

$$t_0 = -\text{Arctg}(\omega CR)$$

6. מעגל ה' - נגד, סליל ושתי דיודות (מכפל זרם):



איור מס' 2.11 א' - מעגל ה' - מכפל זרם

מעגל זה הינו שיפור של מעגל ג'. במעגל זה מוסיפים דיודה נוספת במקביל לעומס. התפקיד של דיודה D_2 :

א. מניעת מתח שלילי על העומס.

ב. הדיודה מהווה מסלול פריקה לזרם העומס כאשר דיודה D_1 אינה מוליכה.

מעגל זה נקרא לפעמים מעגל מכפל זרם כיוון שכאשר העומס הינו מאוד השראותי, הזרם הממוצע לאורך מחזור הינו, בקירוב, פי שניים מזרם ספק המתח.

ניתוח המעגל:

כאשר מתח הכניסה חיובי, D_1 מוליכה ואילו D_2 אינה מוליכה. מעגל זה מתנהג במצב זה כמעגל ג' (כאשר הדיודה מוליכה).

כאשר מתח הכניסה שלילי, דיודה D_1 מפסיקה להוליך, ואילו דיודה D_2 מתחילה להוליך. הזרם I_L יתפרק דרך הדיודה D_2 לפי הנוסחה הבאה:

$$(\text{ד.2}), i_L = i_L(t_1)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

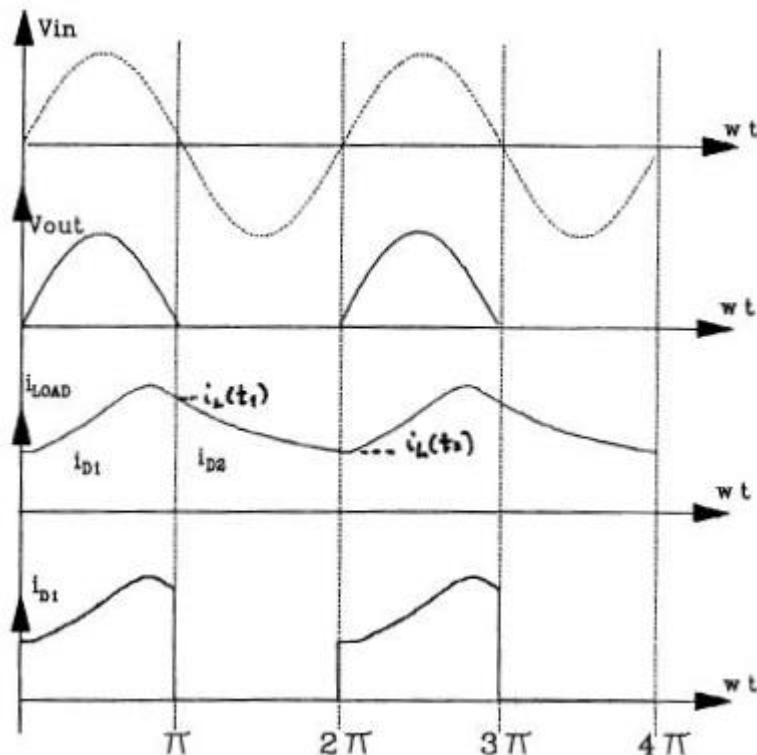
כאשר הזרם $i_L(t_1)$ הינו הזרם בעת שדיודה D_1 מפסיקה להוליך. כיוון שהדיודה מפסיקה להוליך ברגע $\theta = \pi$ (או $\omega t_1 = \pi$) הרי נוכל למצוא זרם זה ע"י הצבת תנאי זה במשוואת הזרם של מעגל ג' (משוואה ג.2), נקבל:

$$i_L(t = \frac{\pi}{\omega}) = \frac{V_m \sin(\phi)}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[e^{-\frac{\pi}{\omega \tau}} + 1 \right]$$

ברגע $t_2 = \pi$, מתח הכניסה שוב חיובי, הדיודה D_2 תפסיק להוליך והדיודה D_1 שוב תחל להוליך. הזרם $i_L(t_2)$ יתקבל ע"י הצבתו במשוואת הזרם (משוואה ד.2):

$$i_L(t_2 = \frac{2\pi}{\omega}) = i_L(t_1)e^{-\frac{t_2}{\tau}}$$

בצורה זו הזרם יתכנס לצורה מחזורית קבועה. צורת המתחים והזרם על העומס מתוארות באיור מס' ב.2.11.



