

המחלקה לחשמל קירור ומיזוג אוויר

אלקטרוניקה של מערכות הספק

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים

2013

דרך הטייטס 28, ת.ד. 62137, תל-אביב 61620, טל: 03-6302333, פקס: 03-6311153

28 DERECH HATAYASIM STR. P.O.Box 62137, TEL-AVIV 61620; Tel: 972-3-6302333

כתובת אינטרנט: <http://s.ort.org.il>

אורט ישראל- חברה לתועלת הציבור חל"צ / 174

תוכן עניינים:

פרק 1 - מבוא	עמ' 4
פרק 2 - ממירים AC to DC:	
2.1.0 - מישרים חד מופעיים	עמ' 5-16
2.4.0 - מתח פריצה אחורי PIV	עמ' 17
2.5.0 - מישרים מעשיים	עמ' 18-21
2.6.0 - מישרים תלת מופעיים	עמ' 22-28
פרק 3 - תריסטורים בבקרת הספק	
3.1.0 - מבוא לתריסטורים	עמ' 29
3.1.1 - רכיב ה- SCR	עמ' 29-43
3.2.1 - רכיב ה- Triac	עמ' 44-48
3.3.1 - רכיב ה- Diac	עמ' 49-59
3.4.0 - מיתוג בנקודת האפס Z.V.S	עמ' 60-63
3.5.0 - מתגים אלקטרוניים נוספים	עמ' 64-66
3.6.0 - תריסטורים מיוחדים	עמ' 67-68
פרק 4 – בקרת הספק לזרם ישר	
4.1.0 - באמצעות SCR	עמ' 69-71
4.2.0 - באמצעות SCR-ים וקבל קומוטציה	עמ' 72-74
4.3.0 - באמצעות מגבר שרת וטרנזיסטור	עמ' 75-78
פרק 5 - ממירים DC to AC:	
5.1.0 - מהפך חצי גשר	עמ' 79-80
5.2.0 - מהפך גשר שלם	עמ' 80
5.3.0 - מהפך דח-סוף	עמ' 81-82
5.4.0 - הפיכת גל ריבועי AC לגל סינוס	עמ' 83
5.5.0 - ממיר מהדהד טורי	עמ' 84-86

פרק 6 – ממיר תדר

6.0.0- מבוא לממירי תדר עמ' 87-88

6.1.0- ממיר תדר ח"פ מרשת ת"פ עמ' 89-90

6.2.0- ממיר תדר ת"פ מרשת ת"פ עמ' 91-92

פרק 7 – מיצבים

7.1.0- מיצבים ליניאריים עמ' 93-96

7.2.1- מבוא למיצבים ממותגים עמ' 97

7.2.2- ממיר מוריד מתח עמ' 98-105

7.2.3- ממיר מעלה מתח עמ' 106-113

7.2.4- ממיר מעלה-מוריד מתח עמ' 114-117

7.3.0- ממיר Flybuck עמ' 118

פרק 8 – מעגלים שונים

8.1.0- מהפכים מבודדים עמ' 119

8.2.0- הפרדה חשמלית עמ' 120-121

8.3.0- מערכת אל פסק עמ' 122-123

תודתי נתונה למר יאשי יוסי בעזרתו באיסוף החומר.

פרק 1-מבוא

בראשית דברים

כאשר נחבר מנורה לרשת החשמל הארצית היא תידלק בעוצמה מלאה. זו אומנם בקרת הספק אך לא בצורה יעילה. ז"א בכל מצב של עוצמת המנורה זורם זרם דרך הפוטנציומטר והספק המתפתח על הפוטנציומטר מהווה בזבוז הספק, וכאשר מדובר על זרמים גבוהים התוצאה בזבוז הספק גדול.

אלקטרוניקה של מערכות הספק זהו תחום אשר דואג לבצע בקרת הספק רציפה במעגלי הספק עם מינימום בזבזי הספק.

בכל מעגל בתחום באלקטרוניקה של מערכות הספק קיימים תמיד 2 ערוצים:

א. ערוץ ההספק- זהו הערוץ המכיל את מקור האנרגיה, רכיבי ההספק השונים והעומס כמובן.

ב. ערוץ הבקרה- זהו אותו ערוץ המכיל את אותם הרכבים הדואגים לשלוט על רכיבי ההספק.

רכיבי ההספק יכולים להיות מסוגים שונים: ממסר, טרנזיסטורי הספק למינם, תריסטורים. מבחינה מעשית על אותם רכיבי הספק המבצעים את בקרת ההספק יש בזבזי הספק קטנים מאוד ומבחינה אידיאלית בזבזי הספק אלו זניחים.

פרק 2- ממירים AC to DC

2.1.0- מישרים חד מופעיים

2.1.1- מבוא

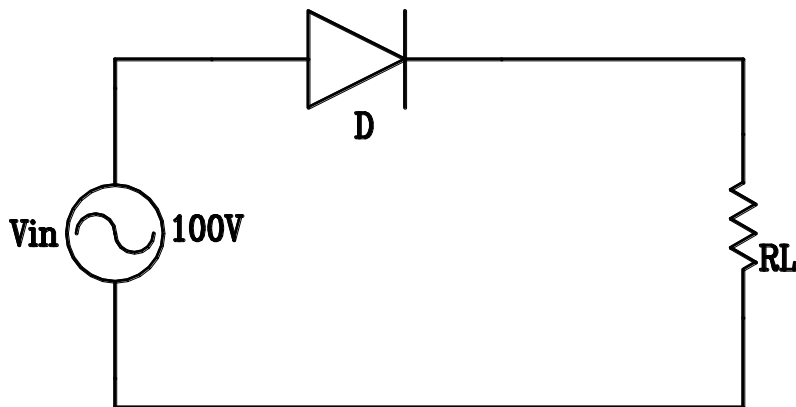
כאשר קיים צרכן הפועל במתח ישר חיבורו לרשת מחייב שימוש בממיר שתפקידו להמיר את מתח הרשת מ-AC ל-DC. פעולה זו נקראת "ישור". ברשת חד מופעית קיימים 2 סוגים עיקריים של מישרים:

א. מישר חד דרכי.

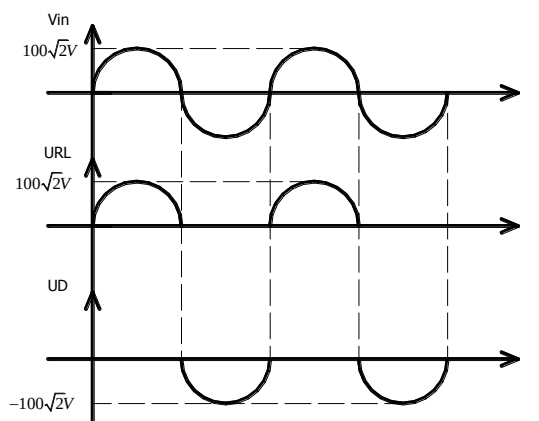
ב. מישר דו דרכי.

2.2.1- מישר חד דרכי חד פאזי

מישר זה נחשב למישר הפשוט ביותר שקיים ולכן הוא בעל חסרונות רבים. מישר זה מכיל סה"כ דיודת ישור והוא נראה באיור הבא:



צורת הגלים כמתואר באיור הבא:



חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע גל חצי פועם ולכן ניתן לחשב עליו גם ערכים ממוצעים (av) וגם ערכים יעילים (rms).

$$U(av) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{U(max)}{\pi}$$

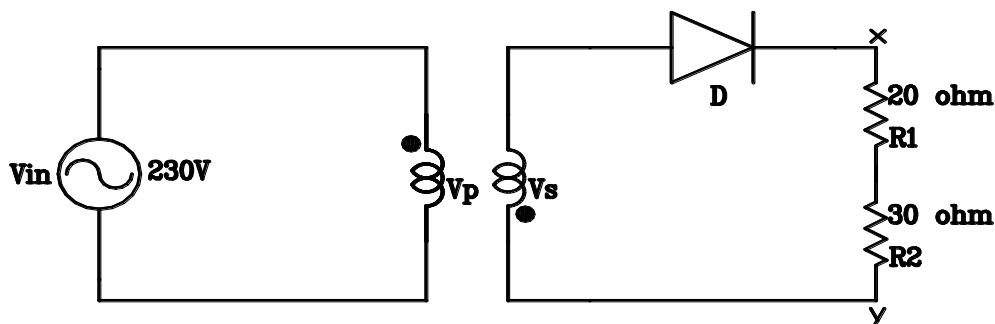
$$U(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = \frac{U(max)}{2}$$

זרמים נחשב לפי חוק אום בהתאמה.

הספקים בנגדים טהורים נחשב לפי חוק אום באמצעות ערכים יעילים בלבד.

תרגיל דוגמא

נתון המעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון כי השנאי הוא בעל יחס תמסורת של 2.

א. שרטט באופן איכותי את האותות הבאים:
 $V_{in}, V_p, V_s, U_{xy}, U_{R1}, U_{R2}, U_D$

ב. חשב את ההספק המתפתח בנגד R_2 .

ג. חשב את הזרם הממוצע דרך נגד R_1 .

פתרון תרגיל דוגמא

הערות:

1. קיימים שנאים אשר יכולים לעלות, להוריד או לשמור מתח. וזה נקבע לפי יחס הליפופים של השנאי.

2. לכל שנאי קיים מקדם השנאה (K). $K = \frac{N1}{N2} = \frac{U1}{U2} = \frac{I2}{I1}$

כאשר $K=1$ $U1=U2$ - השנאי שומר מתח.

כאשר $K>1$ $U1>U2$ - השנאי מוריד מתח.

כאשר $K<1$ $U1<U2$ - השנאי מעלה מתח.

3. בשנאים גם ניתן לקבוע האם השנאי שומר מופע או הופך מופע. על פעולה זו אחראי האופן בו ליפופו את הסלילים.

בשרטוטים חשמליים סימון הנקודה על יד הסליל קובע:

• אם 2 הנקודות באותו מיקום-השנאי שומר מופע

• אם 2 הנקודות במיקום שונה-השנאי הופך מופע.

בתרגיל זה השנאי הופך מופע כאשר מתח המוצא של השנאי קטן פי 2 ממתח המבוא של השנאי.

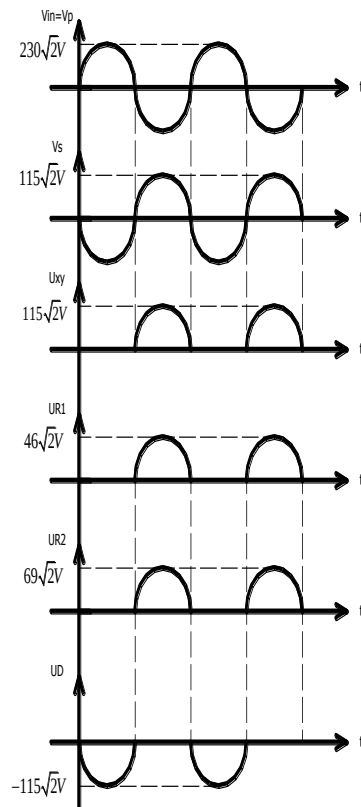
חישובי מתח מקסימאליים:

$$V_s(\max) = \frac{V_p(\max)}{K} = \frac{230\sqrt{2}}{2} = 115\sqrt{2}V$$

$$U_{xy}(\max) = V_s(\max) = 115\sqrt{2}V$$

$$U_{R1}(\max) = \frac{U_{xy}(\max) \cdot R1}{R1 + R2} = \frac{115\sqrt{2} \cdot 20}{20 + 30} = 46\sqrt{2}V$$

$$U_{R2}(\max) = \frac{U_{xy}(\max) \cdot R2}{R1 + R2} = \frac{115\sqrt{2} \cdot 30}{20 + 30} = 69\sqrt{2}V$$



ב. חישוב הספק המתפתח על נגד R2

$$PR2 = \frac{UR2(rms)^2}{R2}$$

$$UR2(rms) = \frac{UR2(max)}{2} = \frac{69\sqrt{2}}{2} = 48.79V$$

$$PR2 = \frac{48.79^2}{30} = 79.35W$$

ג. חישוב זרם ממוצע דרך נגד R1

$$IR1(av) = \frac{UR1(av)}{R1}$$

$$UR1(av) = \frac{UR1(max)}{\pi} = \frac{46\sqrt{2}}{\pi} = 20.7V$$

$$IR1(av) = \frac{20.7}{20} = 1.035A$$

2.3.0- מישר דו דרכי חד פאזי

כאשר נדרשת פעולת ישור כמעט ולא משתמשים במישר חד דרכי כיוון שחצי מהאנרגיה לא מנוצלת.

לשם כך קיים המישר הדו דרכי שבאמצעותו ניתן לבצע פעולת ישור על כל האנרגיה.

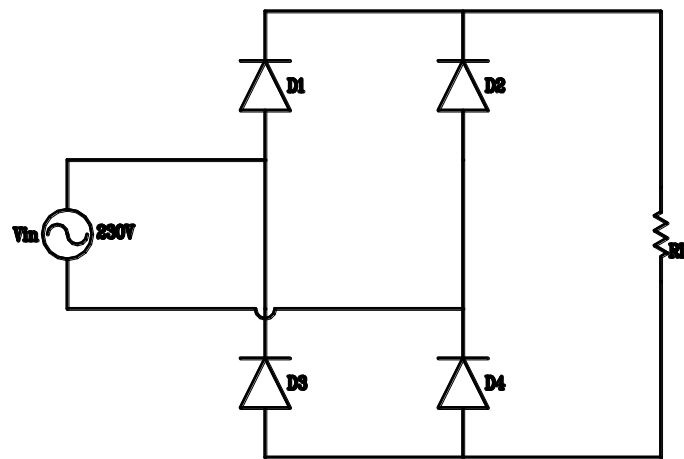
קיימים 2 סוגים של מישרים דו דרכי:

א. מישר דו דרכי באמצעות המודל של גשר דיודות.

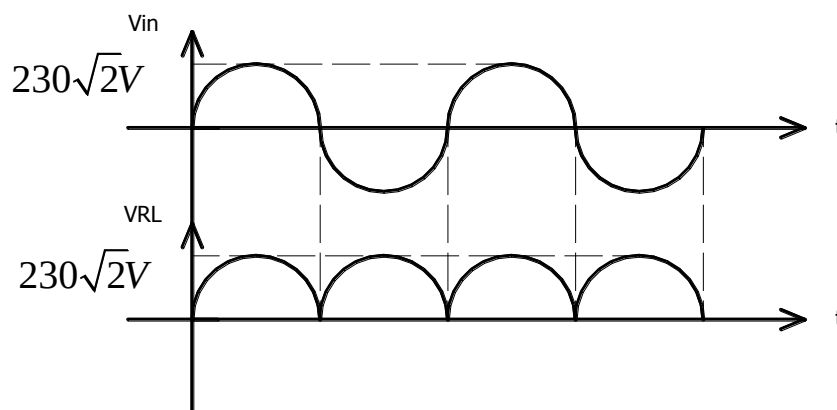
ב. מישר דו דרכי באמצעות שנאי בעל סנף אמצעי.

2.3.1- מישר דו דרכי באמצעות המודל של גשר דיודות

מישר זה בנוי מ-4 דיודות כמתואר באיור הבא:



צורת הגלים כמתואר באיור הבא:



חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מתקבל גל שלם מיושר הנקרא גל פועם.
ניתן לחשב עבור גל זה גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל:

$$U(av) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{2 * U(max)}{\pi}$$

$$U(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = \frac{U(max)}{\sqrt{2}}$$

זרמים נחשב לפי חוק אום בהתאמה.

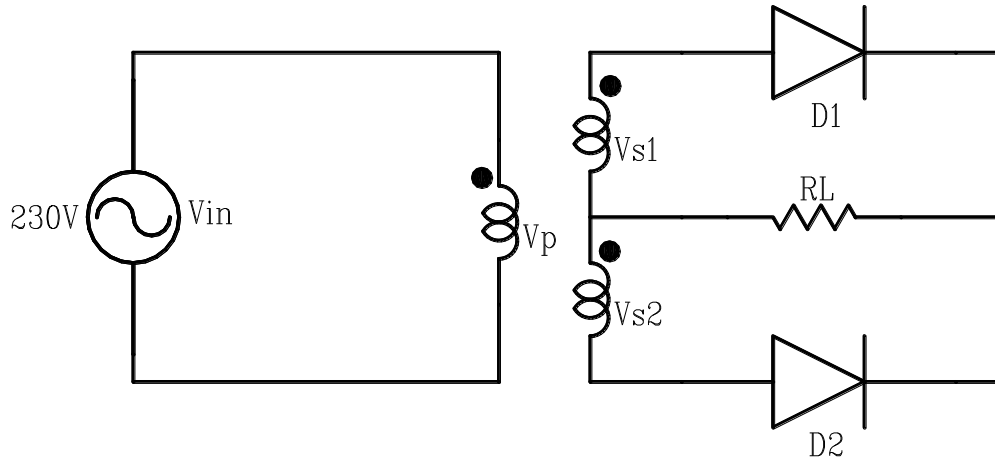
הספקים בנגדים טהורים נחשב לפי חוק אום באמצעות ערכים יעילים בלבד.

לסיכום שימוש בנוסחאות בתאם לצורת הגל:

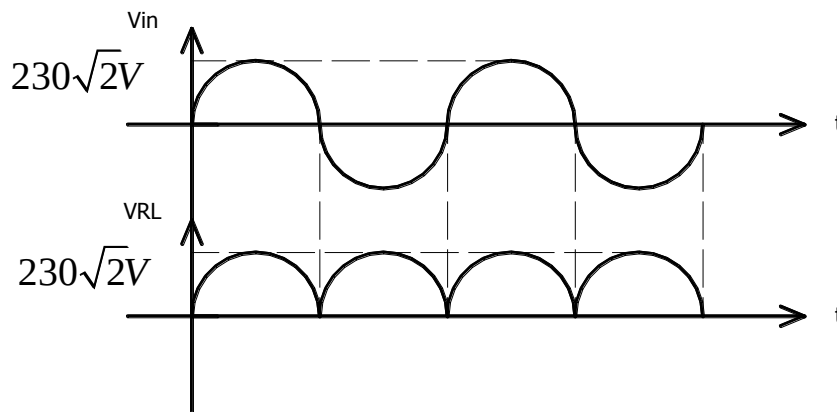
גל פועם	גל חצי פועם	גל סינוס	
$\frac{2 * U(max)}{\pi}$	$\frac{U(max)}{\pi}$	0	ערך ממוצע
$\frac{U(max)}{\sqrt{2}}$	$\frac{U(max)}{2}$	$\frac{U(max)}{\sqrt{2}}$	ערך יעיל

2.3.2- מישר דו דרכי באמצעות שנאי בעל סנף אמצעי

ניתן לבצע פעולת ישור דו דרכי לאות סינוס גם באמצעות שנאי בעל סנף אמצעי מעגל זה מכיל 2 דיודות והיתרון שלו שניתן בעזרת השנאי לשמור להוריד או לעלות את המתח בכניסה למישר ביחס למקור.
מישר זה כמתואר באיור הבא כאשר לדוגמא $K=1/2$:



צורת הגלים כמתואר באיור הבא :



הערות:

1. יחס ההשנאה בשנאי בעל סנף אמצעי יכול להופיע ב- 2 צורות:

א. לדוגמא- $\frac{V_P}{V_S} = 2$ המשמעות היא שמתח שמופיע על כל הסליל V_S

קטן פי 2 מהמתח המופיע על V_P . ולכן $V_{S1} = V_{S2} = \frac{1}{2} V_S$

ב. לדוגמא- $\frac{V_P}{V_{S1}} = \frac{V_P}{V_{S2}} = 3$ המשמעות היא שהמתח על כל סליל בנפרד

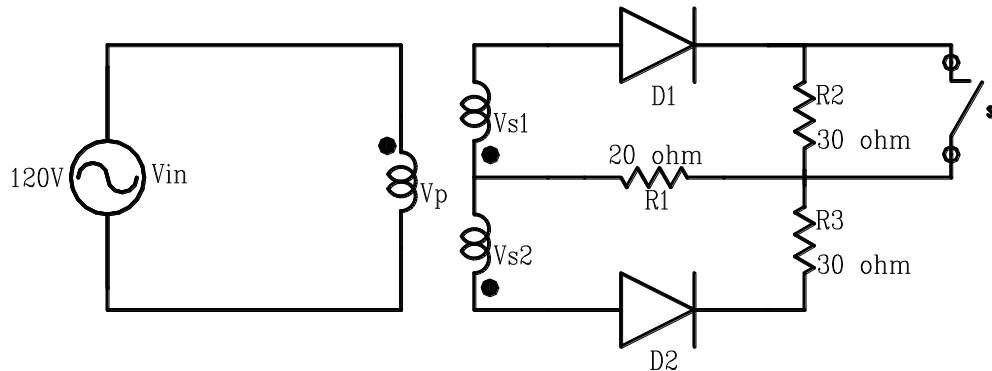
של V_S קטן פי 3 מאשר המתח המופיע על V_P .

2. על פני נגד העומס מתקבל גל שלם מיושר-גל פועם ולכן הנוסחאות הן אותן נוסחאות בדיוק כמו מיושר גשר דיודות.

3. במידה וכיוון ליפוף הסלילים של V_S היה מנוגד המתח על נגד העומס היה מתאפס.

תרגיל דוגמא

נתון מישר הבנוי משנאי בעל סנף אמצעי כמתואר באיור הבא:



נתון כי יחס התמסורת של השנאי: $K = \frac{1}{3}$

- שרטט באופן איכותי את צורת האותות הבאים:
 $V_p, V_{s1}, V_{s2}, V_{R1}, V_{R2}, V_{R3}, I_{D1}$
- חשב זרם ממוצע בנגד $R1$.
- חשב הספק המתפתח בנגדים $R1, R2, R3$.
- סוגרים את המתג S מה יקרה להספק בנגד $R1$.

פתרון לתרגיל דוגמא

$$K = \frac{1}{3} \text{ ולכן } 3V_p = V_s = 3 * 120 = 360V$$

$$\text{ומכאן } V_{s1} = V_{s2} = \frac{V_s}{2} = \frac{360}{2} = 180V$$

לפי מיקום הנקודות בשנאי הסליל V_{s1} וסליל V_{s2} הופכים מופע.

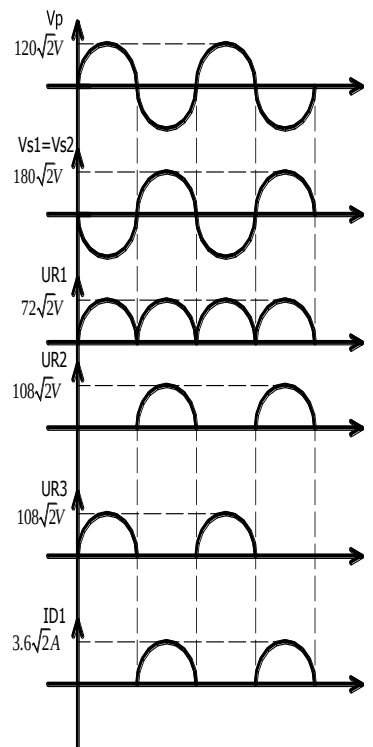
א. חישובי מתח זרם מקסימאליים:

$$UR1(max) = \frac{Vs1(max) * R1}{R1 + R2} = \frac{180\sqrt{2} * 20}{20 + 30} = 72\sqrt{2}V$$

$$UR2(max) = \frac{Vs1(max) * R2}{R1 + R2} = \frac{180\sqrt{2} * 30}{20 + 30} = 108\sqrt{2}V$$

$$UR3(max) = \frac{Vs2(max) * R3}{R1 + R3} = \frac{180\sqrt{2} * 30}{20 + 30} = 108\sqrt{2}V$$

$$ID1(max) = IR2(max) = \frac{UR2(max)}{R2} = \frac{108\sqrt{2}}{30} = 3.6\sqrt{2}A$$



ב. חישוב זרם ממוצע בנגד R1.

$$IR1(av) = \frac{UR1(av)}{R1}$$

$$UR1(av) = \frac{2 * UR1(max)}{\pi} = \frac{2 * 72\sqrt{2}}{\pi} = 64.82V$$

$$IR1(av) = \frac{64.82}{20} = 3.24A$$

ג. חישוב הספק המתפתח בנגדים R2, R1 ו-R3.

$$PR3 = PR2 = \frac{UR2(rms)^2}{R2}$$

$$UR3(rms) = UR2(rms) = \frac{UR2(max)}{2} = \frac{108\sqrt{2}}{2} = 76.36V$$

$$PR3 = PR2 = \frac{76.36^2}{30} = 194.39W$$

$$PR1 = \frac{UR1(rms)^2}{R1}$$

$$UR1(rms) = \frac{UR1(max)}{\sqrt{2}} = \frac{72\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 72V$$

$$PR1 = \frac{72^2}{20} = 259.2W$$

ד. ממוצע המתח $UR1(rms)$ בשני חצאי הגל יגדל ולכן ההספק על R1 יגדל בהתאמה.

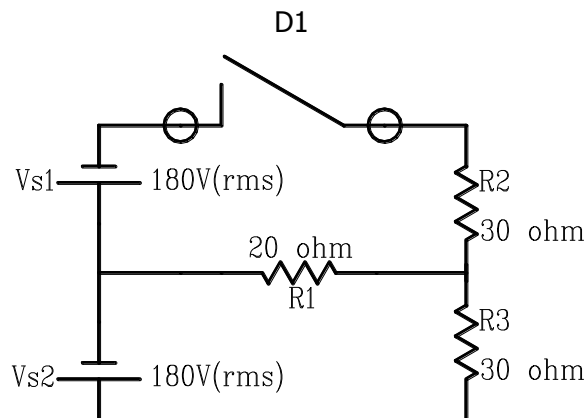
2.4.0- PIV (Peak Inverse Voltage) מתח פריצה אחורי

לכל דיודה יש את ה-PIV שלה זהו נתון יצרן. ככל שה-PIV יהיה גדול יותר כך הדיודה איכותית ויקרה יותר.

PIV זהו נתון שקיים רק בממתח אחורי של הדיודה, כאשר המתח על פני הדיודה עולה מעל ה-PIV שלה היא נשרפת והופכת לקצר.

על מנת לקבוע PIV על דיודה מסוימת יש לחשב את המתח על פניה כערך מקסימאלי כאשר היא במצב אי הולכה (בקטעון).

נשתמש בנתוני התרגיל הקודם ונבחן את ה-PIV של דיודה D1:



$$PIV_{d1(max)} > |U_{R1(max)} + U_{d1(max)}|$$

$$U_{R1(max)} = \frac{V_{s2(max)} * R_1}{R_1 + R_3} = \frac{180\sqrt{2} * 20}{20 + 30} = 72\sqrt{2}V$$

$$PIV_{d1(max)} > |72\sqrt{2} + 180\sqrt{2}|V$$

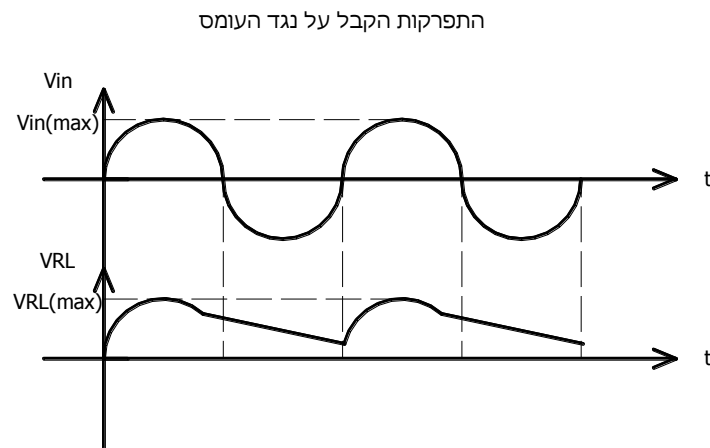
$$PIV_{d1(max)} > |252\sqrt{2}|V$$

2.5.0 מישרים מעשיים

2.5.1 חיבור מסנן קיבולי במוצא מישר

במוצא המישר מתקבל גל חצי פועם או גל פועם בהתאם לסוג המישר. על מנת לשפר את הגליות (אדווה) על נגד העומס ניתן להשתמש במסננים. המסנן הפשוט ביותר שמבצע פעולה זו הוא הקבל. את הקבל יש לחבר במקביל לנגד העומס.

נבחן את פעולת הסינון עבור מישר חד דרכי כמתואר באיור הבא:



הערה:

מסנן זה הינו מסנן פשוט וברגע שנחבר אותו במקביל לעומס במישרן דו דרכי נקבל ישור טוב יותר (גליות נמוכה יותר).

החיסרון של מסנן זה שהוא תלוי בגודל העומס, ז"א הוא מתאים בעיקר לעומסים בעלי התנגדויות גבוהות (שאז קצב התפרקות הקבל ארוך יותר).

2.5.2 חיבור מסנן השראתי למישר

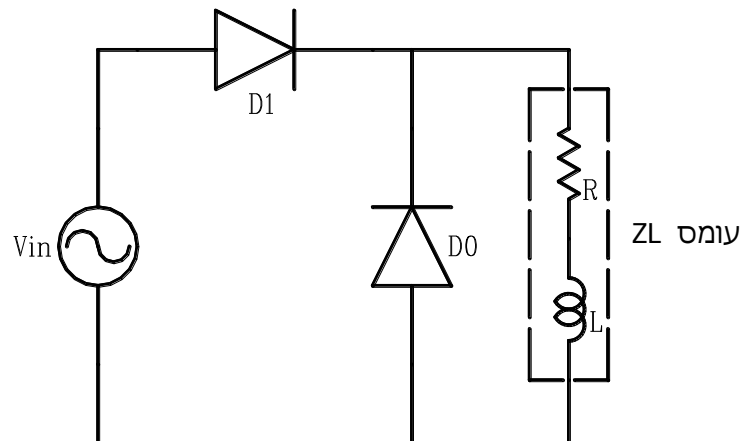
עבור מסנן הקיבולי שמחובר במישרן דו דרכי מתקבלת צורת גל לזרם המקור שהוא מכיל הרמוניות רבות (גל הזרם יהיה מעוות). הרמוניות אלו יוצרות הפרעות אלקטרומגנטיות וכאשר מדובר על זרמים גבוהים מדובר על הפרעות גדולות.

לצורך זה קיים המסנן השראתי הבנוי מסליל שמחובר בטור לרשת. תפקידו לצמצם את אותן הרמוניות ובכך להקטין את ההפרעות.

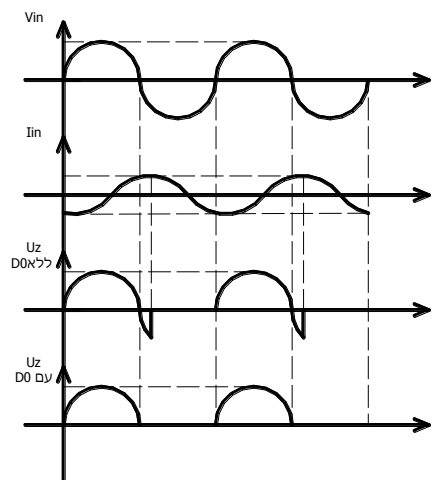
השילוב בין המסנן הקיבולי למסנן השראתי יוצר את המישר המעשי.

(עבודת בית מס' 1 בגמר לימוד פרק זה)

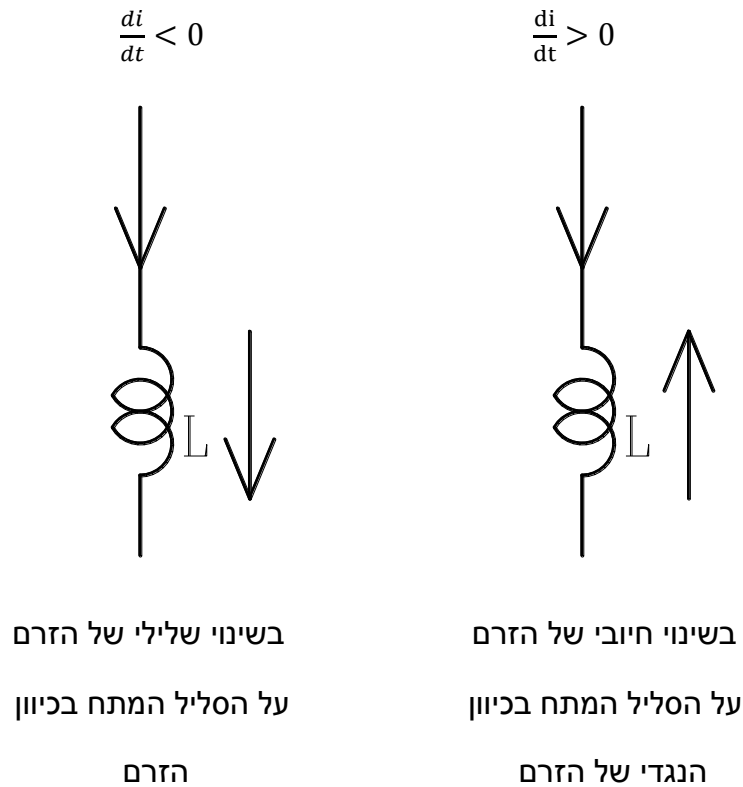
2.5.3 חיבור עומס השראתי במוצא מישר חד דרכי



כאשר מחברים עומס השראתי במוצא מישר חד דרכי המתח הממוצע על פני העומס קטן. הסיבה לכך היא שכאשר מתח הרשת מתחיל את המחזור השלילי שלו ישנו פרק זמן מסוים שהדיודה D1 בהולכה וזאת בכל אופי הסליל. כתוצאה מכך נוצרים "ספיקים" קטנים בעומס במחזור השלילי של המקור. על מנת להתגבר על בעיה זו יש לחבר במקביל לעומס דיודת איפוס D0 דיודה זו תפקידה לאפס את המתח על פני העומס כאשר מתח הרשת מתחיל את המחזור השלילי שלו. ובכך לקבל מתח DC גדול יותר שהוא כתוצאה מגל חצי פועם.



הספיקים השלילים נגרמים מכיוון שהמתח על העומס ההשראתי יכול לשנות את כיוונו וזאת מכיוון שלפי פארדי- $UL = L \frac{di}{dt}$. ז"א שהמתח על הסליל תלוי בשינוי הזמן.



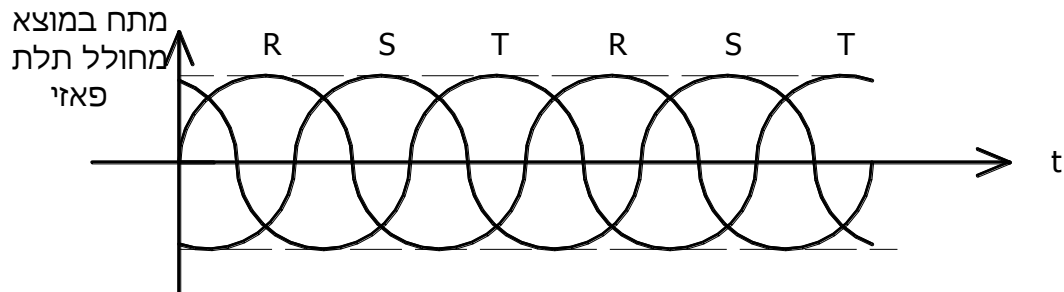
אם שינוי הזרם יהיה חיובי המתח על פני בסליל יהיה לכיוון D1 ובמצב זה הקתודה למרות שינוי בקוטביות המקור היא שלילית ביחס לאנודה והדיודה D1 עדין לפרק זמן מסוים נשארת במצב הולכה וזאת עד אשר הזרם משנה את כיוונו לשלילי המתח על פני הסליל משנה את כיוונו ואז הקתודה חיובית ביחס לאנודה והדיודה D1 נכנסת לקטעון.

הדיודה D0 דואגת שבשינוי קוטביות המקור הקתודה של D1 תהיה בכל זמן המחזור השלילי של המקור חיובית ביחס לאנודה ושדיודה D1 תהיה במצב קטעון בכל זמן המחזור השלילי של המקור.

הערה- כאשר מחברים עומסים השראתיים במעגלים חשמליים ברגע ניתוקם מהרשת מופיע עליהם קפיצת מתח שמתבטאת באנרגיה אלקטרומגנטית. ההסבר הפיזיקאלי לכך-שבעת ניתוק הסליל הזרם דרכו יורד ב-0 זמן (באופן תאורתי) ולכן השינוי יהיה- $\frac{di}{dt} = -\infty$. מתח זה מסוכן עבור רכיבים מסוימים ולכן במצבים כאלה מחברים במקביל לרכיבים השונים דיודת איפוס שתפקידה לאפס את האנרגיה האלקטרומגנטית ובכך להגן על הרכיבים.

2.6.0 מישרים תלת מופעיים

2.6.1- מבוא



מחולל תלת מופעי(פאזי) זהו מחולל הבנוי מ-3 מחוללים חד פאזי הנמצאים בהפרש מופע של 120° זה מזה.

הפונקציות המתמטיות המבטאות המתח הרגעי עבור כל מופע:

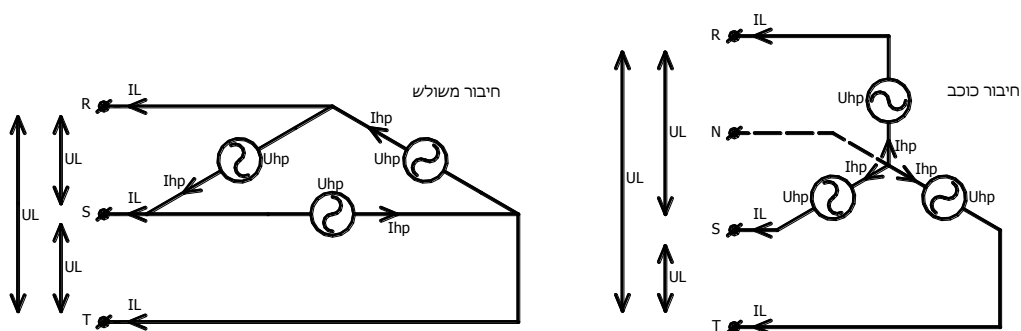
$$R \text{ פאזה } V(t) = V(\max)\sin(\omega t)$$

$$S \text{ פאזה } V(t) = V(\max)\sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$T \text{ פאזה } V(t) = V(\max)\sin(\omega t + 120^\circ)$$

צורות חיבור ברשת תלת פאזית

המחולל התלת פאזי יכול להיות מחובר או בצורת כוכב או בצורת משולש.



מושגי יסוד:

- א. מתח שלוב (קווי)-מסומן UL – זהו המתח שמופיע בין 2 פאזות.
- ב. זרם שלוב (קווי)-מסומן IL – זה הזרם שזורם בקווים הראשיים.
- ג. מתח מופע(פאזי)-מסומן U_{ph} – זהו המתח המופיע על פני מחולל בודד.
- ד. זרם מופע(פאזי)-מסומן I_{ph} – זהו הזרם זורם דרך מחולל בודד.

הערות:

1. לרשת תלת פאזי ניתן לחבר גם צרכנים חד פאזי בתנאי שקיים מוליך N .
2. צרכנים שהם תלת פאזי חייבים להיות מחוברים או בצורת כוכב או בצורת משולש.
3. צרכן שהוא תלת פאזי סימטרי זהו צרכן המוגדר כצרכן מאוזן כזה שעוצמת הזרם שתופיע במוליך ה- N תהיה שווה ל-0 (כסכום ווקטורי). לכן צרכנים אלו אינם צריכים את מוליך ה- N .
4. ניתן לסכם את 2 צורות החיבור בטבלה הבאה:

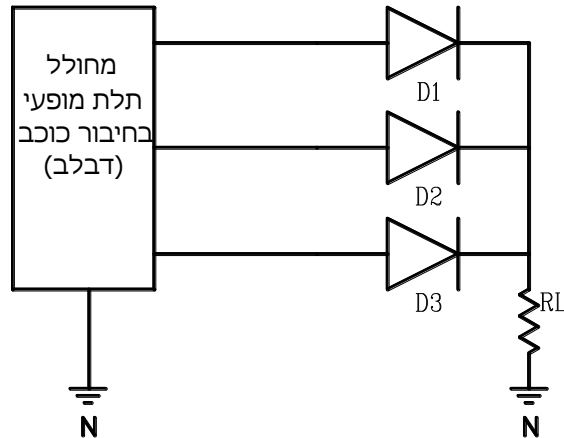
חיבור משולש	חיבור כוכב
$UL = U_{ph}$	$UL = \sqrt{3} * U_{ph}$
$IL = \sqrt{3} * I_{ph}$	$IL = I_{ph}$

גם ברשת תלת מופעי קיימים 2 סוגי מישרים:

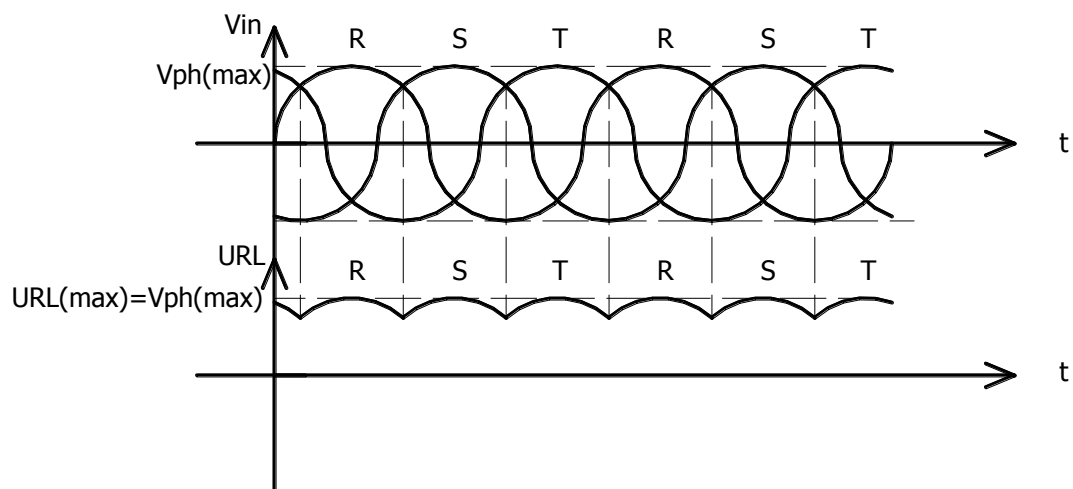
- א. מישר חד דרכי
- ב. מישר דו דרכי

2.6.2- מישר חד דרכי תלת מופעי

מישר זה בנוי מ- 3 דיודות ישור והוא נראה באיור הבא:



צורת הגלים נראה באיור הבא:



עבור מישר זה מקבלים שבכל $\frac{1}{3}$ מחזור דיודה אחת תהיה פעילה ואילו השתיים האחרות תהינה בנתק.

חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מתקבל אות DC שניתן לחשב עליו גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל.

$$URL(av) = \frac{3\sqrt{3} * URL(max)}{2\pi}$$

$$URL(rms) = URL(max) * \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{4\pi} * \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}$$

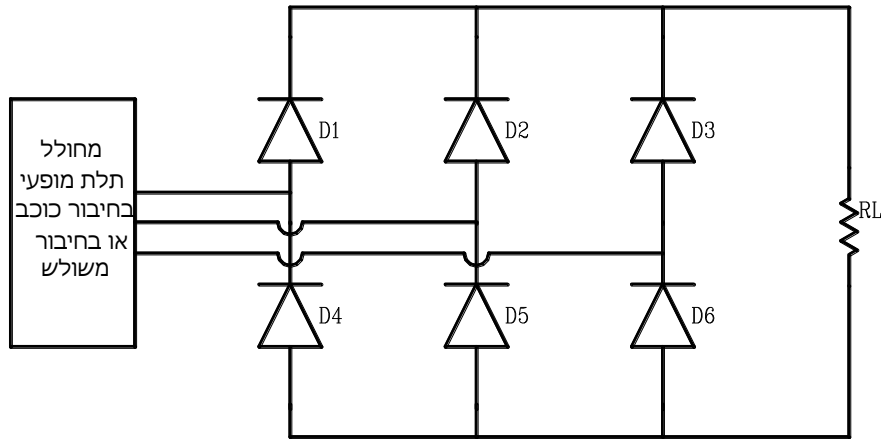
בעבודה במחשבון במצב degree (מעלות) בתוך פונקצית ה-sin בלבד במקום π יש להציב 180° .

הערות:

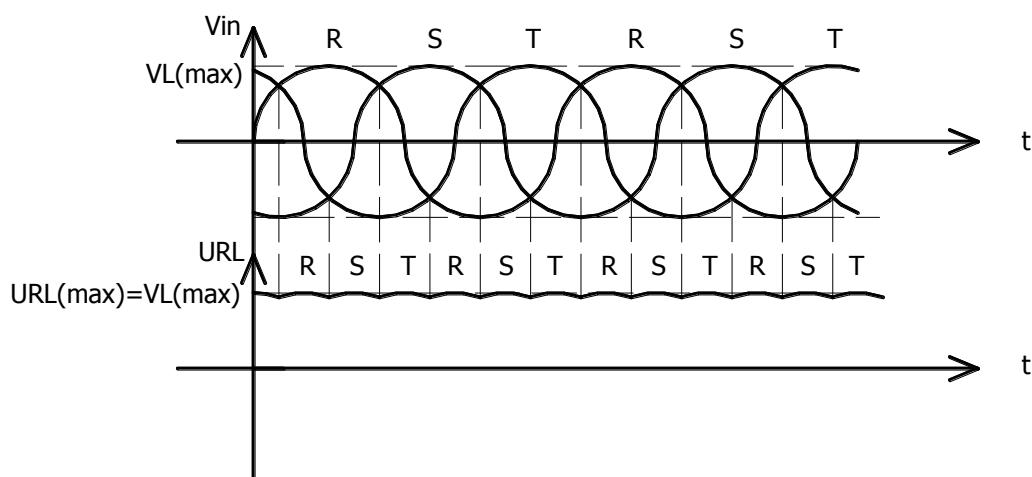
1. את הזרמים ניתן לחשב על פי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים יחושבו באמצעות ערכים יעילים בלבד.