איור מס' ב.2.11 - צורות המתחים והזרמים במעגל ה'

מטרת הניסוי :

הכירות עם מספר מעגלים פשוטים בהם משתמשים בתעשייה.

הגדרות :

דיודה-התקן בלתי מבוקר עם צומת n-p אחת המוליך רק בכיוון אחד.

פרמטרים של הדיודה :

- $I_{F(AV)}$	ערך נקוב של הזרם בהולכה;
- $I_{F(RMS)}$	ערך נקוב אפקטיבי של הזרם בהולכה;
- V_{RRM}	מתח הפוך מקסימלי חוזר;
- T_j	טמפרטורה מקסימאלית צומת n-p ;
- $V_{F(TO)}$	מתח הסף, מתח שבו הדיודה מתחילה להוליך;
- r_f	התנגדות של הדיודה במצב ההולכה;
- V_{FM}	מפל מתח מקסימאלי על הדיודה;

מיישר 3-פאזי, 1-פאזי -	ממיר AC-DC עם מספר פאזות 1 או 3 בהתאמה.
מיישר חד-דרכי -	במעגל הספק זרם זורם פעם אחת במחזור;
מיישר דו-דרכי -	במעגל הספק זרם זורם פעמיים במחזור בכיוונים מנוגדים;

פעילות של מתח מיישר :

- I_d/V_d	שינוי מחזורי של מתח מיישר במשך מחזור שלם של מתח הספק;
- I_{d_max}/V_{d_max} ($V_{d_min}; I_{d_min}$)	ערך ממוצע של מתח/זרם מיישר;
- $\Delta V(\Delta I)$	עומק פעילות של המתח המיישר (ripple) -
- $\Delta \theta$	זווית המוליכות-משך זרימת הזרם במעלות;
- Cr	מקדם שיא (Crest-factor), מאפיין עיוות הזרם או מתח -
- K_d	מקדם יישור (Rectification factor), מאפיין עיוות הזרם או מתח -
- P_d	הספק של זרם מיישר - $P_d = V_d * I_d$
- P_{ad}	הספק אקטיבי של זרם מיישר: ערך ממוצע של זרם מיישר במחזור;
- V_{D-peak}	ערך שיא של המתח על הדיודה;
- V_{ph-rms}	מתח פאזה ההספק;
- V_{L-rms}	מתח קו ההספק;
- I_{ph-rms}	זרם פאזה ההספק;
- I_{L-rms}	זרם קו ההספק;
- $I_{ph-peak}$	ערך שיא של זרם הקו;
- I_{ph-d}	רכיב DC של הזרם פאזה (קו);

תרגילים ההכנה

בצע סימולציה (ניספח 1)

בדוח מכין יש להציג רק תוצאות סימולציה ומסקנות1. ציוד לניסוי

מדגם.

-T₁ שנאי תלת פאזי 400/20V;5A עם 2 ליפופים משניים;-S₁,S₂ חיישני הול (Hall) למדידת זרם (0.1V → 1A);

-M רב מודד;

-L₀ סליל (Reactor) במעגל העומס 400mH/5A;-R_{load} נגד עומס (rheostat) 20Ω – 80Ω/3.1A;

מחשב

סקופ KeySight (ניספח 5);

כבלים (probe) מדידה עם מחלק מתח 1:10 – 2 יח"י.

כבל מדידה (BNC-BNC) – 2 יח"י;

חוטים בננה - בננה

אדום : 1.0מ" – יח"י, 0.5מ" – יח"י, 0.2מ" – יח"י

סגול : 1.0מ" – יח"י, 0.5מ" – יח"י

שחור : 1.0מ" – יח"י, 0.5מ" – יח"י, 0.2מ" – יח"י

2. הכנה לניסוי

הפעל מתג סט חיישנים

באמצעות תפריט המכשיר

עדכן ערוצים:

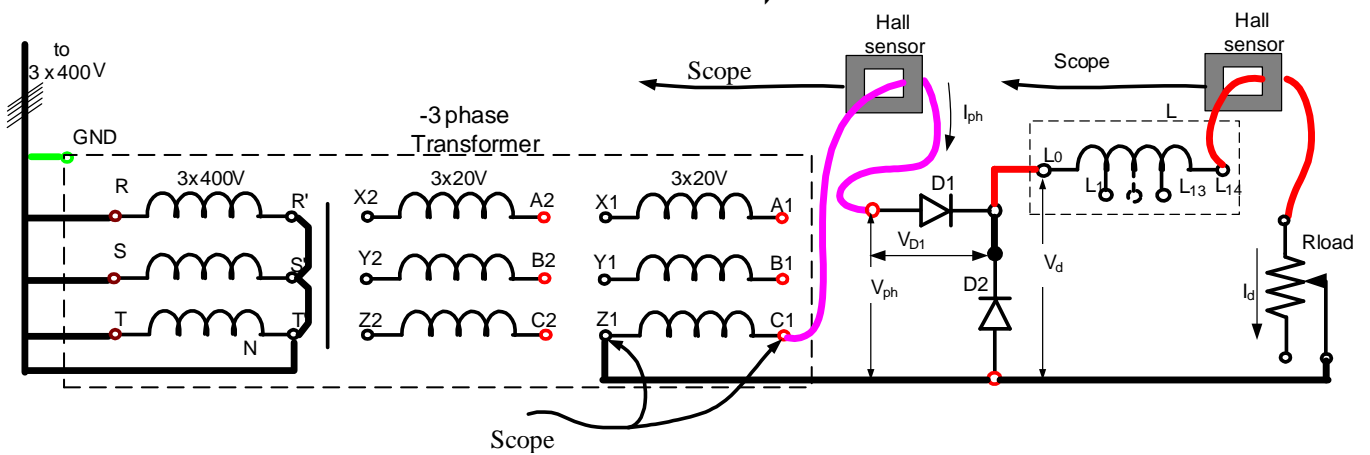
1. מתח 1:10

2. זרם 1:10 (0.1V/A)

3. מתח 1:10

4. מתח 1:10

3.2 מישר חד-דרכי עם דיודה בממתח הפוך



איור 2

1/2 wave rectifier with RL-load and back diode
מעגל מישר חד-דרכי עם עומס אקטיבי-השראי ודיודה בממתח הפוך

החוטים הנדרשים:

- בננה – בננה
- אדום** : 1.0 מ"מ – יח"י, 0.5 מ"מ – יח"י,
- סגול** : 0.5 מ"מ – יח"י,
- שחור** : 1.0 מ"מ – יח"י, 0.5 מ"מ – יח"י

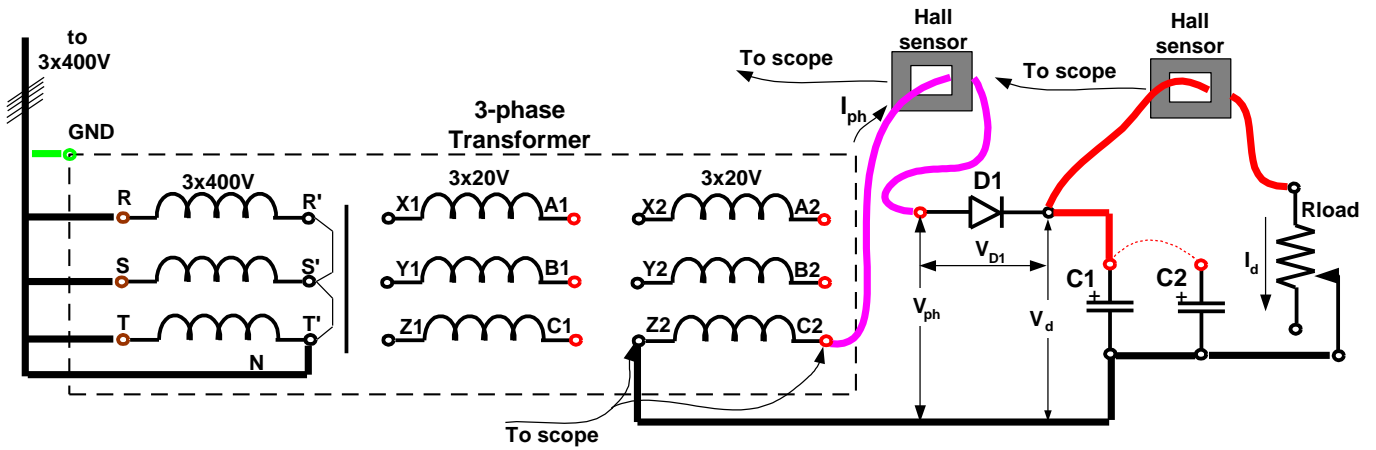
- 3.2.1. חבר את המעגל באיור 2 ללא עומס R_{load} .
- 3.2.2. השראות L_0 בטווח של $5 \div 15 \text{mH}$.
- 3.2.3. וודא שכבלי מדידה מחוברים לסקופ.
- 3.2.4. קבל את רשות המדריך להמשך הניסוי.
- 3.2.5. דאג שגודל ההתנגדות R_{load} יהיה מכסימלי.
- 3.2.6. חבר שנאי T1 לרשת $3 \times 400 \text{Vac}$ והפעל את העומס R_{load} .
- 3.2.7. קבע ע"י R_{load} לקבלת זרם הפאזה I_{ph_peak} בטווח $2 \div 3 \text{A}$.
- 3.2.8. בצע מדידות **זרמים** ורשום תוצאות בטבלה 2.1.
- 3.2.9. בצע מדידות **זווית** המוליכות הנגד עומס ודיודות **D2, D1**.
- 3.2.10. שמור במחשב צורות מתח $V_{ph}, I_{ph}; I_{ph}, I_d$.
- 3.2.11. בצע מדידות **מתחים** ורשום תוצאות בטבלה 2.1.
- 3.2.12. הגדל את השראות הסליל עד $2 * L_0$.
- 3.2.13. שנה R_{load} עד שערכו של זרם הפאזה I_{ph_peak} יהיה כמו בסעיף 3.2.7.
- 3.2.14. חזור על הסעיפים 3.2.8 ÷ 3.2.12.
- 3.2.15. שנה את R_{load} לקבלת זרם מינימאלי ונתק את שנאי T1 מרשת. הוצא את התקע מהקיר!