2.6.3- מישר דו דרכי תלת מופעי

מישר זה מבצע פעולת ישור טובה יותר והוא מכיל 6 דיודות כמתואר באיור הבא:



צורות הגלים מתוארת באיור הבא:



עבור מישר זה תמיד 2 דיודות פועלות – אחת מהקומה העליונה והאחרת מהקומה התחתונה. כל $\frac{1}{6}$ מחזור מתבצעת תחלופה בין הדיודות אבל כל דיודה פועלת ברצף $\frac{2}{6}$ המחזור.

חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע אות DC טוב יותר שניתן לחשב עבורו גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל בהתאם לנוסחאות הבאות:

$$URL(av) = \frac{6 * URL(max)}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$URL(rms) = URL(max) * \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}$$

בעבודה במחשבון במצב degree (מעלות) בתוך פונקצית ה-sin בלבד במקום π יש להציב 180° .

הערות:

1. את הזרמים ניתן לחשב על פי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים יחושבו באמצעות ערכים יעילים בלבד.

תרגיל דוגמא

נתון מישר תלת פאזי המוזן ממחול תלת פאזי המחובר בחיבור כוכב בעל מתח של 400V המתואר באיור:



חשב:

- זרם ממוצע בנגד העומס.
- הספק המתפתח בנגד העומס.

פתרון לתרגיל דוגמא

א.

$$URL(max) = UL(rms) * \sqrt{2} = 400\sqrt{2}V$$

$$URL(av) = \frac{6 * URL(max)}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{6 * 400\sqrt{2}}{\pi} * \sin\left(\frac{180}{6}\right) = 540.19V$$

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL} = \frac{540.19}{50} = 10.804A$$

ב.

$$URL(rms) = URL(max) \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 400\sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} * \sin\left(\frac{180}{3}\right)} = 540.665V$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{540.665^2}{50} = 5846.37W$$

(עבודת בית מס' 2 בגמר לימוד פרק זה)

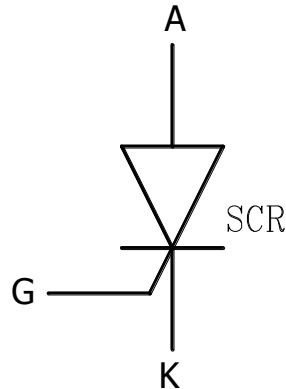
פרק 3- תריסטורים בבקרת הספק

3.1.0-מבוא

במערכות המבצעות בקרת הספק הדרישה היא שהבקרה תהיה רציפה וללא איבודי הספק. ישנם רכיבי הספק שונים היכולים לבצע פעולה של בקרת הספק במינימום איבודי הספק והם נקראים תריסטורים. התריסטור זה שם כולל לרכיבי הספק מוליכים למחצה הבנויים בעיקר מאותן שכבות PN.

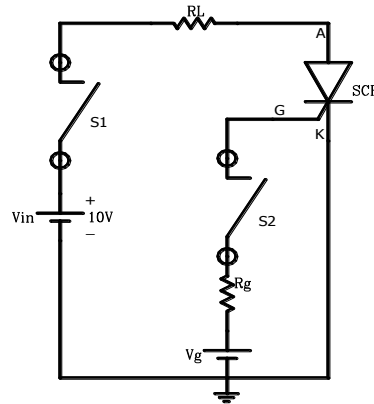
3.1.1-מישר סיליקון מבוקר- SCR-(Silicon Controlled Rectifier)

המס"מ או SCR זהו רכיב העיקרי במשפחת התריסטורים. רכיב זה מבצע את אותה פעולה של הדיודה אך בצורה מבוקרת. לרכיב יש 3 רגלים: אנודה-A, קתודה-K, שער-G. סימון הרכיב באיור הבא:

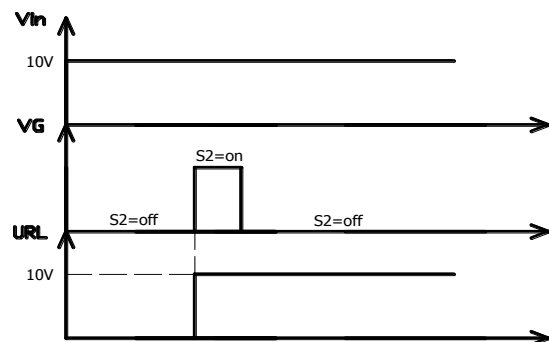


3.1.2- עקרון פעולת SCR

על מנת להבין את פעולת ה-SCR נחבר את המעגל המתואר באיור הבא:



במעגל הנתון עם סגירת מפסק S1 ה-SCR מחובר אומנם בממתח קדמי אך הוא לא יוליך עד הרגע שיקבל אות ממערכת הבקרה. במצב זה $U_{RL}=0V$. ברגע שנסגור את מתג S2 ואפילו לזמן קצר יכנס פולס של זרם לרגל השער של ה-SCR ובכך יצית אותו. במצב זה $U_{RL}=V_{in}$. ומכאן ניתן להבין שעל מנת להצית את ה-SCR אחת השיטות היא לספק דופק זרם לרגל השער שלו. אסור שדופק זה יהיה ממושך כיוון שזה מסוכן לרכיב. חשוב שדופק זה לא יהיה בעוצמה כזו שתזיק לרכיב ולכן קיים במעגל נגד R_g שתפקידו להגביל את עוצמת הזרם הנכנס לרגל השער של הרכיב. כיבוי ה-SCR במעגל זה היא ע"י פתיחת מפסק S1. ניתן לתאר את פעולת המעגל באמצעות האופינים הבאים:

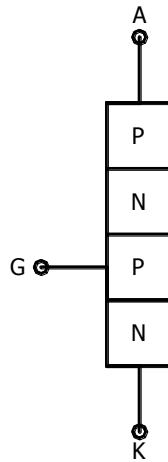


אנו מבחינים במעגל ב-2 ערוצים:

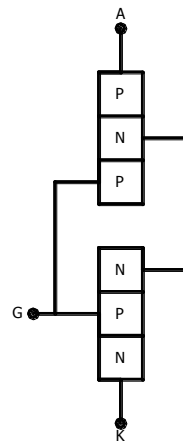
- ערוץ ההספק- זהו אותו ערוץ המכיל את מקור האנרגיה V_{in} המתג S1 את העומס R_L ואת החלק ברכיב הבקרה עצמו SCR הצמת בין A ל-K.
- ערוץ הבקרה- בערוץ זה זורמים זרמים נמוכים יחסית לערוץ הבקרה סדר גודל קטנים פי 1000. ערוץ זה כולל את מקור המתח V_g הנגד R_g מפסק S2 ואותו צמת שקיים בין G ל-K ברכיב ה-SCR.

3.1.3-מבנה הרכיב

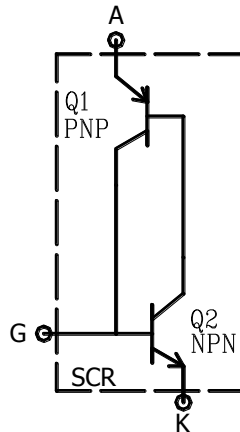
ה- SCR בנוי ממבנה רב שכבתי PNPN כמתואר באיור הבא:



את מבנה הרכיב ניתן גם לתאר באופן המתואר באיור הבא:



מבנה זה מזכיר חיבור של 2 טרנזיסטורים בי-פולארים האחד מסוג PNP והשני מסוג NPN אשר מחוברים בניהם כמתואר באיור הבא:



ניתן להסביר כיצד פועל ה- SCR באמצעות מימושו בעזרת 2 הטרנזיסטורים:

- א. עבור $I_G=0$ - במצב זה 2 הטרנזיסטורים בקטעון ולכן ניתן לראות את ה- SCR כמפסק פתוח שמחובר בין האנודה לקתודה.
- ב. עבור $I_G \neq 0$ - (לפרק זמן קצר) במצב זה נכנס זרם לבסיס של הטרנזיסטור Q2 זרם זה מוגבר פי β ומופיע בקולקטור של Q2 ניתן לראות שזרם זה מהווה את הזרם הבסיס של טרנזיסטור Q1 שהרי גם הוא מוגבר פי β ויוצר את הזרם בקולקטור של Q1. זרם זה נכנס שוב לבסיס של Q2 וכך באופן מחזורי מוגבר עד אשר 2 הטרנזיסטורים נכנסים למצב רוויה. במצב זה ניתן לומר שה- SCR "מוצת" כלומר הוא משמש כמתג סגור בין האנודה לקתודה.

הערות:

1. על פי שרטוט זה ניתן להבין מדוע מספיק פולס קצר של זרם ברגל ה-G על מנת להצית את ה- SCR.
2. מבחינה תאורתית כאשר ה- SCR מוצת המתח על פניו שווה ל-0V אך באופן מעשי המתח על פני ה- SCR שווה בערך ל-1V והסיבה לכך היא:

$$V_{ak} = V_{be}(Q1) + V_{ce}(Q2) = 0.7 + 0.3 = 1V$$
3. מבחינה תאורתית ניתן לממש SCR באמצעות 2 טרנזיסטורים כפי שמתואר בשרטוט. אך מבחינה מעשית דבר זה אינו בר ביצוע כיוון שקיימים זרמי זליגה בתוך הטרנזיסטורים דבר הגורם להמצאות תמידית של הטרנזיסטורים במצב רוויה כך שגם ללא מתן פולס ברגל ה-G ה- SCR יהיה מוצת.

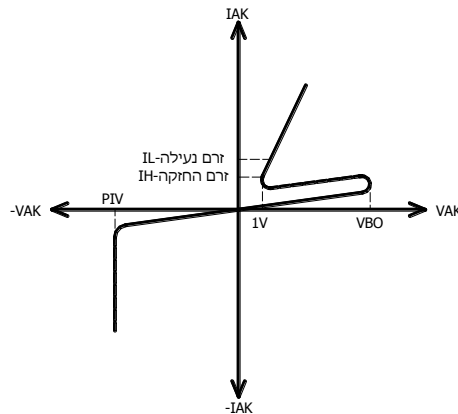
3.1.4-שיטות להצתת SCR

1. השיטה הנפוצה ביותר היא לתת פולס של זרם המגיע מערוץ הבקרה לתוך רגל השער של ה-SCR.
2. ניתן להצית SCR גם ללא רגל השער וזה בתנאי שהמתח על פניו בממתח קידמי יהיה גדול מאותו מתח VBO הנתון ע"י היצרן.
3. SCR הנמצא בטמפ' גבוהות עלול להיות מוצת מעצמו. טמפ' גבוהות יוצרות זרמי זליגה ברכיב אשר גורמות להצתתו.
4. ישנו רכיב הנקרא בשם LASCR רכיב זה בעל חלון שקוף המקושר לרגל השער של הרכיב כך שכאשר מאירים לתוך חלון זה ה-SCR מוצת.

3.1.5-שיטות לכיבוי SCR

1. לדאוג לכך שהזרם דרך הרכיב ירד ל-0A.
2. לדאוג לכך שהמתח על פני הרכיב ירד ל-0V.
3. כאשר דואגים לשנות את כיוון הזרם דרך הרכיב.

3.1.6-אופיין התנגדות מעשי ל-SCR



IL- זרם נעילה- Latch- בערוץ הבקרה

IH-זרם החזקה- Hold- בערוץ ההספק

הסבר לאופיין

א. עבור ממתח קידמי- עבור חיבור זה כאשר מעלים את המתח על פני הרכיב הוא עדין בנתק אך מבחינה מעשית מצליחים כן לזרום דרכו זרמי זליגה קטנים. ברגע שהמתח על פני הרכיב יגיע לערך VBO (Voltage Break Over) הרכיב מוצת ולכן המתח על פניו יורד מבחינה מעשית ל-1V.

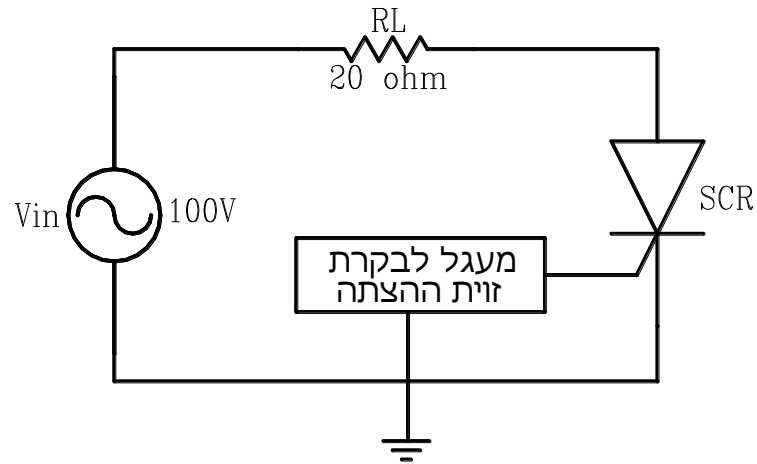
אנו מבחינים בין 2 ערכים של זרם:
1. זרם נעילה IL- זהו נתון שקשור לערוץ הבקרה והוא מציין את אותו זרם מינימאלי הדרוש להצתת ה-SCR.

2. זרם החזקה IH- זהו נתון שקשור לערוץ ההספק והוא מציין את אותו זרם מינימאלי הדרוש לזרום דרך ה-SCR שמתחתיו ה-SCR כבה.

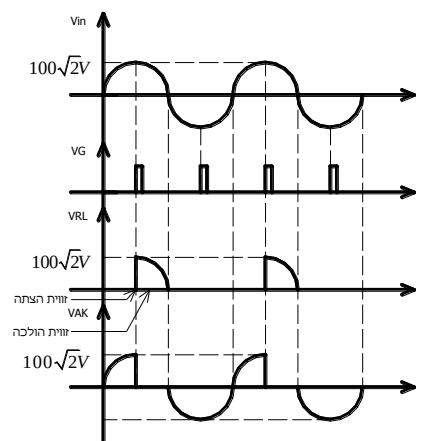
ב. עבור ממתח אחורי- עבור חיבור זה ה-SCR מתנהג כמו דיודה בממתח אחורי ולכן מבחינה מעשית ישנם זרמי זליגה קטנים דרך הרכיב אך כאשר המתח על פני הרכיב בחיבורו האחורי עובר את הערך PIV שלו הרכיב נשרף והופך לקצר.

3.1.7- בקרת חצי גל מיושר בז"ח

המעגל כמתואר באיור הבא:



צורות הגלים כמתואר באיור הבא:



הסבר למעגל

במעגל ישנה יחידה שקשורה לערוץ הבקרה (מעגל לבקרת זווית ההצתה) שתפקידה ליצר פולסים בכל פרק זמן קבוע.

עבור החצי מחזור חיובי- עד שלא מתקבל פולס ה-SCR כבוי ולכן $VRL=0$. ברגע הופעת הפולס ה-SCR מוצת והוא מוליך וכן המתח על פני נגד העומס שווה למתח המקור. המתח על פני ה-SCR מבחינה אידיאלית במצב זה שווה ל-0. הזרם דרך נגד העומס זהו הזרם גם דרך ה-SCR ולכן כאשר הזרם דרך נגד העומס יורד ל-0 גם הזרם בערוץ ההספק של ה-SCR יורד ל-0 וה-SCR כבה.

עבור החצי מחזור השלילי- אין חשיבות לפולסים ממעגל הבקרה כיוון שה-SCR מלכתחילה בחיבור הפוך (ממתח אחורי).

אנו מבחינים בין 2 סוגים של זוויות:

- א. זווית הצתה α - זו אותה זווית שמימנה מוצת ה-SCR. זווית זו יכולה להיות בתחום $0^\circ-180^\circ$.
- ב. זווית ההולכה β - זו אותה זווית שקיימת מרגע הצתת ה-SCR ועד לכיבויה. זווית זו יכולה להיות בתחום $0^\circ-180^\circ$.
תמיד יתקיים הכלל- $\alpha+\beta=180^\circ$.

הערות:

1. במעגל זה לא מנוצל חצי מהגל ולכן מעגל זה לא שימושי.
2. ניתן לראות שמבחינה אידיאלית בכל פרק זמן נתון אין בזבז הספק על פני ה-SCR.
3. שינויי זווית ההצתה α מתבצע במעגל הבקרה. עבור $\alpha=0^\circ$ מתקבל הספק מרבי בנגד העומס ואילו עבור $\alpha=180^\circ$ מתקבל הספק 0.

חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע חצי גל מבוקר שעבורו ניתן לחשב גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל לפי הנוסחאות הבאות:

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{2\pi} * [1 + \cos \alpha] \quad \text{ערך ממוצע}$$

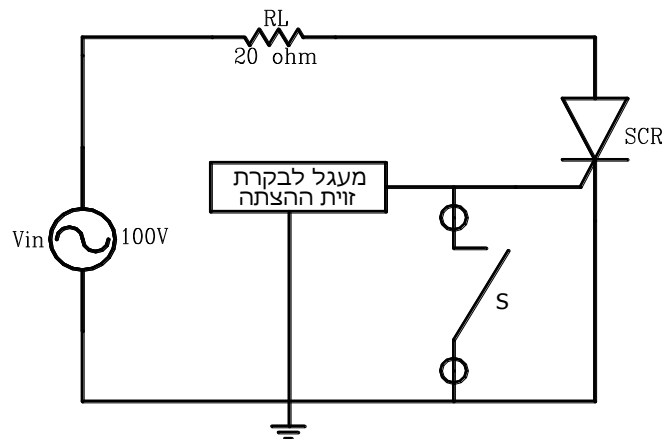
$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{2} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad \text{ערך יעיל}$$

הערות:

1. זרמים נחשב על פי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים נחשב באמצעות ערכים יעילים בלבד.
3. בשימוש במחשבון ניתן לבצע את החישובים בנוסחאות גם כאשר המחשבון נמצא במצב degree (מעלות). במצב זה במקומות בהם קיימת הפונקציה sin או cos α תוצג במעלות ואילו ביתר המקומות α תוצג ברדיאנים (כתלות בפרמטר π). את ההמרה מרדיאן למעלות נבצע על פי המשוואה הבאה: $\alpha (rad) = \frac{\alpha(deg)\pi}{180}$

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק וכן נתון כי $\alpha = 60^\circ$ כמתואר באיור הבא:

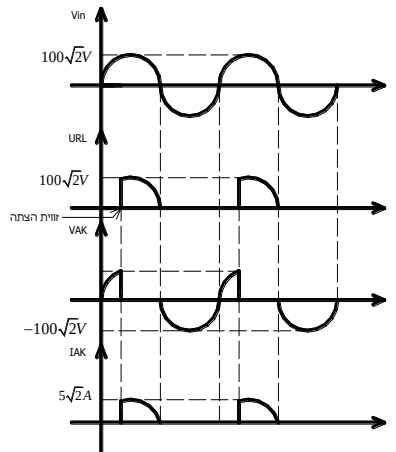


- א. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורות הגלים הבאות: $V_{in}, URL, U_{AK}, I_{AK}$.
- ב. חשב את הזרם הממוצע דרך נגד העומס.
- ג. חשב את ההספק המתפתח בנגד העומס.
- ד. חשב את המתח המופיע על פני נגד העומס ברגע הצתת ה-SCR.
- ה. חזור על הסעיפים: ב, ג, ד, כאשר סוגרים את המתג S.

פתרון לתרגיל דוגמא:

$$IRL(max) = \frac{URL(max)}{RL} = \frac{100\sqrt{2}}{20} = 5\sqrt{2} \quad \text{חישוב ערך מקסימאלי של הזרם בעומס:}$$

א. צורות גלים



ב. חישוב זרם ממוצע בנגד העומס:

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL}$$

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{2\pi} * [1 + \cos \alpha] = \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} * [1 + \cos 60] = 33.76$$

$$IRL(av) = \frac{33.76}{20} = 1.688A$$

ג. חישוב הספק בנגד העומס:

$$URL(rms) = \frac{100\sqrt{2}}{2} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{60\pi}{180} + \frac{\sin 120}{2} \right)} = 63.42V$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{63.42^2}{20} = 201.1W$$

ד. חישוב המתח ברגע ההצתה:

$$U(t) = U(max) * \sin \omega t$$

$$U(\alpha) = U(max) * \sin \alpha$$

$$U(\alpha) = 100\sqrt{2} * \sin 60 = 122.47V$$

ה. כאשר מפסק S סגור הפולסים המתקבלים ממערכת הבקרה מקוצרים ולא מגיעים ל-SCR ולכן ה-SCR לא מוצת ולכן:

$$IRL=0, URL=0, PRL=0$$

3.1.8- בקרת גל שלם מיושר בז"ח

באמצעות המעגל לבקרת חצי גל ניתן לקבל אומנם בקרה רציפה בנגד העומס אך רק על חצי מהאנרגיה.

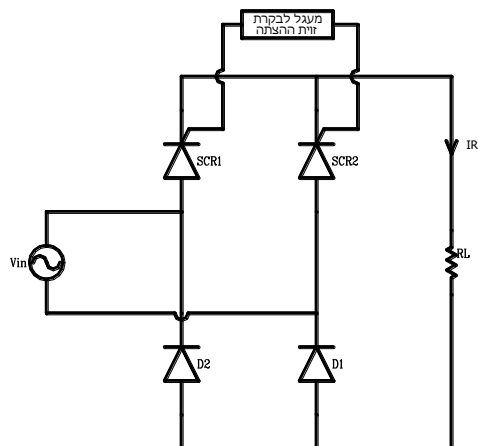
כאשר מעוניינים לבצע בקרת הספק על כל הגל באמצעות SCR נדרשת פעולת ישור.

קיימים 2 סוגים עיקריים של מעגלים המבצעים בקרת גל שלם מיושר:

1. באמצעות המודל של גשר דיודות.
2. באמצעות המודל של שנאי בעל סנף אמצעי.

בקרת גל שלם מיושר באמצעות מודל גשר דיודות

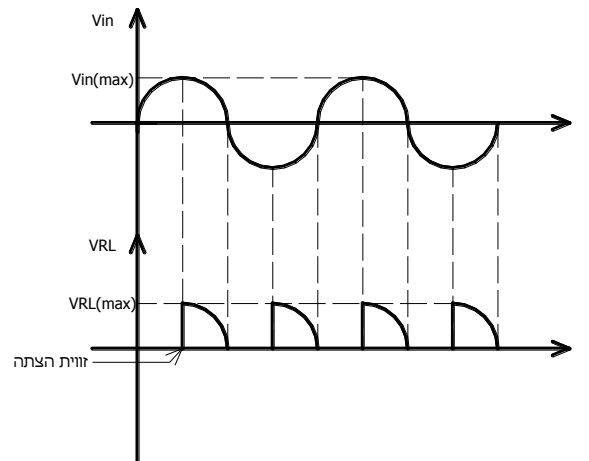
מעגל זה נראה באיור הבא:



הסבר למעגל:

- א. עבור החצי מחזור החיובי- בחצי מחזור זה הדיודה D1 בהולכה ואילו SCR1 יכול להוליך ברגע שיתקבל פולס ממערכת הבקרה. במצב זה הדיודה D2 ו- SCR2 בקטעון.
- ב. עבור החצי מחזור השלילי- בחצי מחזור זה הדיודה D2 בהולכה ואילו SCR2 יכול להוליך ברגע שיתקבל פולס ממערכת הבקרה. במצב זה הדיודה D1 ו- SCR1 בקטעון.

המתח המתקבל על פני נגד העומס הוא גל שלם מבוקר הנראה באיור הבא:



חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע חצי גל מבוקר שעבורו ניתן לחשב גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל לפי הנוסחאות הבאות:

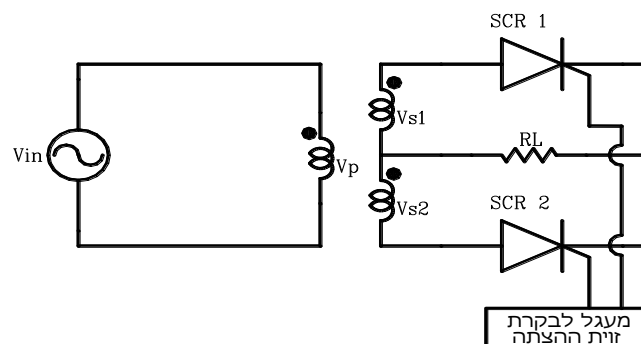
$$URL(av) = \frac{URL(max)}{\pi} * [1 + \cos \alpha] \quad \text{ערך ממוצע}$$

$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad \text{ערך יעיל}$$

הערות:

1. זרמים לחשב לפי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים יחושבו באמצעות ערכים יעילים בלבד.

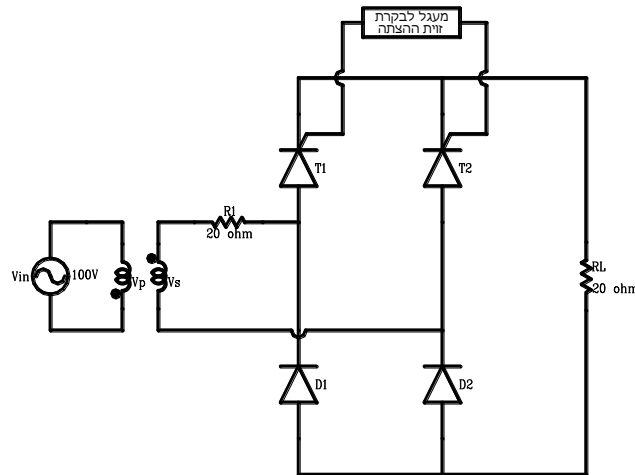
בקרת גל שלם מיושר באמצעות מודל שנאי בעל סנף אמצעי



על פני נגד העומס מתקבל גל שלם מיושר ולכן חישובים נבצע בדיוק באותן נוסחאות כמו במודל גדר דיודות.

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון כי: $\alpha = 60^\circ$, $K=1:2$.

- שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורות הגלים הבאות:
- V_p , V_s , U_{R1} , U_{RL} , I_{T2}
- חשב זרם ממוצע דרך בכל נגד.
- חשב הספק המתפתח בכל נגד.

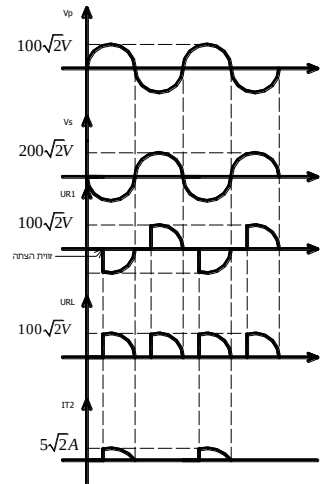
פתרון לתרגיל דוגמא:

- חישוב ערכים מקסימאליים:

$$V_s(max) = 2 * V_p(max) = 2 * 100\sqrt{2} = 200\sqrt{2}V$$

$$U_{R1}(max) = U_{RL}(max) = \frac{V_p(max)}{2} = \frac{200\sqrt{2}}{2} = 100\sqrt{2}V$$

$$I_{T2}(max) = I_{R1}(max) = I_{RL}(max) = \frac{U_{RL}(max)}{R_L} = \frac{100\sqrt{2}}{20} = 5\sqrt{2}A$$



ב. חישוב זרם ממוצע דרך כל נגד

$$IR1(av) = \frac{UR1(av)}{R1} = \frac{0}{20} = 0A$$

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL}$$

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{\pi} * [1 + \cos \alpha] = \frac{100\sqrt{2}}{\pi} * [1 + \cos 60] = 67.52V$$

$$IRL(av) = \frac{67.52}{20} = 3.376A$$

ג. חישוב הספק המתפתח בכל נגד

$$PR1 = PRL$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL}$$

$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$URL(rms) = \frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{60\pi}{180} + \frac{\sin 120}{2} \right)} = 89.69V$$

$$PR1 = PRL = \frac{89.69^2}{20} = 402.21W$$

3.1.9-תנאים קיצוניים ב-SCR

לכל SCR ישנם נתונים שונים הניתנים ע"י היצרן.

חלק מהנתונים מתייחסים לאותם תנאים קיצוניים שקיימים ברכיב.

ל-SCR יש 2 תנאים קיצוניים והם:

א. קצב שינוי המתח ברכיב $\frac{dV_{AK}}{dt}$ - במידה ועל פני הרכיב מופיעים שינויי מתח מהירים, הדבר עלול לגרום להצתה בלתי רצויה. ולכן היצרן מעדכן לגבי קצב זה כדי שאנחנו כמשתמשים ברכיב לא נאפשר שינויי מתח מהירים על פני הרכיב מעבר לנתוני היצרן. על מנת להגן על הרכיב מפני שינויים פתאומיים אלו יש לחבר במקביל אליו קבל, שהרי ידוע כי קבל מתנגד לשינויי מתח על פניו. את גודל הקבל ניתן לחשב באמצעות

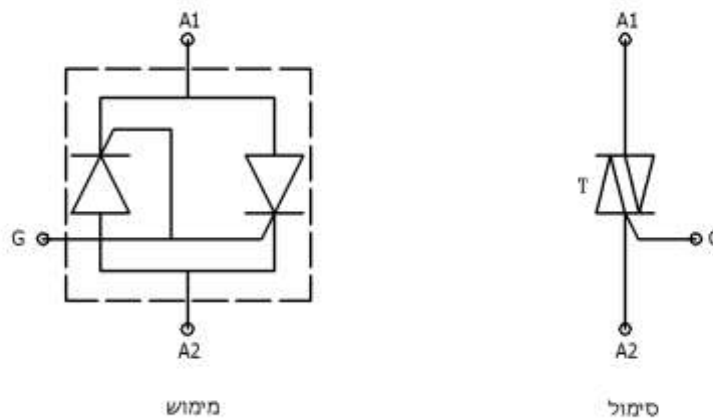
$$I_c = C \frac{dv_c}{dt} \text{ הביטוי הבא:}$$

ב. קצב שינוי הזרם ברכיב $\frac{di_{AK}}{dt}$ - במידה ודרך הרכיב מופיעים שינויי זרם מהירים, הדבר עלול לגרום ל"מכות" של זרם ברכיב הגורם להתחממותו ובך מסכן ומקצר את אורך חייו. גם כאן היצרן מעדכן לגבי שינויי קצב הזרם המאקסימלים המותר הרכיב כך שלא יסכן אותו. על מנת להגן על הרכיב מפני שינויים פתאומיים של זרם יש לחבר בטור אליו סליל, שהרי ידוע כי סליל מתנגד לשינויי זרם דרכו. את גודל הסליל ניתן לחשב באמצעות

$$V_L = L \frac{di}{dt} \text{ הביטוי הבא:}$$

3.2.1-רכיב ה-Triac

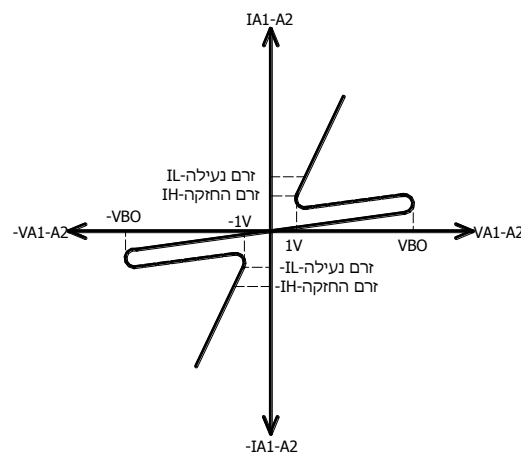
רכיב זה שייך למשפחת התריסטורים והוא מסוגל לבצע בקרה דו כיוונית.
רכיב זה ממומש באמצעות 2 SCR-ים שמחוברים בחיבור מקבילי אך בצורה הפוכה, ובאמצעות רגל שער משותפת. רכיב זה מסומן בצורה הבאה:



הערה:

רכיב ה-Triac מיוצר לזרמים הרבה יותר קטנים מרכיב ה-SCR אך הוא עדין נחשב כרכיב הספק. בשימוש בעומסים גדולים הצורכים זרמים $>15A$ נעזרים במימוש ה-Triac באמצעות SCR-ים.

3.2.2-אופיין מעשי של רכיב ה-Triac

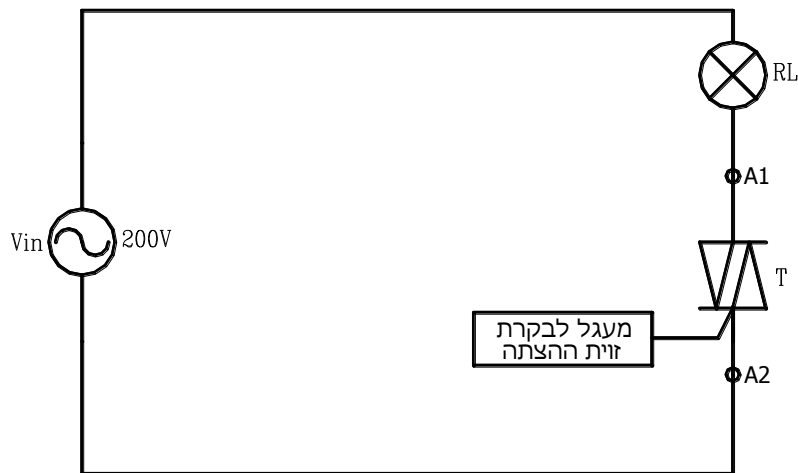


הערות:

- גם עבור רכיב זה ישנם תנאים קיצוניים שנתונים ע"י היצרן, מעגלי הגנה לתנאים אלו זהים ל-SCR.
- אותן שיטות להצתה וכיבוי שתקפה ב-SCR קיימים גם כאן.

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון:

1. על המנורה נקובים הערכים הבאים: $200V/100W$.
2. מעגל הבקרה מייצר פולסים בהתאם לביטוי המתמטי הבא:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + k\pi \quad \text{כאשר } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

א. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורת הגלים הבאות:
 $V_{in}, U_{RL}, V_{A1-A2}, I_{A1-A2}$.

ב. חשב את הזרם הממוצע במנורה.

ג. חשב את ההספק המתפתח במנורה.

ד. חשב בצורה אינטואיטיבית את זווית ההצתה במעגל אם ידוע שההספק המתפתח במנורה הוא $50W$.

ה. קבע את תחום זווית ההצתה כך שתחום ההספק שיתפתח במנורה יהיה $20W-50W$ העזר באופינים.

פתרון לתרגיל דוגמא:

הערות:

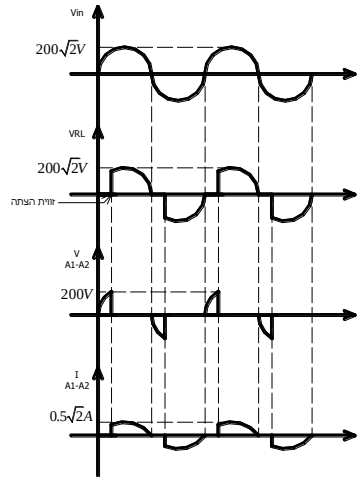
1. מנתוני המנורה הנקובים ניתן לקבוע שכאשר היא תחובר ישירות לרשת יתפתח עליה $100W$.
2. מנתוני המנורה הנקובים ניתן למצוא את התנגדותה (בטמפ' העבודה שלה) $RL = \frac{U_{RL}^2}{P_{RL}} = \frac{200^2}{100} = 400\Omega$.
3. מהביטוי המתמטי של מערכת הבקרה ניתן לקבוע שהפולס הראשון יופיע בזווית- $\alpha = \frac{\pi}{4} + k\pi = \frac{180}{4} + 0 * 180 = 45^\circ$ וממנו יופיעו פולסים נוספים בצורה מחזורית אך בתוספת 180° .

א. צורות גלים:

$$U_{A1-A2}(\alpha) = U_{AK(max)} * \sin \alpha$$

$$U_{A1-A2}(45^\circ) = 200\sqrt{2} * \sin 45 = 200V$$

$$I_{A1-A2(max)} = I_{RL(max)} = \frac{U_{RL(max)}}{RL} = \frac{200\sqrt{2}}{400} = 0.5\sqrt{2}A$$



ב. חישוב זרם ממוצע דרך המנורה

$$I_{RL(av)} = 0A$$

שטחים זהים מבטלים זה את זה.

ג. חישוב הספק המתפתח במנורה

$$P_{RL} = \frac{U_{RL(rms)}^2}{RL}$$

$$U_{RL(rms)} = \frac{U_{RL(max)}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$U_{RL(rms)} = \frac{200\sqrt{2}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{45\pi}{180} + \frac{\sin 90}{2} \right)} = 190.7V$$

$$P_{RL} = \frac{190.7^2}{400} = 90.916W$$

ד. ההספק הנקוב של המנורה הוא 100W ללא בקרת הספק. וכאשר מתבצעת בקרת הספק וההספק המתפתח על המנורה הוא 50W המשמעות היא שזווית ההצתה היא 90° וזאת משיקולי שטחים.

ה. עבור PRL=50W

$$URL(rms) = \sqrt{PRL * RL} = \sqrt{50 * 400} = 141.42V$$

$$\frac{URL(rms)}{Vin(rms)} = \frac{141.42}{200} = 0.707$$

לפי האופיין עבור מקדם -0.707 $\beta=90^\circ$ ולכן $\alpha=180-90=90^\circ$.

עבור PRL=20W

$$URL(rms) = \sqrt{PRL * RL} = \sqrt{20 * 400} = 89.44V$$

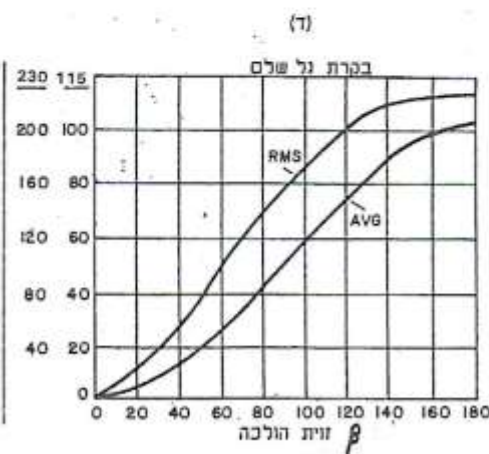
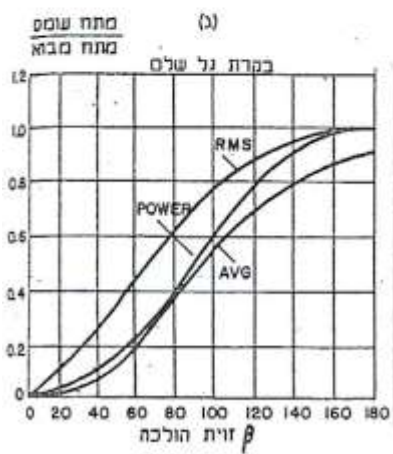
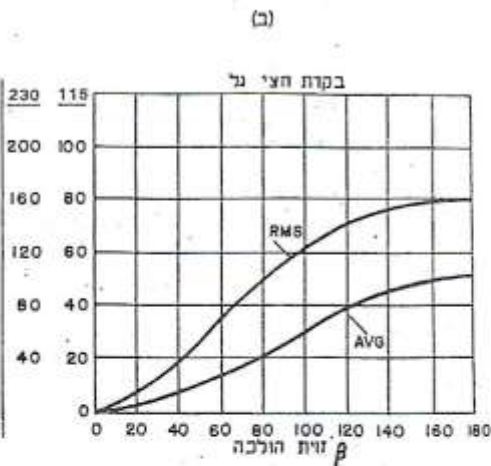
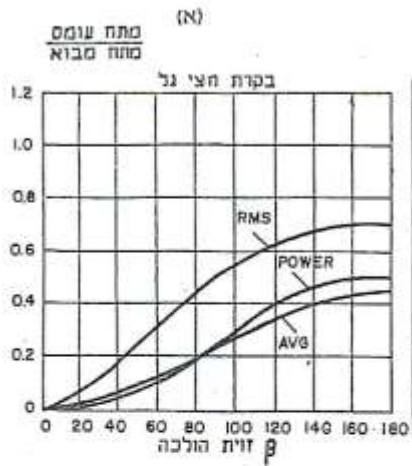
$$\frac{URL(rms)}{Vin(rms)} = \frac{89.44}{200} = 0.442$$

לפי האופיין עבור מקדם -0.442 $\beta=60^\circ$ ולכן $\alpha=180-60=120^\circ$.

ומכן תחום זווית ההצתה יהיה: $90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$

בקרר הספק בקרב זרמים

$$\alpha + \beta = 180^\circ$$

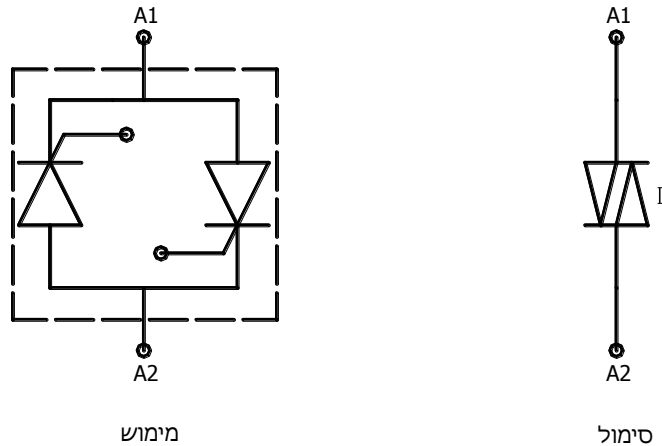


זרמים (ב) ו- (ד) מיושמים אך ורק עבור מתח
הנמוך של $230V_{rms}$ (ישראל) או $115V_{rms}$ (ארצות הברית)

3.3.1- רכיב ה-Diac

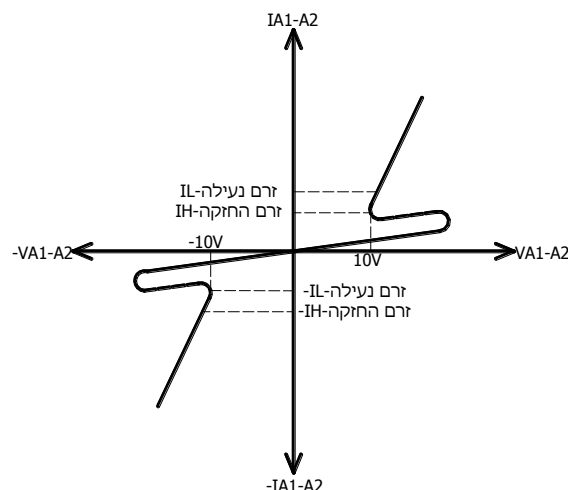
ה-Diac זהו רכיב שמשתייך לקבוצת התריסטורים אך הוא לא נחשב כרכיב הספק אלא אך ורק כרכיב עזר לערוץ ההספק.

ה-Diac מסומן באופן הבא:



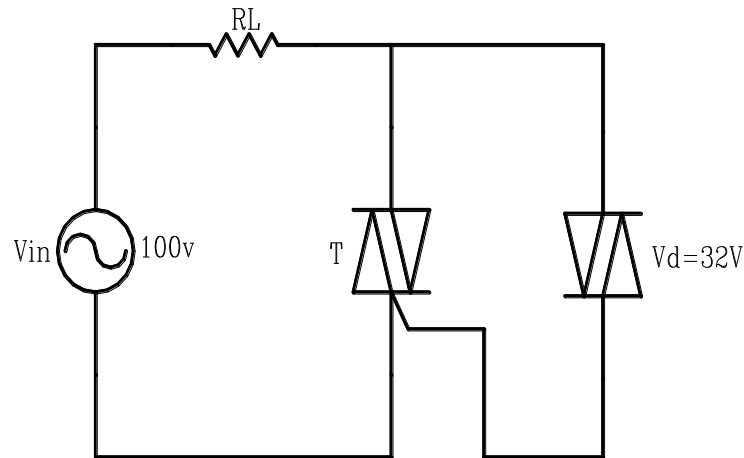
ניתן לראות על פי המימוש ה-Diac בעזרת ה-SCR-ים שאת ה-Diac ניתן להצית רק כאשר המתח על פניו עולה מעל מתח ההצתה שלו (אין ל-Diac רגל שער). ה-Diac איננו מהווה מתג אידיאלי, כלומר כאשר הוא מוליך המתח על פניו בערך 10V. דבר זה נוצר על חשבון מתחי ההצתה הנמוכים שלו, סדר גודל של מתחי הצתה של ה-Diac נע 15-60V וזאת הסיבה שאת ה-Diac נוהגים שלא לחבר לערוץ ההספק.