2.1 טבלה

$L_{reactor}, \text{mH}$	$V_{ph_rms} (V_{Z2,C2}), \text{V}$	I_{ph_rms}, A	I_{ph_peak}, A	I_{ph_aver}, A	I_d, A	I_{d_max}, A	I_{d_min}, A	V_d, V

V_{D1_peak}, V	V_{D2_peak}, V	α_{D1}, ms	$\Delta\theta_{D1}, \text{ms}$	α_{D2}, ms	$\Delta\theta_{D2}, \text{ms}$	$\Delta\theta_{Rload}, \text{ms}$

3.3. מישור חד דרכי עם עומס קיבולי-אקטיבי



איור 3

1/2 wave rectifier with RC-load
מעגל מישור חד-דרכי עם עומס קיבולי-אקטיבי

החוטים הנדרשים:

- בננה – בננה
- אדום** : 1.0 מ"מ – 2 יח", 0.5 מ"מ – 1 יח", 0.2 מ"מ – 1 יח",
- סגול** : 0.5 מ"מ – 2 יח",
- שחור** : 1.0 מ"מ – 1 יח", 0.5 מ"מ – 1 יח", 0.2 מ"מ – 1 יח",

3.3.1. חבר את המעגל באיור 3 בלי קבלים ועם עומס R_{load} מינימאלי (התנגדות מכסימלית).

3.3.2. וודא שכבלי המדידה מחוברים לסקופ.

3.3.3. קבל את רשות המדריך להמשך הניסוי.

3.3.4. דאג שגודל ההתנגדות R_{load} יהיה מכסימלי.

חבר שנאי T1 לרשת $3x400Vac$

מפעיל את העומס R_{load} .

3.3.5. קבע ע"י R_{load} שערכו של זרם הפאזה I_{ph_peak} יהיה בטווח $2 \div 3A$ (כמו בסעיף 3.2.7).

3.3.6. בחר וחבר קיבול C

3.3.7. בצע מדידות זרמים ורשום תוצאות בטבלה 3.1.

3.3.8. בצע מדידות זונויות המוליכות הנגד עומס ודיודה $D1$.

3.3.9. שמור במחשב צורות מתח $V_{ph}, I_{ph}; I_{ph}, I_d$

3.3.10. בצע מדידות מתחים ורשום תוצאות בטבלה 3.1.