3.3.2- אופיין מעשי של רכיב ה-Diac

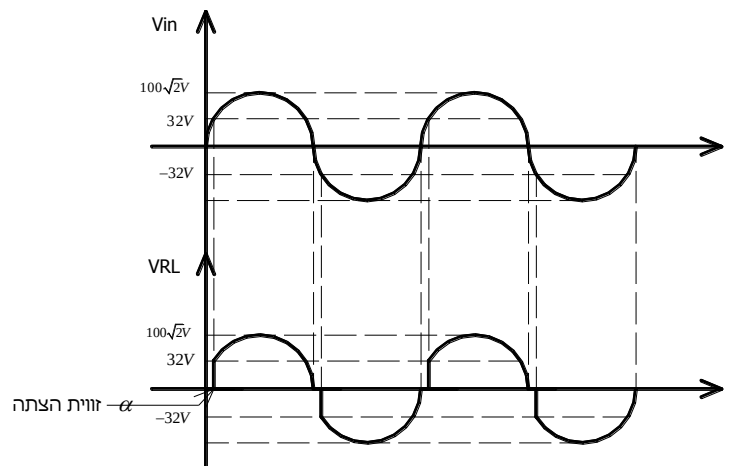


3.3.3-מעגל Trimmer-מעגל לבקרת הספק בעל זווית הצתה אחת בלבד.

המעגל כמתואר באיור הבא:



צורת גלים:



הסבר למעגל:

במעגל מחובר Diac בעל מתח הצתה של 32V. ניתן לראות שה-Triac יוצת רק אם יגיע לרגל השער שלו פולס של זרם. פולס כזה יכול להגיע רק כאשר ה-Diac מוצת. בהתחלה ה-Triac במצב כבוי ולכן המתח על פניו הוא כמו מתח המקור ובקרוב טוב זה גם המתח הנופל על ה-Diac. עד למתח הפריצה של ה-Diac $V_{URL}=0V$. ברגע שהמתח על ה-Diac עובר את מתח הפריצה שלו הוא מוצת ומצית איתו את ה-Triac וככה וזאת כי הזרם יעדיף לעבור דרך ה-Triac. רק כאשר המתח על פני נגד העומס יורד ל-0V ה-Triac כבה. אותה פעולה בדיוק נקבל עבור החצי מחזור השלילי.

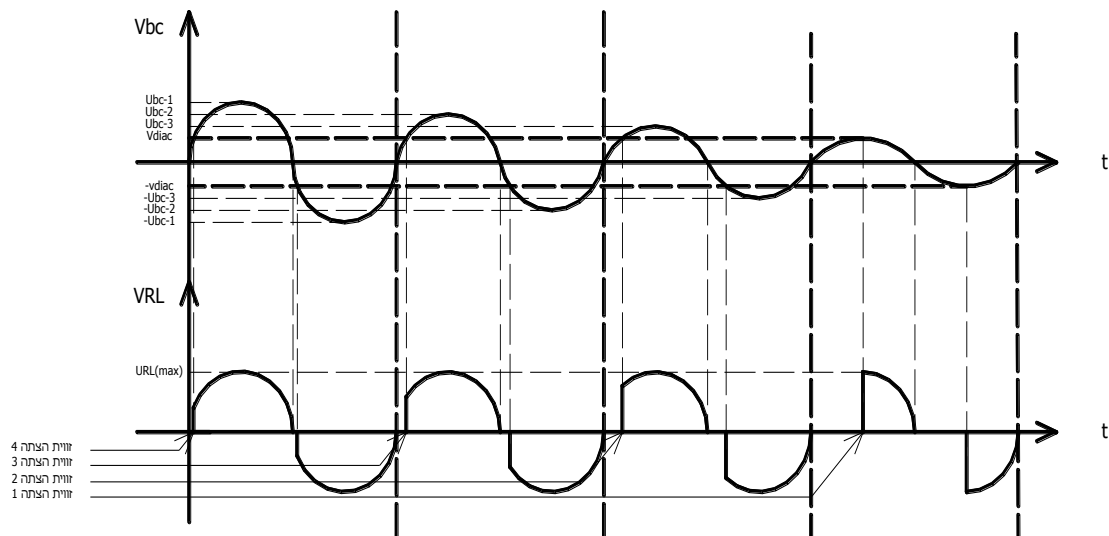
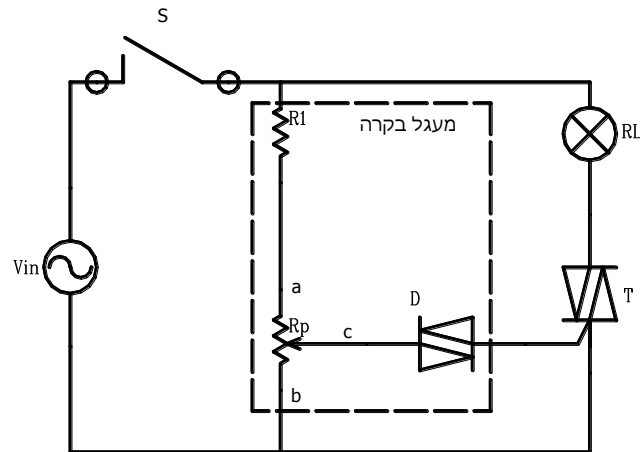
הערות:

1. מעגל זה איננו שימושי בהספקים גבוהים והסיבה לכך היא שזרם ההצתה שנכנס לרגל השער של ה-Triac מגיע מערוץ ההספק.
2. מי שקובע את זווית ההצתה במעגל הוא אותו מתח הצתה של ה-Diac. ככל של-Diac מתח הצתה גבוה יותר זווית ההצתה שתתקבל תהיה גדולה יותר.
3. זווית ההצתה המקסימאלית שיכולה להופיע במעגל זה היא 90° .
4. על מנת לחשב את זווית ההצתה במעגל לעזר בביטוי הבא:
$$U(\alpha) = U(max) * \sin \alpha$$
$$U(diac) = U(max) * \sin \alpha$$
$$\sin \alpha = \frac{U(diac)}{U(max)}$$
$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{U(diac)}{U(max)} \right)$$
5. חיבור טורי של Diac-ים גורם לכך שזווית ההצתה במעגל הולכת וגדלה (המעגל מוצת כאשר מתח המקור מגיע לסכום של מתחי ההצתה של ה-Diac-ים שחוברו בטור), אך דבר זה בו זמנית מגדיל את איבודי ההספק במעגל.

3.3.4- מעגל Dimmer- מעגל לבקרת הספק בעל זווית הצתה הניתנת לשינוי.

קיימים סוגים שונים של מעגלים אשר מבצעים את פעולת הדימר (עמעם). במעגלים אלו הרעיון ביצוע בקרת הספק לגל שלם לא מיושר תוך כדי אפשרות לשינוי הזווית ההצתה של המעגל.

המעגל נראה באיור הבא:



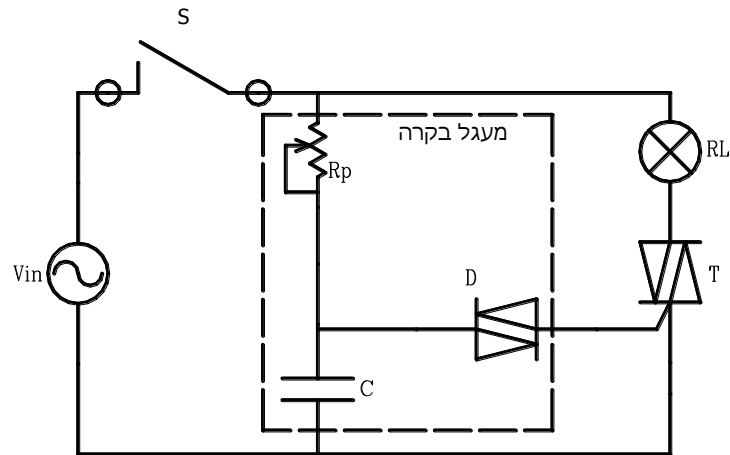
הסבר למעגל:

המעגל מבצע את פעולת בקרת ההספק במנורה על פי שיטת ה-Dimmer. כאן שינוי במצב הפוטנציומטר משנה את רמת המתח בין הנקודות ב ו- c שזה המתח שמופיע על ה-Diac. רק כאשר המתח בנקודות ב ו- c מגיע למתח ההצתה של ה-Diac הוא מוצת ומצית אחריו את ה-Triac.

הערות:

1. מעגל זה איננו מהווה דימר מעשי בגלל חסרונות רבים. החיסרון הבולט הוא שזווית ההצתה במעגל יכולה לנוע קצת יותר מ- 0° ועד למקסימום 90° .
2. חיסרון בולט נוסף הוא ששינויים עדינים במצב הפוטנציומטר גורמים לשינויים חדים בזווית ההצתה.
3. ערוץ ההספק במעגל זה מכיל את מקור המתח, המתג הראשי, רכיב ה-Triac ורכיב העומס עצמו. לעומתו ערוץ הבקרה מכיל את הנגדים R1 ו-Rp ואת רכיב ה-Diac.
4. במעגל זה קיימים בזבזי הספק גבוהים בתוך מעגל הבקרה, והפיתרון לכך לחבר שנאי במערכת כך שמתח ההזנה למעגל הבקרה יהיה נמוך יותר ומכאן שהספק המתבזבז יהיה נמוך יותר.

3.3.5- מעגל לבקרת הספק מסוג Dimmer משופר.



פיתוח נוסחאות:

$$X_c = \frac{1}{j\omega c}$$

$$\vec{U_c} = \frac{V_{in} * X_c}{X_c + R_p} = \frac{V_{in} * \frac{1}{j\omega c}}{\frac{1}{j\omega c} + R_p} = \frac{V_{in}}{1 + jR_p\omega c}$$

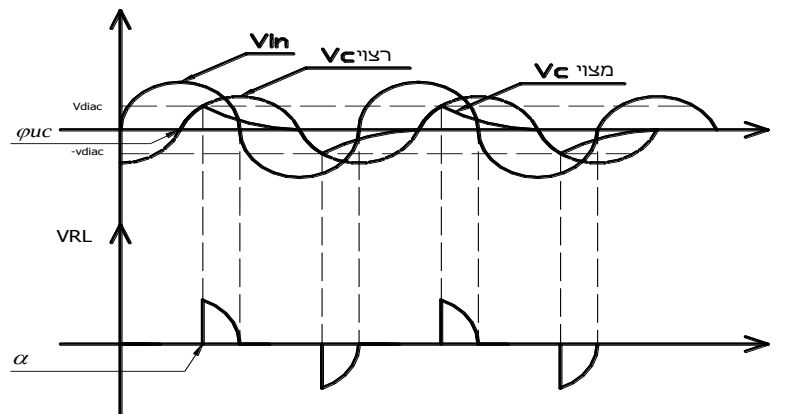
$$\vec{U_c} = \frac{V_{in}}{1 + \frac{1}{j\omega c}} = \frac{V_{in} \angle 0}{\sqrt{1^2 + (R_p\omega c)^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{R_p\omega c}{1}\right)}$$

$$|U_c|(\max) = \frac{V_{in}(\max)}{\sqrt{1 + \underbrace{(R_p\omega c)^2}_{\mathcal{T}}}}$$

$$\varphi_{uc} = -\tan^{-1}\left(\underbrace{R_p\omega c}_{\mathcal{T}}\right)$$

$$U_c(\alpha) = U_c(\max) * \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$

צורות גלים:



הערות:

1. גם במעגל זה שינוי במצב הפוטנציומטר גורם לשינוי בזווית ההצתה.
2. המתח על הקבל משתנה גם מבחינת הגודל וגם מבחינת המופע כאשר משנים את ערך הפוטנציומטר. כאשר ערך הפוטנציומטר שווה ל-0 המתח על הקבל שווה ערך למתח המקור הן מבחינת הגודל והן מבחינת המופע, ככל שמגדילים את ערך הפוטנציומטר המתח על הקבל מתחיל לקטון ואילו זווית המופע שלו מתחילה לגדול לכיוון ה- -90° . רק כאשר ערך הפוטנציומטר גדול מאוד המתח על הקבל קטן מאוד אך זווית המופע שלו בקרוב טוב שווה ל- -90° .
3. ניתן לבטא כאמור את המתח הרגעי שבקבל באמצעות הביטוי המתמטי:

$$U_c(\alpha) = U_c(max) * \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$
 באמצעות ביטוי זה ניתן למצוא את זווית ההצתה במעגל עבור מצב מסוים של הפוטנציומטר. יש לזכור שעד לרגע הצתת ה-Diac המתח על פניו בקרוב טוב כמו המתח על הקבל ורק כאשר המתח על הקבל מגיע למתח ההצתה של ה-Diac, ה-Diac מוצת וזה קורה בזווית ההצתה α . את זווית ההצתה ניתן לחשב באופן הבא:

ברגע ההצתה-

$$U_c = U_{diac}$$

ולכן-

$$U_{diac} = U_c(max) * \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$

$$\frac{U_{diac}}{U_c(max)} = \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$

$$\sin^{-1}\left(\frac{U_{diac}}{U_c(max)}\right) = \alpha + \varphi_{uc}$$

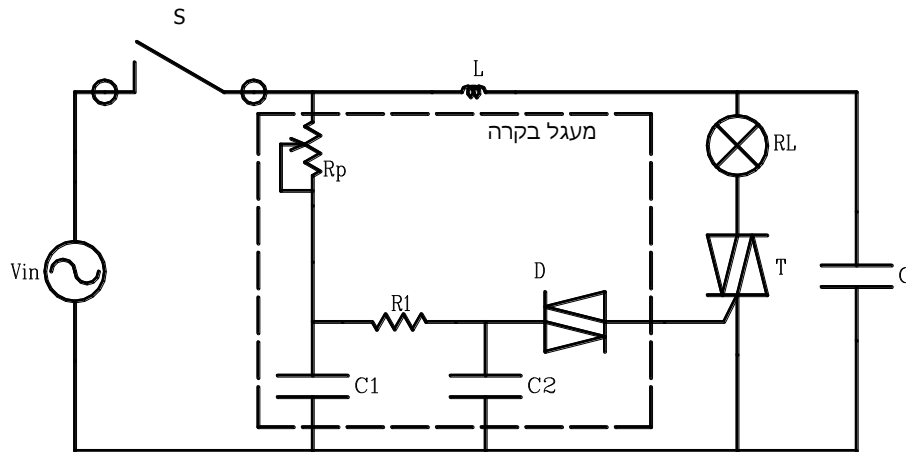
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{U_{diac}}{U_c(max)}\right) - \varphi_{uc}$$

4. יש לזכור שהמתח על הקבל מתנהג על פי אותו ביטוי רגעי עד לרגע ההצתה, מהרגע שה-Diac מוצת הוא בעצם מקצר את הקבל וגורם להתפרקותו.
5. יתכן כי לא יופיע ערך הקבל ומצב הפוטנציומטר אלא ערך קבוע הזמן T שהרי ידוע כי: $T = R_p * C$.
6. על פני נגד העומס מופיע בקרת גל שלם (לא מיושר), ועל מנת לחשב ערכים יעילים בנגד העומס נעזר בנוסחאות המתאימות.
7. גם במעגל זה תחום הוויסות הוא 90° אבל יש לו יתרון על המעגל ה-Dimmer הקודם בכך ששינויים קטנים במצב הפוטנציומטר גורם לשינויים עדינים בזווית ההצתה, וכמו כן מעגל הבקרה מכיל קבל במקום נגד נוסף וזה מקטין את איבודי ההספק במעגל הבקרה.

3.3.6-מעגל לבקרת הספק מסוג Dimmer סופי.

אחד החסרונות הגדולים במעגל הקודם הוא שתחום הוויסות של זווית ההצתה אינו יכול להיות גדול מ- 90° אך ידוע שכאשר מחברים חוליות RC בשרשרת (קסקדה) ניתן לקבל הזזת מופע רחבה יותר.

באופן עקרוני מעגל הדימר נראה באיור הבא:



הערות:

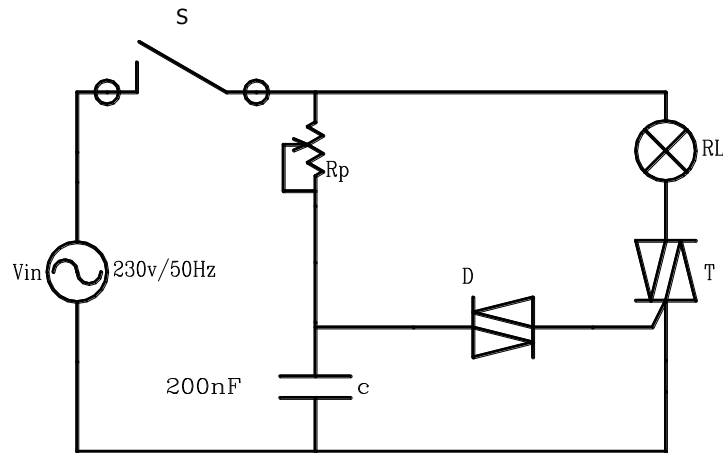
1. באופן מעשי מחברים למעגל גם סליל הגנה בפני שינויים פתאומיים של זרם על רכיב ההספק $\frac{di(Triac)}{dt}$ וגם קבל בפני שינויים פתאומיים של מתח על רכיב ההספק $\frac{dv(Triac)}{dt}$ (ראה התייחסות לתנאים קיצוניים בתרסטורים).
2. גם מעגל זה שינוי המצב הפוטנציומטר יגרום לשינויים בזווית ההצתה, אלא שכאן נוכל לקבל תחום וויסות רחב יותר כמעט 180° .
3. ניתן להוסיף שנאי בכניסה למעגל הבקרה על מנת להקטין את איבודי ההספק במעגל הבקרה.

שימושים במעגל ה-Dimmer

1. פעולת הדימר נפוצה בשימוש בעמעם אורות ביתי או מסחרי (עבור נורות ליבון או הלוגן).
2. בקרת מהירות למנועים אוניברסאליים. מנוע אוניברסאלי זהו מנוע לזרם ישר המחובר בערעור טורי, מנועים כאלה ניתן למצוא במברגות או מקדחות יד בעלי הדק אלקטרוני לוויסות מהירות הסיבוב.

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון כי:

- א. על הנורה הנתונים הבאים - $230V/500W$.
- ב. מתח הפריצה של ה-Diac הינו $64V$.
- ג. ערכו של הפוטנציומטר הינו $60K\Omega$.

חשב:

- א. זווית ההצתה במעגל.
- ב. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורת הגל בעומס.
- ג. הספק בעומס.

פתרון לתרגיל דוגמא:

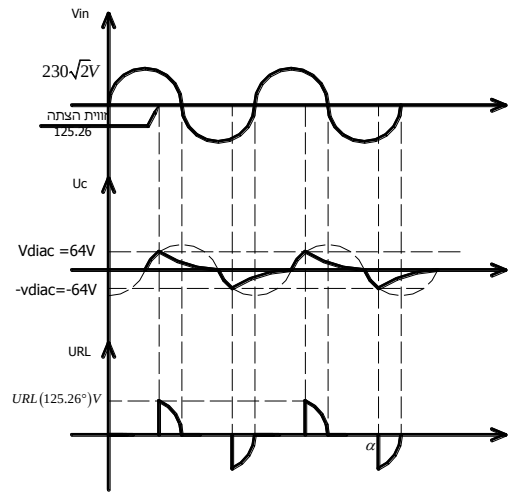
- א. חישוב זווית ההצתה:

$$|U_c|(max) = \frac{V_{in}(max)}{\sqrt{1 + (R_p \omega c)^2}} = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{1 + (60 * 10^3 * 2\pi * 50 * 200 * 10^{-9})^2}} = 83.4V$$

$$\varphi_{uc} = -\tan^{-1}(R_p \omega c) = -\tan^{-1}(60 * 10^3 * 2\pi * 50 * 200 * 10^{-9}) = -75.14^\circ$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{U_{diac}}{U_c(max)}\right) - \varphi_{uc} = \sin^{-1}\left(\frac{64}{83.4}\right) - (-75.14) = 125.26^\circ$$

ב. צורות גלים:



ג. חישוב ההספק המתפתח בעומס:

$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} =$$

$$URL(rms) = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{125.26\pi}{180} + \frac{\sin(2 * 125.26)}{2} \right)} = 90.278V$$

$$RL = \frac{URLn(rms)^2}{Pn} = \frac{230^2}{500} = 105.8\Omega$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{90.278^2}{105.8} = 77W$$

3.4.0- מיתוג בנקודת האפס Z.V.S (Zero Voltage Switching)

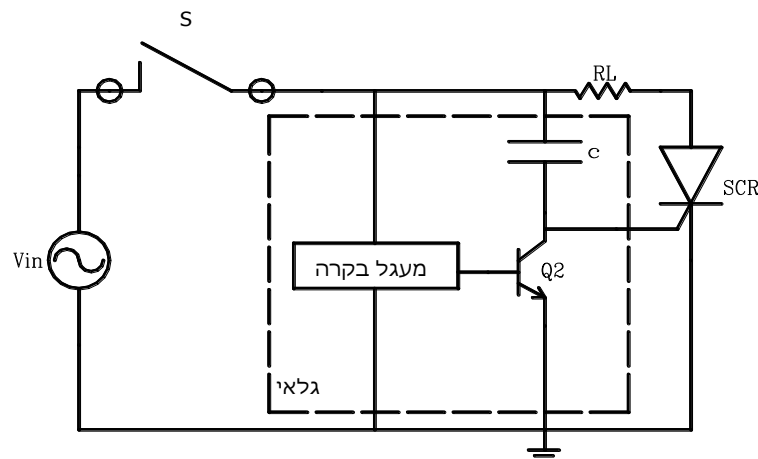
3.4.1- מבוא

על מנת לבצע בקרת הספק בצרכנים מסוימים בז"ח אנו נעזרים באותם מעגלים בבקרת הספק שקיימים כאשר השימושי מבין כולם הוא ה-Dimmer. ל-Dimmer יש חיסרון בצורת הגל שהוא מייצר, על פי "פורייה" לכל אות מחזורי שהוא לא סינוס יש הרמוניות בתדרים שהם כפולות תדר הסינוס המקורי. המשרעת (U_{max}) של הרמוניות אלו הולכת וקטנה כאשר תדר ההרמוניה הולך וגדל. ידוע שאותות מתפשטים באוויר בקלות רבה כאשר הם נמצאים בתדרים גבוהים, ובמידה ולאותות אלו הספק גבוה, הוא יבוא לידי ביטוי בהפרעות רדיו שונות. תופעה זו יוצרת הפרעות אלקטרומגנטיות שמורגשות בעיקר במכשירי שמע. החוק אוסר לבצע בקרת הספק בדרך הרגילה (בקרת זווית) בעומסים הגדולים מ-10KW.

לכן קיימת שיטת מיתוג נוספת הנקראת בשם "מיתוג בנקודת האפס", הרעיון בשיטה זו היא להעביר לעומס סינוסים שלמים בזמנים שונים.

3.4.2- מעגל בשיטת Z.V.S חצי גל

מעגל זה מתואר באיור הבא:



הסבר פעולת המעגל:

ברגע סגירת המפסק S הגלאי מחובר ישירות לרשת ותפקידו לדגום את מתח הרשת. בנגד העומס הנמצא בערוץ ההספק לא יזרום זרם עד אשר ה-SCR יוצת. ברגע שהגלאי חש שמתח הרשת חצה את נקודת האפס במגמת עליה בלבד הוא שולח פולס לרגל השער של ה-SCR ובכך הוא מצית אותו. התוצאה שעל פני נגד העומס יכולים להופיע אך ורק חצאי סינוסים שלמים.

הגלאי מכיל בתוכו קבל, מתג אלקטרוני שהוא בדך כלל טרנזיסטור מסוג *Fet* וכן מעגל בקרה שבאמצעותו ניתן לשלוט על בקרת ההספק בנגד העומס. במוצא מעגל הבקרה יכול להתקבל או "0" או "1".

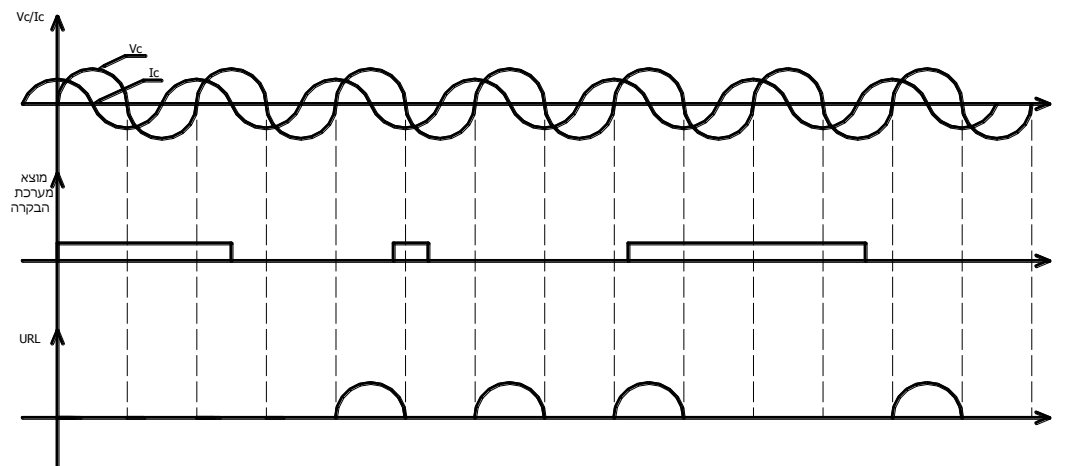
1. עבור מצב שבמוצא הבקרה מופיע "1":

במצב זה הטרנזיסטור נמצא ברוויה וניתן לראות אותו כמתג סגור. במצב זה הקבל מחובר ישירות לרשת ואילו רגל השער של ה-*SCR* מקוצרת לאדמה. המשמעות היא שה-*SCR* במצב זה לעולם לא יוצת כלומר אין הספק בנגד העומס.

2. עבור מצב שבמוצא הבקרה מתקבל "0":

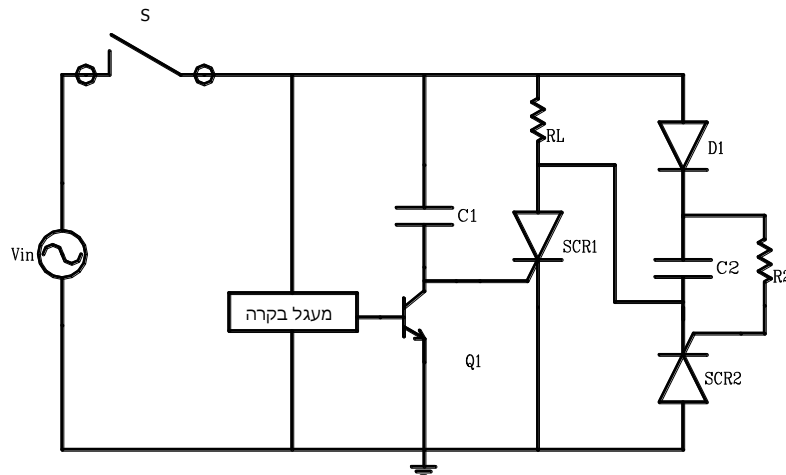
במצב זה זורם זרם באופן תמידי ברגל השער של ה-*SCR*. על הקבל בקירוב טוב נופל מתח הרשת, אך ידוע שבקבל הזרם מקדים את המתח ב- 90° , כלומר כאשר מתח הרשת חוצה את נקודת האפס הזרם בקבל הוא מקסימאלי. המעגל נבנה כך שעוצמת הזרם המקסימאלית דרך הקבל היא כזו שדרושה כדי להצית את ה-*SCR* $I_c(max) \geq IL$.

צורות גלים:



3.4.3-בשיטת Z.V.S גל שלם

מעגל זה מתואר באיור הבא:



הסבר לפעולת המעגל:

גם מעגל זה במוצא מעגל הבקרה מתקבלים פולסים הרמות של "0" ו- "1". שליטה על בקרת ההספק בנגד העומס תתבצע ע"י שינוי כמות הפולסים שיוצאים ממערכת הבקרה.

1. עבור מצב שבו במוצא מערכת הבקרה מתקבל "1"

במצב זה קבל C1 מחובר ישירות לרשת ואילו רגל השער של SCR1 מקוצרת לאדמה, המשמעות היא שלא ניתן להצית את SCR1. בהמשך להסבר יובן שאם SCR1 לא מוצת גם SCR2 לא יוצת.

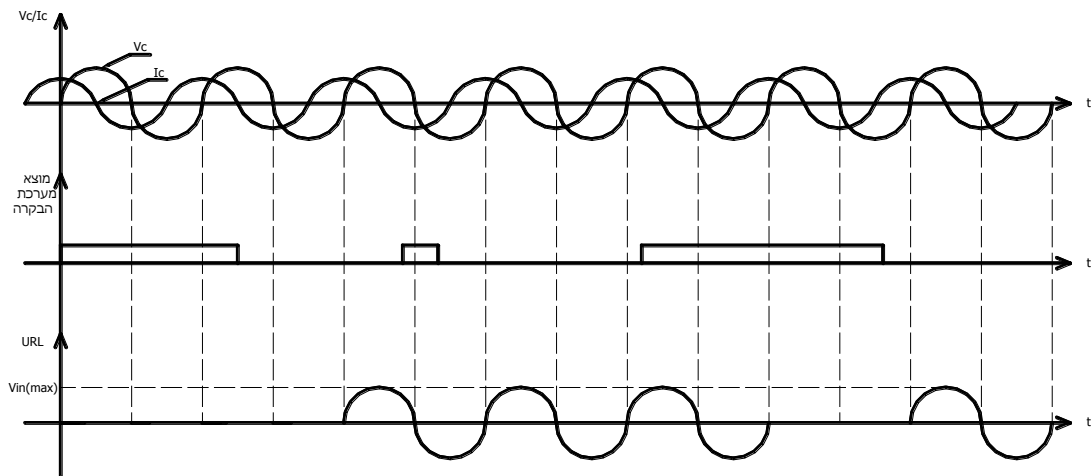
2. עבור מצב שבו במוצא מערכת הבקרה מתקבל "0"

הסבר זה יתחלק ל-2 חלקים:

- עבור החצי מחזור החיובי של המקור- במצב זה SCR1 מאופשר, SCR2 לא מאופשר והדיודה D1 בהולכה. גם במעגל זה ניתן לראות שבאופן תמידי זורם זרם לתוך השער של SCR1 דרך הקבל C1. ז"א שמתח הרשת בחצי מחזור החיובי חוצה את נקודת האפס במגמת עליה בלבד הזרם בקבל C1 במצב מקסימאלי וזה השלב שבו SCR1 יוצת. מרגע זה קורים מספר דברים: $V_{in}=U_{RL}$, והקבל C2 נטען באנרגיה חיובית.
- עבור החצי מחזור השלילי של המקור- במצב זה SCR1 כבה הדיודה D1 בקטעון ואילו הקבל C2 מתפרק מאנרגיה שאגר בחצי מחזור החיובי, וזאת דרך הנגד R2 לתוך רגל השער של SCR2 ובכך הוא מצית אותו. כתוצאה מכך עדין $V_{in}=U_{RL}$. כך פעולה זו מתבצעת באופן מחזורי עד לרגע ששוב במוצא מעגל הבקרה מופיע "1".

הערה:

במעגל זה ל-SCR1 קוראים Master (אדון) ואילו ל-SCR2 קוראים Slave (עבד). הסיבה לכך היא ש-SCR2 יכול להיות מוצת רק כאשר SCR1 מוצת.



(עבודת בית מס' 3 בגמר לימוד פרק זה)

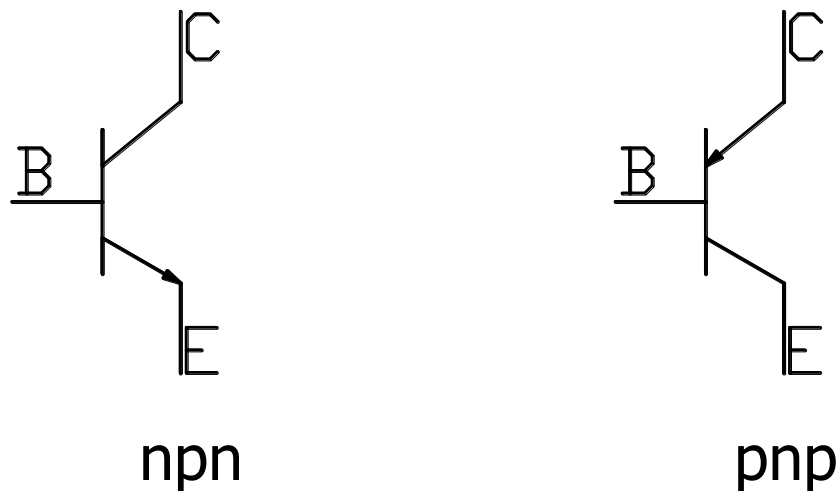
3.5.0- מתגים אלקטרוניים נוספים בבקרת הספק

חוץ ממתגים אלקטרוניים ממשפחת התריסטורים (SCR ; TRIAC ; DIAC) שנדונו בפרק זה קיימים באלקטרוניקה של מערכות הספק מתגים אלקטרוניים נוספים. רכיבים המבוססי טרנזיסטור הם רכיבים חד כיוונים כלומר הזרם יכול לזרום דרכם רק בכיוון אחד. בסימול הרכיבים מופיע חץ המצביע על כיוון הזרם המותר ברכיב (למעט ברכיב ה-Power Mosfet שכיוון הזרם המותר בניגוד לכיוון החץ).

בתריסטורים מגדירים את מצבו : "מתג סגור"-מוצת , "מתג פתוח"-כבוי.
בטרנזיסטורים מגדירים את מצבו : "מתג סגור"-רוויה , "מתג פתוח"-קטעון.

3.5.1- הטרנזיסטור הביפולארי BJT (Bipolar Junction Transistor)

סימולו:



טרנזיסטור זה אינו מתג אידיאלי המתח בין הקולקטור לאמיטר שהמתג סגור (במצב רוויה) נע בגבולות $V_{CE(set)}=0.3V-2V$.

לדוגמא בטרנזיסטור הספק מסוג זה ל-100A

ההספק המתבזז עליו יכול להגיע ל- $P_{(set)}=V_{CE}*I_{CE}=2*100=200W$.

חסרון נוסף הוא הצורך בזרם בסיס קבוע להפעלתו. בטרנזיסטורים ההגבר β

מוגדר- $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ והוא נמוך בסביבות 25 בלבד. ומכאן לפי הדוגמא על מנת

להחזיק את הטרנזיסטור ברוויה עבור זרם קולקטור של 100A יש צורך בזרם

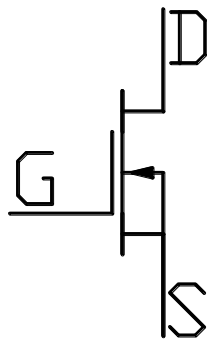
בסיס של- $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{100}{25} = 4A$. וזה זרם גבוה למערכת בקרה.

עבור חנק- כאשר $V_B="1"$ המתג ברוויה , כאשר $V_B="0"$ המתג בקטעון.

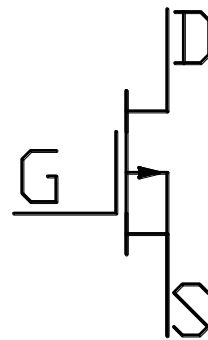
עבור חנק- כאשר $V_B="0"$ המתג ברוויה , כאשר $V_B="1"$ המתג בקטעון.

3.5.2- טרנזיסטור Power Mosfet (טרנזיסטור תוצר שדה)

סימולו:



n-ch



p-ch

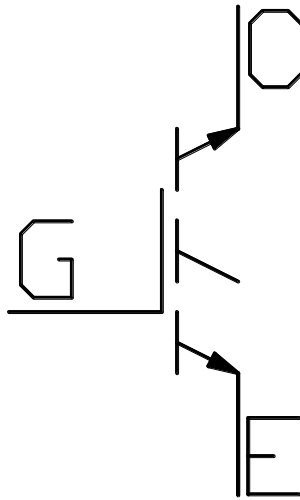
רכיב זה נחשב למתג כמעט אידיאלי. בין ההדקים D (שפך) ו-S (מקור) קיימת התנגדות קטנה מאוד במצב רוויה של המתג. צריכת הזרם ברגל G קטנה מאוד וקיימת רק בזמן העברת המתג ממצב קטעון לרוויה וגם זאת לפרק זמן קצר מאוד. בכל הזמן שהמתג במצב רוויה או בקטעון (לאחר המעבר) אין זרם ברגל ה-G. צריכת זרם זו היא יחסית לקצב המיתוג. המשמעות לכך שאין בזבז הספק (כמעט) על הטרנזיסטור. ה-Power Mosfet הוא המהיר מבחינת קצב המיתוג לאחר מכן ה-IGBT ובסוף ה-BJT.

עבור p-ch - כאשר $V_{GS}=1$ המתג ברוויה, כאשר $V_{GS}=0$ המתג בקטעון.

עבור n-ch - כאשר $V_{GS}=0$ המתג ברוויה, כאשר $V_{GS}=1$ המתג בקטעון.

3.5.3- טרנזיסטור IGBT

סימולו:



מתג זה הוא למעשה מעגל משולב המתנהג בין ה-C (קולקטור) לבין ה-E (אמיטר) כטרנזיסטור מסוג BJT (ביפולארי) אך התנהגות רגל ה-G היא כמו בטרנזיסטור Power Mosfet (תוצר שדה). לכן מתג זה מוגדר כטרנזיסטור בעל שער מבודד.

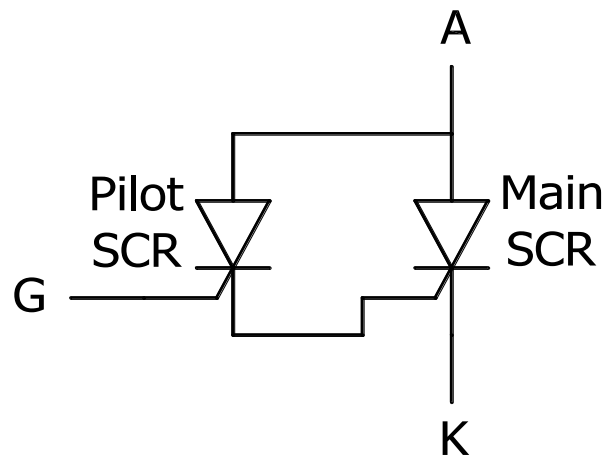
רכיב זה אינו נכנס "לרשימה עמוקה" ולכן במצב רוויה המתח בין הקולקטור לאמיטר ינוע בגבולות $V_{CE(set)}=1.5V-3.5V$. המשמעות היא שכאשר המתג סגור קיים בזבז הספק על הטרנזיסטור. בזבז הספק זה גדול יותר מבזבז ההספק בטרנזיסטורים ביפולריים אך יתרונו הבולט קצב מיתוגו הגבוה יותר.

3.6.0- תריסטורים מיוחדים בבקרת הספק

קיימים 2 סוגים של SCR-ים. כאלה המיועדים לבקרת פאזה והם פועלים במתח הרשת ובקצב שלה, וכאלה המיועדים ל-Inverters והם בעלי קצב מיתוג גבוה יותר שאינו עולה בכל מקרה על 20KHz. שהעיקרים שבהם מפורטים להלן.

3.6.1- תריסטור Amplifying Gate SCR

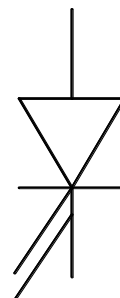
במהפכים (Inverters) דרושים SCR-ים בעלי מהירות הצתה גבוהה לשם כך פותח הרכיב Amplifying Gate SCR שהוא למעשה צרוף של 2 SCR-ים כמתואר באיור הבא:



3.6.2- תריסטור GTO (Gate Turn Off)

קיים רכיב נוסף במשפחת התריסטורים שנקרא GTO רכיב זה שמיועד לזרמים גבוהים (100A ויותר). רכיב זה הוא SCR על ידי מתן דופק שלילי ברגל השער שלו ניתן להביאו למצב כיבוי (מה שאסור עבור SCR-ים רגילים לפי הוראות היצרן). חסרונו הגדול הוא זקוק לעוצמת זרם גבוה ברגל השער שלו כדי שהוא יכבה $I_g = \frac{I_n}{6}$ כאשר I_n הוא הזרם הנומינאלי הזורם במעגל הספק. ובכך מצריך מעגל בקרה מיוחד לצורך הכיבוי.

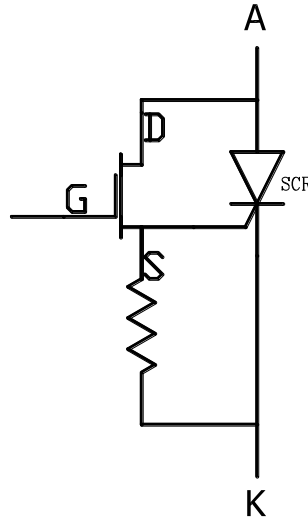
סימולו:



3.6.3- תריסטור MCT (Mos Controlled Thyristor)

רכיב זה דומה ל-GTO ובתוספת של Power Mosfet ברכיב זה מספקים מתח קבוע לרגל השער של הטרנזיסטור כדי לגרום לכיבוי הרכיב.

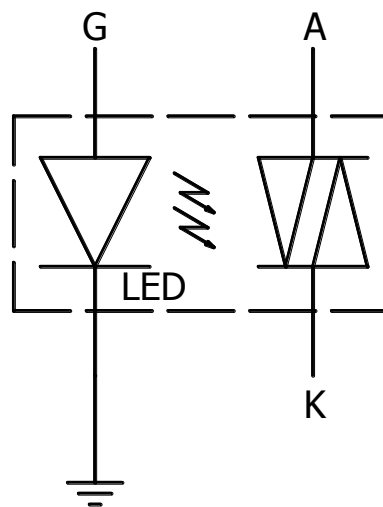
רכיב זה מתואר באיור הבא:



3.6.4- LASCR (Light Activated SCR)

רכיב זה הוא SCR שבצומת G-K שלו מותקן תא סולרי הרגיש והמוצת ע"י אור. רכיב זה מיוצר לזרמים של עשרות אמפרים.

רכיב זה מתואר באיור הבא:



פרק 4-בקרת הספק לזרם ישר

4.0.0- מבוא

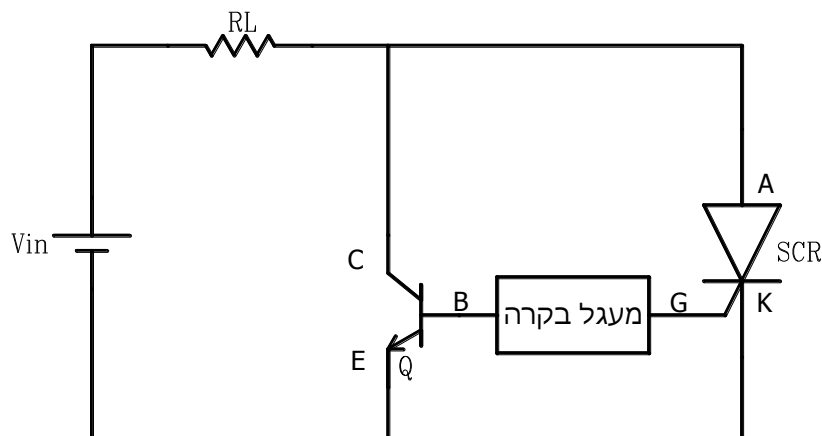
גם בזרם ישר דרושה פעולה של בקרת הספק ללא איבודי הספק. הצרכנים העיקריים שדורשים בקרת הספק מסוג זה הם המנועים לזרם ישר, כיוון שבקרת ההספק שלהם משנה את מהירותם. כאשר נחבר מנוע לזרם ישר למקור מתח באופן קבוע המנוע יסתובב במהירות הנומינאלית שלו, ואם נחבר את המנוע למקור מתח ישר לסירוגין ז"א בתדירות קבועה מסוימת האנרגיה שתופיע על המנוע תהיה נמוכה יותר והמשמעות היא שהמנוע יסתובב במהירות נמוכה יותר מהמהירות הנומינאלית שלו. יש לזכור שההספק שמתפתח על המנוע במצב זה יחושב לפי הערך ה-DC שלו ז"א הערך הממוצע של הגל המופיע על פני המנוע.

4.1.0- בקרת הספק באמצעות SCR

אחת הבעיות שקימות בבקרה בזרם ישר היא שניתן להצית את ה-SCR בקלות (כמו ב-AC) אך הכיבוי הוא איננו טבעי, מאחר שמתח DC אינו מגיע לקו האפס כמו ב-AC (שזו שיטת הכיבוי הטבעי של ה-SCR). ולכן יש לדאוג לכיבוי מאולץ ל-SCR.

כל מעגל לבקרת הספק בזרם ישר באמצעות תריסטורים חייב להכיל רכיב נוסף שתפקידו לבצע כיבוי מאולץ לתריסטור.