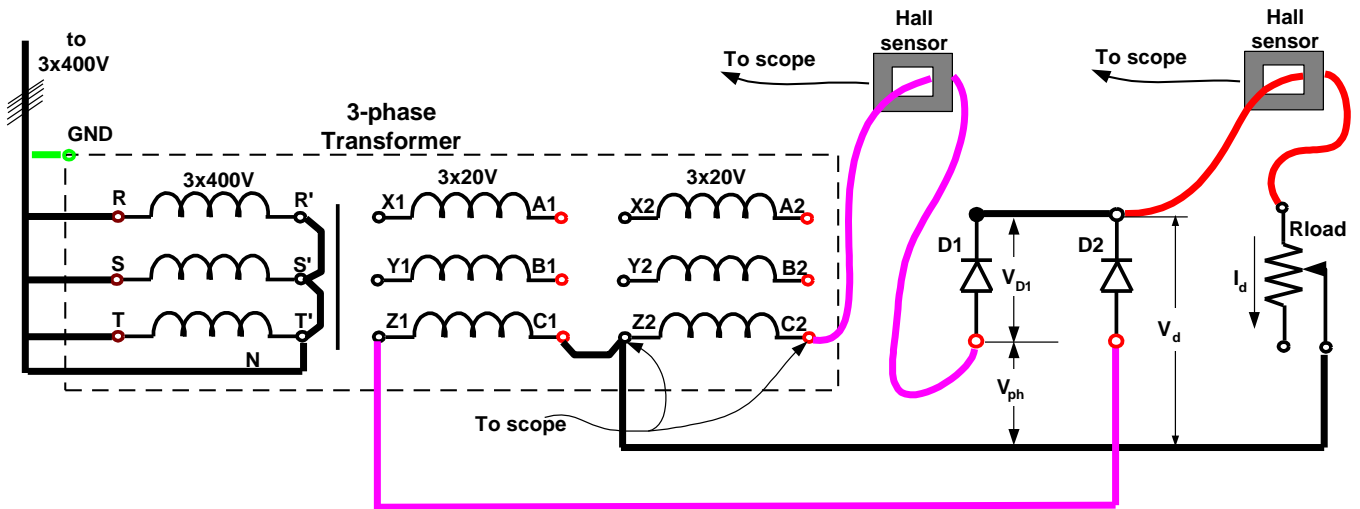
3.3.11. שנה את R_{load} לקבלת זרם מינימאלי ונתק שנאי T1 מרשת.

טבלה 3.1

C, μF	V_{ph_rms} ($V_{Z2,C2}$), V	V_d , V	V_{D1_peak} , V	I_d , A	I_{d_max} , A	I_{d_min} , A

α_{D1}, ms	$\Delta\theta_{D1}$, ms	$\Delta\theta_{Rload}$, ms	I_{ph_rms} , A	I_{ph_peak} , A	I_{ph_aver} , A

3.4. מישר דו דרכי עם שנאי בעל סנף אמצעי (Center-tab transformer)



איור 4.

Single phase 2/2 (full-) wave rectifier with center tab.
מעגל מישר דו-דרכי חד-פאזי עם שנאי בעל סנף אמצעי

החוסים הנדרשים:

בננה – בננה

אדום : 1.0 מ" – 1 יח", 0.5 מ" – 2 יח",

סגול : 1.0 מ" – 2 יח",

שחור : 1.0 מ" – 1 יח", 0.2 מ" – 1 יח",

3.4.1. הרכב את המעגל באיור 4 ללא עומס R_{load} .

3.4.2. וודא שכבלי מדידה מחוברים לסקופ.

3.4.3. קבל את רשות המדריך להמשך הניסוי.

3.4.4. דאג שגודל ההתנגדות R_{load} יהיה מכסימלי.

חבר שנאי T1 לרשת $3 \times 400 \text{Vac}$

מפעיל את העומס R_{load} .

3.4.5. קבע ע"י R_{load} שערכו של זרם הפאזה I_{ph_peak} יהיה בטווח $2 \div 3 \text{A}$. (כמו בסעיף 3.2.7)

3.4.6. בצע מדידות זרמים ורשום תוצאות בטבלה 4.1.

3.4.7. בצע מדידות זווית המוליכות הנגד עומס ודיודה **D1**.

3.4.8. שמור במחשב צורות מתח V_{ph} , I_{ph} ; I_{ph} , I_d

3.4.9. בצע מדידות מתחים ורשום תוצאות בטבלה 4.1.

3.4.10. שנה את R_{load} לקבלת זרם מינימלי ונתק שנאי T1 מרשת.

טבלה 4.1

V_{ph_rms} ($V_{Z2,C2}$), V	I_{ph_rms} , A	I_{ph_peak} , A	I_{ph_aver} , A	V_{D1_peak} , V	I_d , A	I_{d_max} , A	I_{d_min} , A	V_d , V	$\Delta\theta_{D1}$, ms	$\Delta\theta_{Rload}$, ms

4. סוף הניסוי

פרק את המעגל וסדר מקום העבודה.