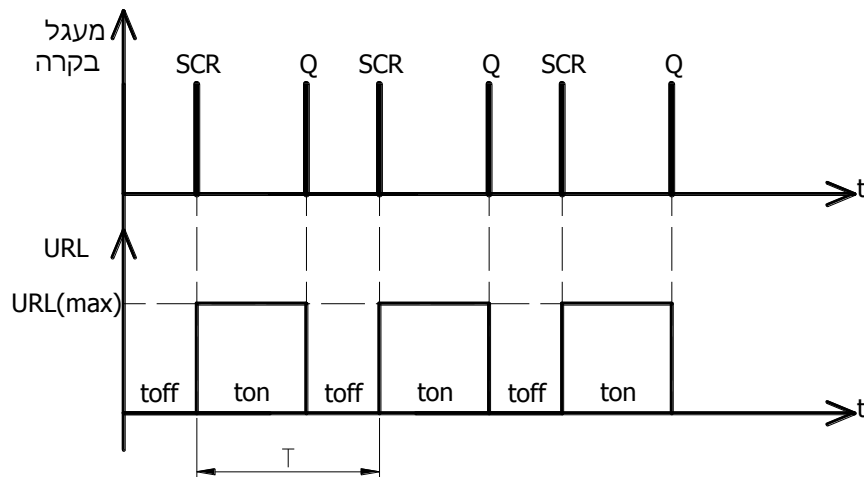
דוגמא למעגל לבקרת הספק הזרם ישר כמתואר באיור הבא:



הסבר למעגל:

מעגל הבקרה זהו מעגל אשר מייצר פולסים צרים מאוד בתדירות קבועה. אופן שליחת הפולסים היא: קודם נשלח פולס לרגל ה-G (שער) של ה-SCR ולאחר זמן כלשהוא נשלח פולס לרגל ה-B (בסיס) של הטרנזיסטור Q. בקרת ההספק מתבצעת ע"י שינויי מרווחי הזמן בין הפולסים השונים. כאשר נשלח פולס ראשון ל-SCR הרכיב מוצת ולכן נגד העומס מקבל את מתח המקור V_{in} . במצב זה ה-SCR נשאר מוצת עד אשר נשלח פולס שני לטרנזיסטור. במצב זה ישנו זמן קצר מאוד בו הטרנזיסטור מקצר את ה-SCR וגורם לכך שהזרם דרך ה-SCR יהיה קטן מזרם ההחזקה שלו I_H ובכך הוא גורם לכיבוי ה-SCR. הרכיב שמבצע את הכיבוי המאולץ במעגל זה הוא הטרנזיסטור.

צורות גלים:



חישובים על נגד העומס:

על פני נגד העומס מופיע גל DC מבוקר (גל ריבועי) שנע בגבולות-

$$URL(max)V \Rightarrow 0V$$

לכן ניתן לחשב עבור גל זה גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל:

א. ערך ממוצע-

$$U(av) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

$$URL(av) = \frac{1}{T} \left[\int_0^{ton} URL(max) dt + \int_{ton}^T 0 dt \right]$$

$$URL(av) = \frac{1}{T} [URL(max) * ton - URL(max) * 0]$$

$$URL(av) = \frac{ton}{T} * URL(max)$$

$$URL(av) = D.C * URL(max)$$

ב. ערך יעיל-

$$U(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}$$

$$URL(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{ton} URL(max)^2 dt + \int_{ton}^T 0^2 dt \right]}$$

$$URL(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} [URL(max)^2 * ton - URL(max)^2 * 0]}$$

$$URL(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} * URL(rms)^2 * ton}$$

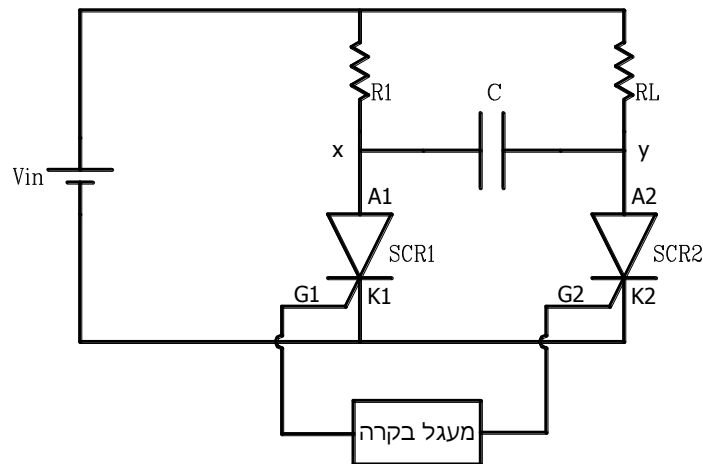
$$URL(rms) = \sqrt{\frac{ton}{T} * URL(max)^2}$$

$$URL(rms) = \sqrt{D.C * URL(max)^2}$$

$$URL(rms) = \sqrt{D.C} * URL(max)$$

4.2.0- בקרת הספק באמצעות SCR-ים וקבל קומוטציה

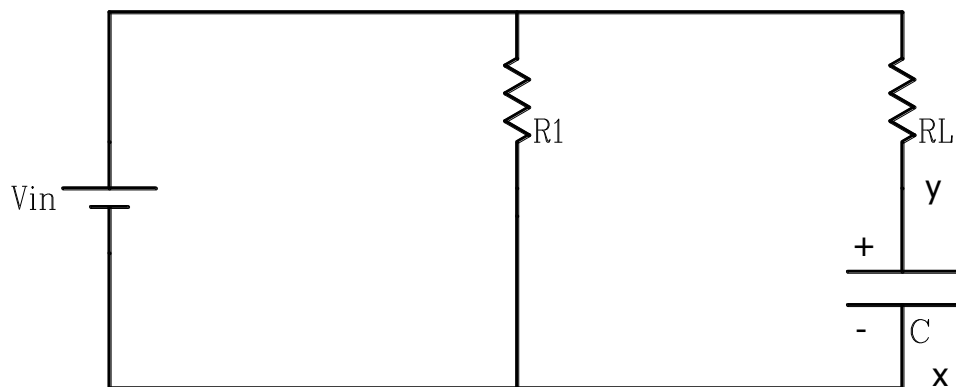
נתון המעגל המתואר באיור הבא:



הסבר למעגל:

מעגל הבקרה מייצר פולסים בתדירות קבועה בצורה כזו שקודם נשלח פולס ל-G1 ולאחר מכן נשלח פולס ל-G2. בקרת ההספק במעגל מתבצעת ע"י שינויי מרווח הזמן בין הפולסים הנשלחים לתריסטורים.

א. כאשר נשלח פולס ל-G1 במצב זה SCR1 מוצת ולכן ניתן לראות את המעגל באופן הבא:

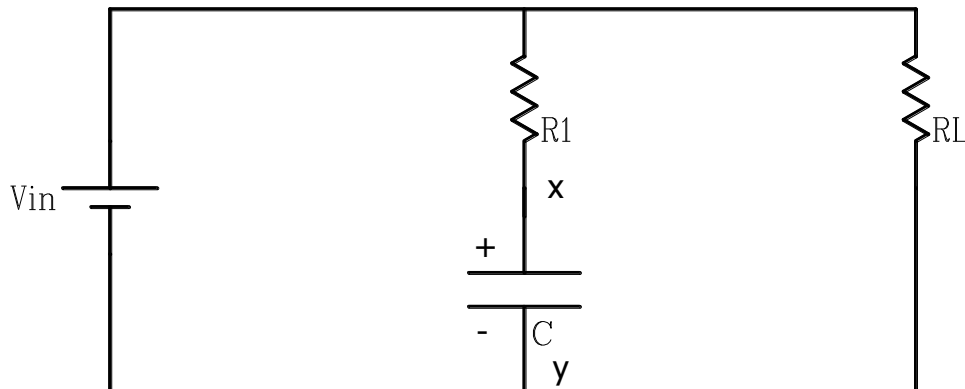


במצב זה הקבל נטען כמעט מיידית למתח המקור V_{in} ולכן:

1. המתח על פני נגד העומס $U_{RL}=0V$.
2. המתח על פני נגד $U_{R1}=V_{in}$.

הקבל הוא בעל ערך קטן מאוד וזאת כדי ליצור טעינה מהירה ובכך לגרום ש-URL ירד מידית ל-0V. ואילו ערכו של R1 הוא גדול מאוד כדי למנוע בזבזי הספק גדולים.
הקבל C נטען למתח המקור בקוטביות חיובית כלפי הנקודה y.

ב. כאשר נשלח פולס ל-G2 במצב זה ישנו רגע קצר מאוד שבו 2 ה-SCR-ים מוצתים. אך כתוצאה מכך שעם הצתת SCR2 נוצר לקבל מסלול פריקה דרך שני ה-SCR-ים וכתוצאה משינוי כיוון הזרם דרך SCR1 הוא נכבה ונשאר המעגל המתואר באיור הבא:

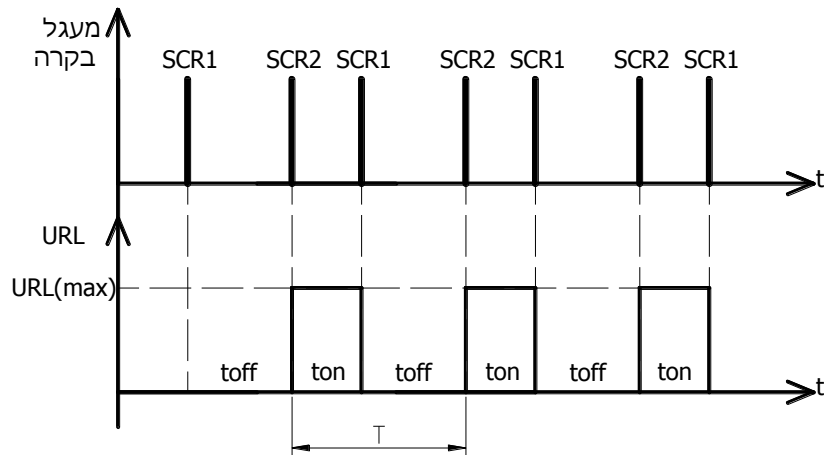


במצב זה:

1. המתח על פני נגד העומס R_L שווה מידית למתח המקור - $URL = V_{in}$
2. הקבל נטען בצורה איטית יותר למתח המקור (כיוון שנגד R_1 גדול) ובסיום הטעינה שלו המתח על R_1 ירד ל-0V.
גם כאן הקבל נטען אך בקוטביות חיובית כלפי נקודה x.

כאשר יגיע שוב פולס ל-G1 שוב 2 ה-SCR-ים יעבדו לפרק זמן קצר מאוד הקבל שיתפרק דרכם ישנה את כיוון הזרם דרך SCR2 ובכך יכבה אותו.
הקבל שמחובר במעגל נקרא בשם "קבל קומוטציה" ותפקידו לבצע כיבוי מאולץ ל-SCR-ים.

צורות גלים:



חישובים על נגד העומס:

על פני נגד העומס מופיע גל DC מבוקר (גל ריבועי) שנע בגבולות-

$$URL(max)V \Rightarrow 0V$$

לכן ניתן לחשב עבור גל זה גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל בהתאם לפיתוח הנוסחאות המובא בתת הפרק הקודם:

א. ערך ממוצע-

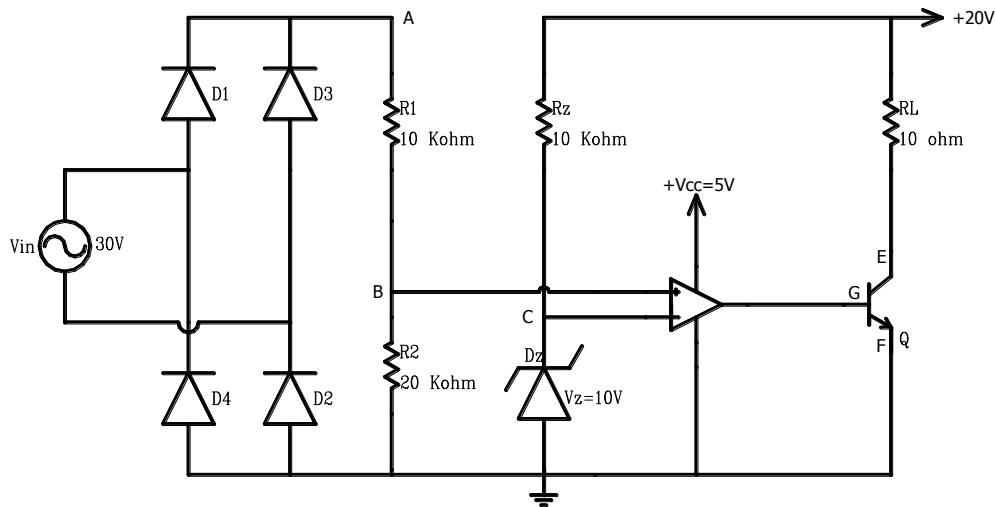
$$URL(av) = D.C * URL(max)$$

ב. ערך יעיל-

$$URL(rms) = \sqrt{D.C} * URL(max)$$

4.3.0-מעגל לבקרת הספק בזרם ישר מבוסס מגבר שרת וטרנזיסטור

נתון המעגל המתואר באיור הבא:

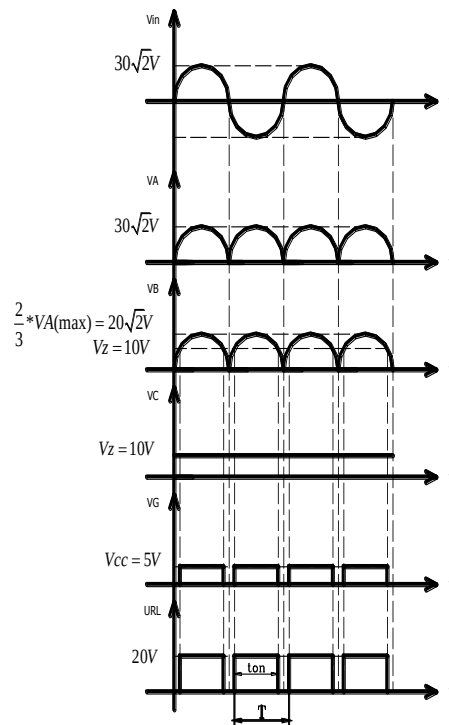


הסבר למעגל:

מעגל זה מורכב ממספר חלקים:

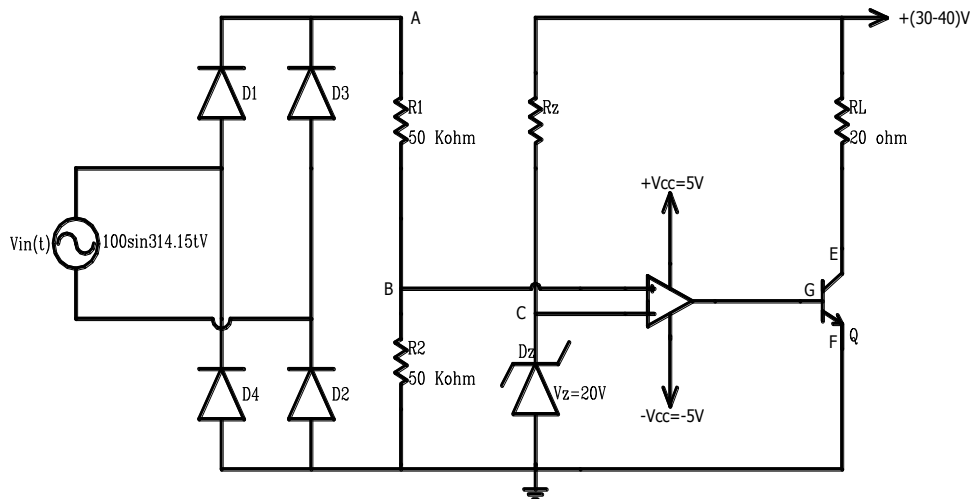
- מיישר דו דרכי חד מופעי- במוצא המיישר מתקבל גל פועם (בנקודה A ביחס לאדמה)
- דיודת זנר (D_z)- דיודת זו משמשת לייצוב המתח, כלומר המתח על פניה יהיה קבוע (בדוגמא זו $10V$).
- מגבר שרת- במעגל זה מגבר השרת יתפקד כמשוואה ולא כמגבר מכיוון שאין לו משווא. ז"א שהוא ישווה כל הזמן את המתחים בכניסות שלו ובתאם לתוצאת ההשוואה יתקבל אות במוצא שלו:
 כאשר $V(+)>V(-)$ יתקבל במוצא המשוואה $+V_{cc}$ בדוגמא זו $5V$.
 כאשר $V(+)<V(-)$ יתקבל במוצא המשוואה $-V_{cc}$ בדוגמא זו $0V$.
 המשמעות היא שבמוצא מגבר השרת יתקבל גל ריבועי בגבולות $\pm V_{cc}$.
- טרנזיסטור- משמש כאמצעי מיתוג אלקטרוני- יהיה מסוג כזה שכאשר יקבל "1" ברגל הבסיס שלו יכנס לרוויה ואילו עבור "0" ברגל הבסיס שלו יכנס לקטעון.

צורות גלים:



תרגיל דוגמא:

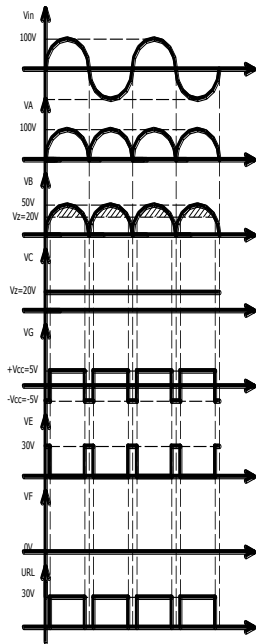
נתונה מערכת לבקרת הספק בז"י כמתואר באיור הבא:



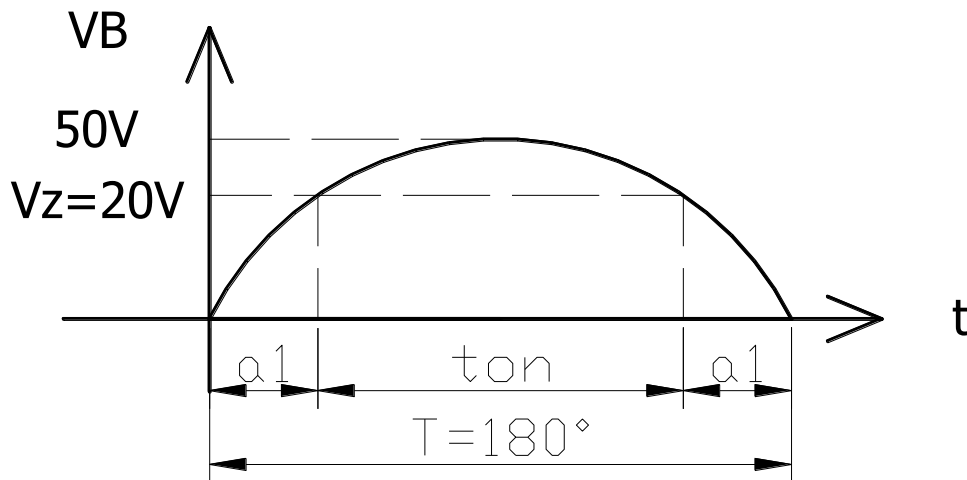
- שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורת הגלים הבאות:
 $V_{in}(t)$, V_A , V_B , V_C , V_G , V_E , V_F , URL .
- חשב את הזרם הממוצע דרך נגד העומס.
- חשב את ההספק המתפתח בעומס.
- סעיפים א-ג התייחסו למתח DC של $30V$ במעגל. משנים מתח זה ל- $40V$ כיצד שינויי זה ישפיע על יחס המחזור של הגל בנגד העומס, וכן על ההספק שיתפח עליו (אין צורך בחישובים).

פתרון לתרגיל דוגמא:

א. שרטוט גלים:



ב. חישוב זרם ממוצע בנגד העומס אך קודם חישוב יחס המחזור D.C:



$$U(\alpha) = U(max) * \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{U(\alpha)}{U(max)}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{U(\alpha)}{U(max)} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{20}{50} \right) = 23.5^\circ$$

$$D.C = \frac{ton}{T} = \frac{180 - 2 * \alpha1}{180} = \frac{180 - 2 * 23.5}{180} = 0.738$$

$$URL(av) = D.C * URL(max) = 0.738 * 30 = 22.14V$$

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL} = \frac{22.14}{20} = 1.107A$$

ג. חישוב הספק המתפתח בנגד העומס:

$$URL(rms) = \sqrt{D.C} * URL(max) = \sqrt{0.738} * 30 = 25.77V$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{25.77^2}{20} = 33.21W$$

ד. אין השפעה על ה- $D.C$ מכיוון ש- V_z ללא שינוי והוא עדין $20V$, אך ההספק על נגד העומס יגדל באותו יחס.

(עבודת בית מס' 4 בגמר לימוד פרק זה)

פרק 5- ממירים (Inverters) DC to AC

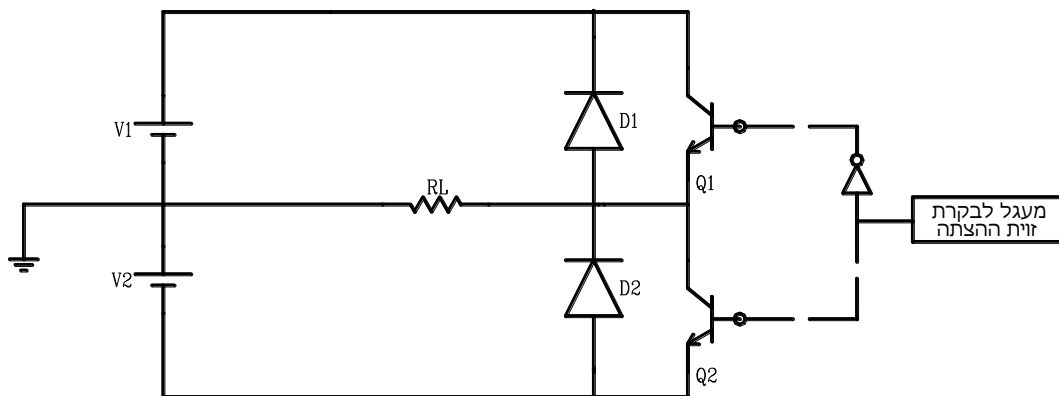
5.0.0- מבוא

לעיתים נדרשת פעולת המרת מתח ממקור מתח DC למקור מתח AC קיימים 3 סוגים של מעגלים בסיסים היכולים לבצע פעולה זו. מעגלים אלה עונים לשם "מהפכים" והם שימושיים בעיקר בבקרת מהירות למנועים לזרם ישר:

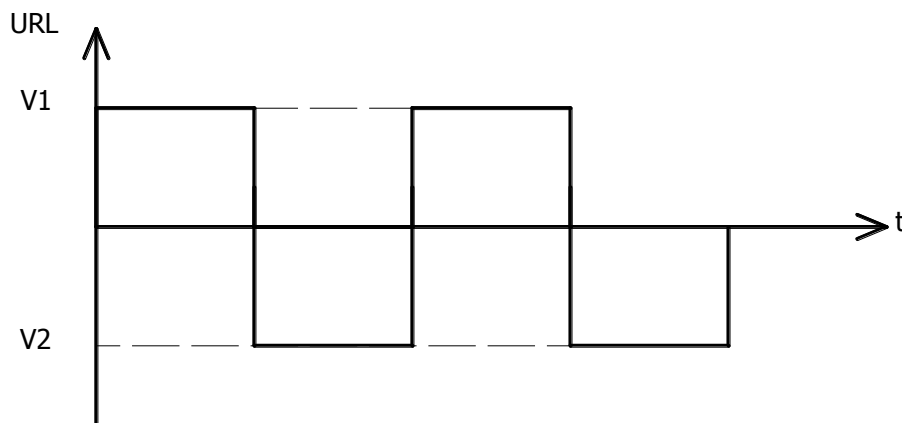
- מהפך חצי גשר Half Bridge.
- מהפך גשר שלם Full Bridge – גשר H.
- מהפך דח-סוף Push-Pull.

5.1.0- מהפך חצי גשר (Half Bridge)

מהפך זה מכיל 2 מתגים אלקטרוניים (טרנזיסטורים) אשר מחוברים למעגל בקרה כך ששניהם יפעלו תמיד לסירוגין. מעגל זה מתואר באיור הבא:



צורת גלים:



הסבר לפעולת המעגל:

כאשר טרנזיסטור Q1 במצב on טרנזיסטור Q2 במצב off ולכן המתח שיופיע על פני נגד העומס הוא מתח מקור V1.

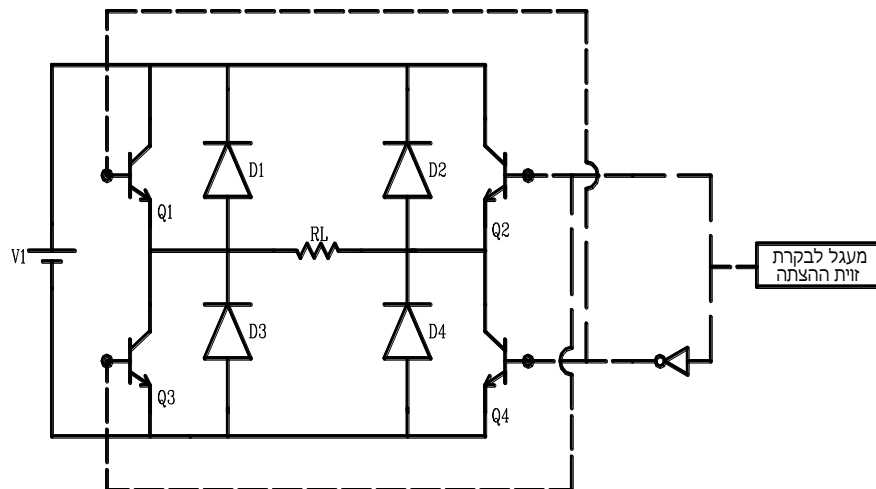
כאשר הטרנזיסטורים מתחלפים על נגד העומס יש מתח בקוטביות הפוכה השווה למתח המקור V2.

באופן מעשי משתמשים בטרנזיסטורים ממשפחת ה-Fet ים שלהם ביצועים טובים יותר מאשר הטרנזיסטורים ה-bi פולאריים.

כאשר מחובר עומס השראתי חייבים להיעזר בדיודות הגנה הנקראות "דיודות איפוס" שתפקידן לאפשר מסלול פריקה לאנרגיה שנאגרה בסליל בזמן ניתוק. צורת הגל שהתקבלה על פני נגד העומס היא גל AC ריבועי ובאמצעות מעגל הבקרה ניתן לשנות את יחס המזור של הגל (D.C.) ובכך את מהירות המנוע. החיסרון הבולט של מעגל זה הוא הצורך בשימוש ב-2 מקורות מתח.

5.2.0-מהפך גשר שלם (Full Bridge)-גשר H

באמצעות מעגל זה ניתן להגיע לאותם ביצועים כמו מהפך חצי גשר אך הוא מכיל 4 טרנזיסטורים אבל עם מקור מתח אחד. מעגל זה מתואר באיור הבא:



הסבר לפעולת המעגל:

מעגל זה נקרא גם בשם גשר H והוא שימושי בעיקר בבקורות של מנועים לזרם ישר.

מבואות הטרנזיסטורים מחוברים למעגל הבקרה בצורה כזו ש-Q1+Q4 במצב רוויה Q2+Q3 במצב קטעון ולהיפך.

צורת הגל שמתקבלת בנגד העומס הינה גל AC ריבועי בעל גבולות $\pm V1$. צורת הזרם בעומס תישאר גל ריבועי כאשר מדובר על עומס אומי בכל עומס אחר צורת הזרם תהיה בהתאם לרכיבים.

5.3.1-תגובת שנאי דפקים לאות ריבועי (דפקים)

אם במקום העומס נחבר סליל המתאר את הצד הראשוני של שנאי ובצידו השני של השנאי בסליל המשני מחובר העומס שנאי זה נקרא "שנאי דפקים" גם בשנאי זה מיקום הנקודות מסמן את כיוון ליפוף הסלילים וקובע את צורת המופע וכן יחס ההשנאה של השנאי קובע את יחס המתחים. באמצעות שנאי דפקים המחובר במוצא המהפך משתמשים בעיקר הממירים לדוגמא: ממיר 12Vdc ל- 230Vac.

5.3.0-מהפך דח-ספ (Push Pull)

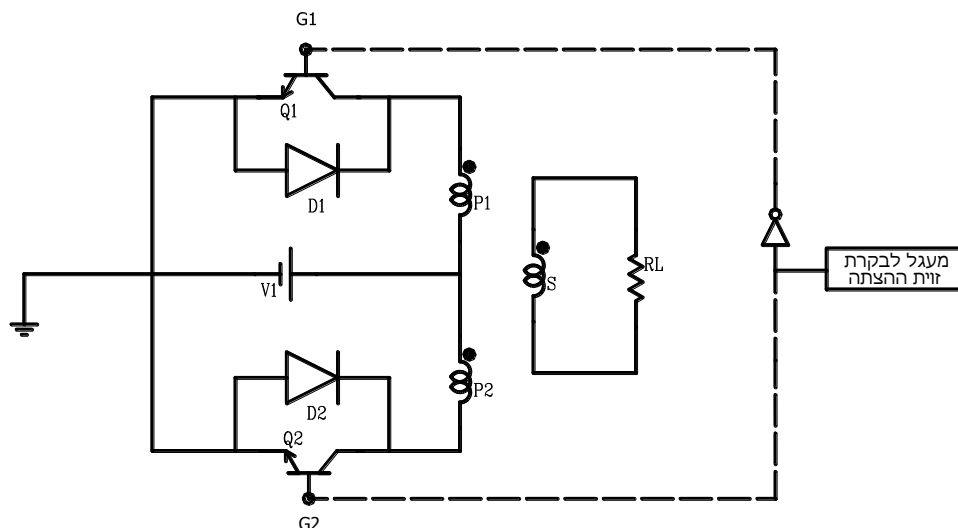
מהפך זה מכיל שנאי בעל סנף אמצעי, 2 טרנזיסטורים ומעגל בקרה. מעגל זה יכול להיות בעל 2 תפקידים:

- ממיר DC to AC - בממיר זה לאחר האפנון מגיעים לאות AC טוב יותר (קרוב יותר לאות סינוס) מאשר בממירים הקודמים.
- ממיר DC to DC - השימוש בממיר זה לצורך שינוי המתח פי יחס ההשנאה.

הערה עבור כל סוגי המהפכים: כאמור באופן מעשי משתמשים בטרנזיסטורים מסוג Fet-ים אבל ניתן להשתמש גם ב-SCR-ים אבל חייבת להיות תוספת של קבל קומוטציה לצורך כיבוי מאולץ של ה-SCR-ים.

5.3.1-ממיר DC to AC

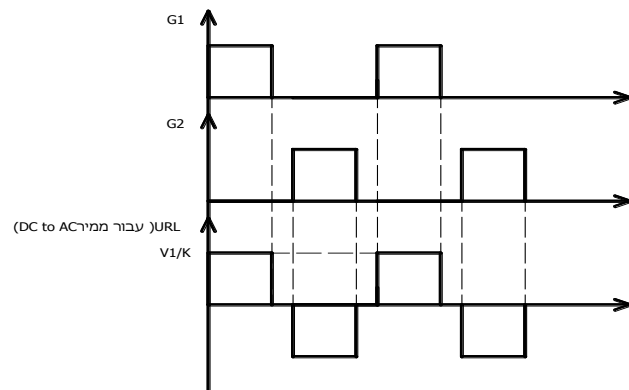
מהפך זה מתואר באיור הבא:



תאור פעולת המעגל:

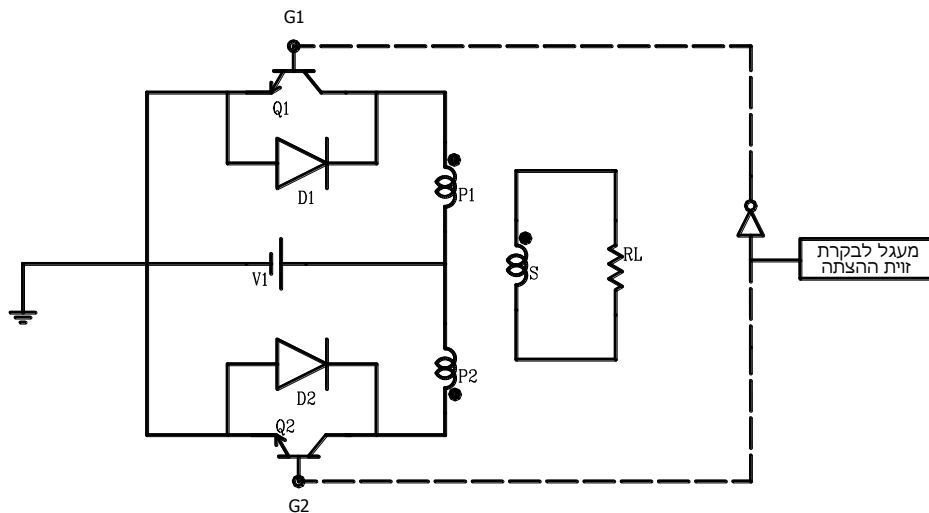
במצב זה כאשר Q1 on - ב-Q2 off ולהיפך וכך על נגד העומס מופיע אות AC ריבועי כמתואר בצורת הגלים הבאה.

צורות גלים:



5.3.2- ממיר DC to DC

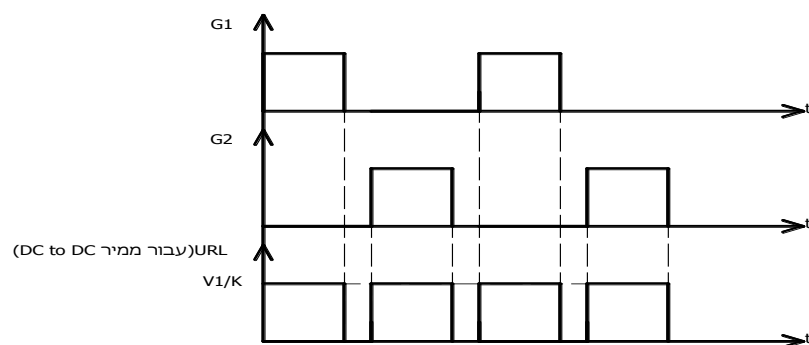
מהפך זה מתואר באיור הבא:



תאור פעולת המעגל:

במצב זה כאשר Q1 on - ב Q2 off ולהיפך כתוצאה משינוי אחת הנקודות בסליל הראשוני בשנאי על נגד העומס מופיע אות DC ריבועי כמתואר בצורת הגלים הבאה.

צורות גלים:



5.4.0- הפיכת גל AC ריבועי לגל סינוס מקורב (באמצעות מדרגות)

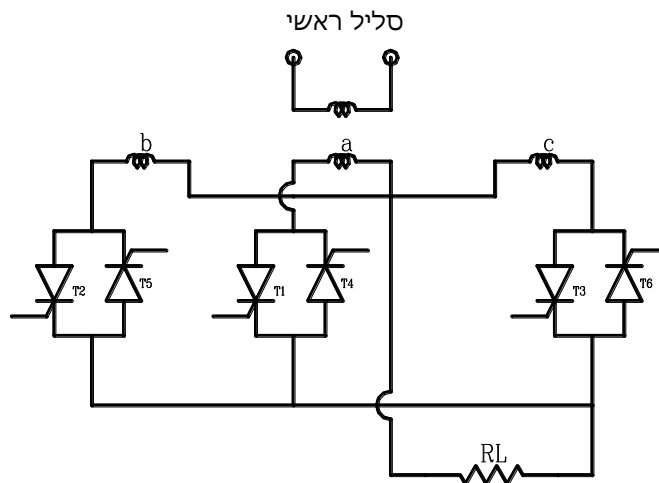
במוצא המהפך מופיע גל AC ריבועי. לעיתים קיים צורך להופכו לגל סינוס.

קיימות 2 שיטות עיקריות להפיכת אות ריבועי לאות סינוס:

א. ע"י שימוש במסננים- באמצעות מסננים נדאג להשאיר רק את ההרמוניה הבסיסית שהיא בעצם אות סינוס ואילו את יתר ההרמוניות נסנן. שיטה זו אינה מומלצת כיוון שהיא כרוכה בבזבז הספק רב על ההרמוניות שלא מנוצלות.

ב. באמצעות מערך מיתוג אלקטרוני המכיל שנאי בעל סליל ראשי אחד ו-3 סלילים משניים.

מעגל זה מחובר במוצא המהפך והוא מתואר באיור הבא:



הסבר לפעולת המעגל:

התריסטורים T1, T2, T3 מאפשרים לפעולה רק עבור אות כניסה חיובי ואילו

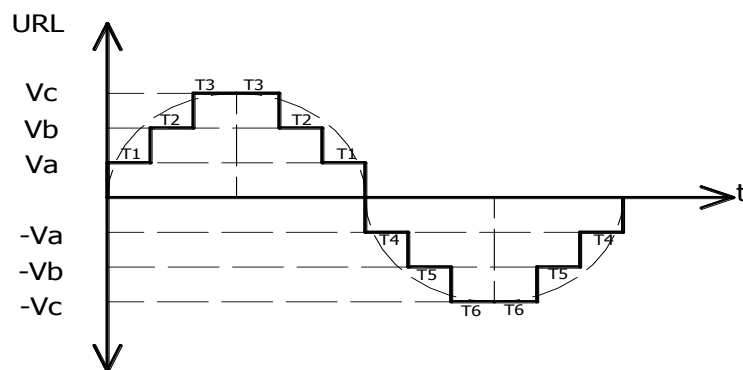
התריסטורים T4, T5, T6 מאפשרים לפעולה רק עבור אות כניסה שלילי.

תמיד יש תריסטור אחד הנמצא בהולכה וכל היתר בקטעון ועל כך אחראית

מערכת הבקרה (כל 1/12 מחזור מתחלף תריסטור).

חשוב לציין שרמת המתחים שנקבעת במוצא השנאי היא: $V_a < V_b < V_c$.

במוצא המערכת מתקבל גל סינוס מדורג המתואר באיור הבא:

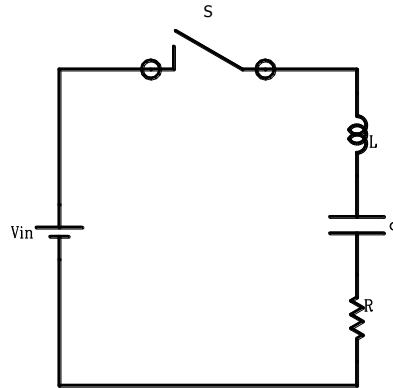


הערה: ככל שנוסיף יותר סלילים בשניוני נקבל גל סינוס טוב יותר.

5.5.0- ממיר מהדהד טורי DC to AC

5.5.1- מבוא

חיבור קבל בטור עם סליל למקור מתח ישר היא מערכת עם פיגור מסדר שני. מערכת זו מבחינת המודל הכללי שלה נראת באיור הבא:

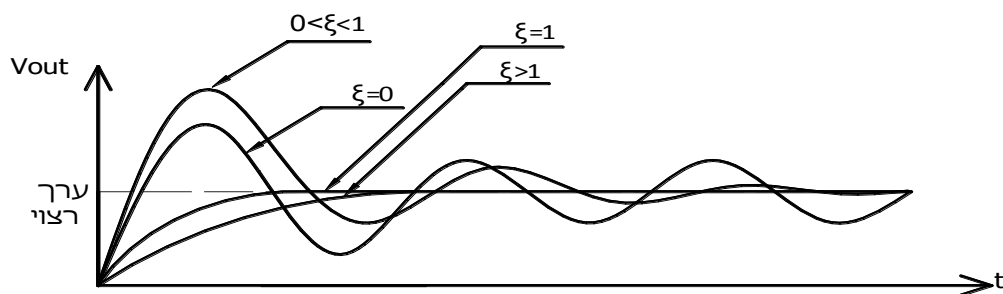


בכל מערכת מסדר שני תיתכן יציבות בדרגות שונות אשר נקבעות לפי אותו מקדם הריסון ξ (קסיי).

קיימות 4 דרגות ריסון:

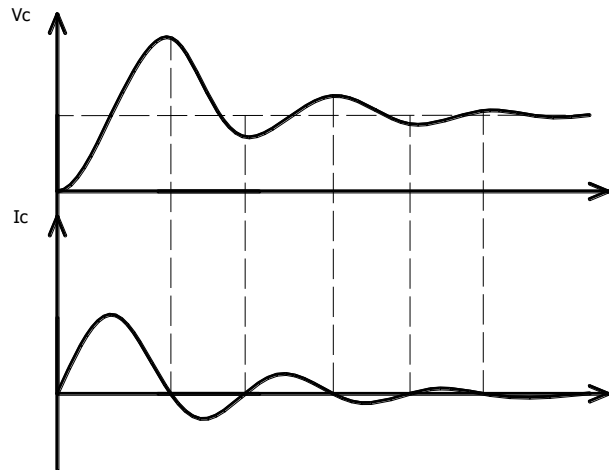
- א. ריסון קריטי ($\xi=1$) - זהו מצב שבו הרשת מגיעה לערכה הרצוי ללא תנודות, מערכת זו יציבה.
- ב. ריסון יתר ($\xi>1$) - זהו מצב שבו המערכת מגיעה לערכה הרצוי ללא תנודות אך בצורה איטית יותר, מערכת זו יציבה.
- ג. מערכת על סף היציבות ($\xi=0$) - זהו מצב תאורתי בלבד אשר מבטא מעגל ללא הפסדים ובמצב זה למערכת תנודות בעלות אמפליטודה קבועה שאינן מתרסנות, מערכת זו יציבה.
- ד. תת ריסון ($0<\xi<1$) - זהו מצב שבו למערכת יש תנודות שהן תנודות מתרסנות.

4 דרגות הריסון מתוארות באיור הבא:

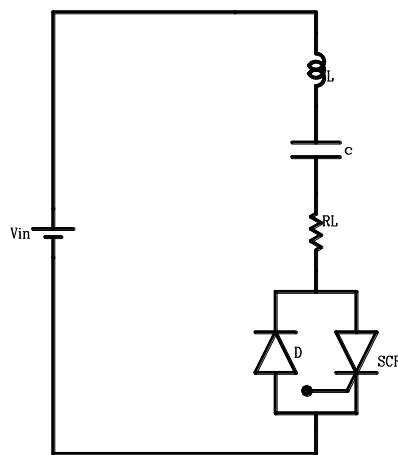


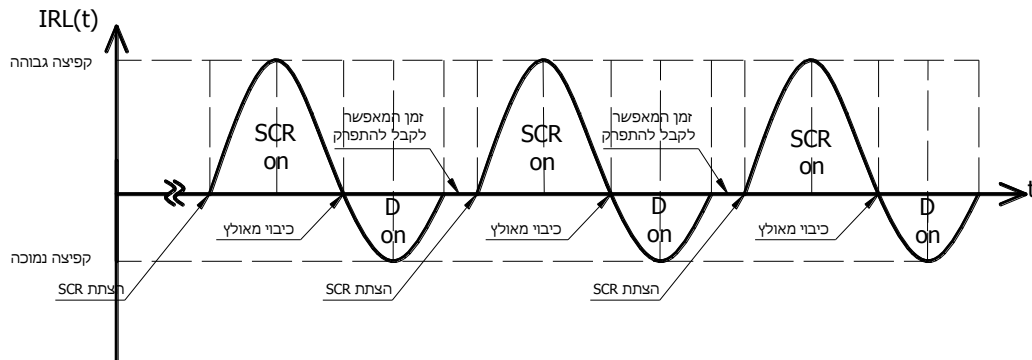
5.5.2- ממיר מהדהד טורי

בבניית ממיר מהדהד טורי על המערכת להיות מסדר שני בעלת תת ריסון (תנודות מתרסנות). לכן צורת המתח שתופיע על הקבל תהיה בעלת תנודות מתרסנות. אך ידוע שבקבל הזרם מקדים את המתח ב- 90° . לכן צורת אות הזרם בקבל ביחס לאות המתח בקבל כמתואר באיור הבא:



הממיר המהדהד הטורי בנוי על עקרון של תהודה טורית במערכת מסדר שני והוא כמתואר באיור הבא:





הסבר פעולת המעגל:

עם קבלת פולס ממערכת הבקרה ברגל השער של ה- SCR קיימת קפיצת של מתח בקבל ובשל התהודה הטורית נוצר אות סינוס של מתח. ה- SCR כבה במעגל זה באופן מאולץ בשל התהודה הטורית כאשר הזרם דרכו יורד ל-0. הדיודה לעומת זאת היא זו שמאפשרת את החצי מחזור השלילי. ה- SCR מוצת בסיום המחזור הראשון לאחר השהיה קטנה מאוד. השהיה זו נועדה לאפשר לקבל לפרוק את האנרגיה שאגר בתוכו. ניתן לומר שאות הזרם שמופיע על פני נגד העומס RL הינו אות סינוס כמתואר בצורת הגלים לעיל.

(עבודת בית מס' 5 בגמר לימוד פרק זה)

פרק 6-ממיר תדר AC to AC (Cyclo Converter)

6.0.0-מבוא

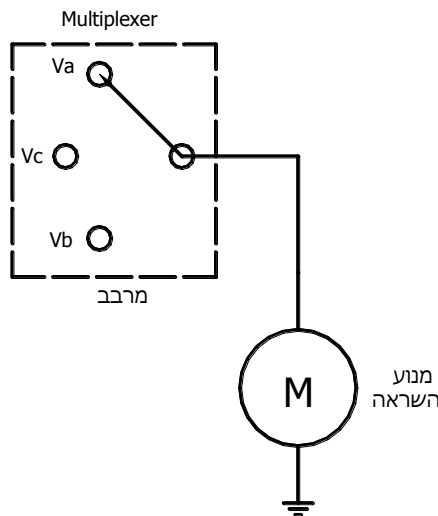
ויסות מהירות של מנוע השראה מתקבל ע"י שינוי תדר הכניסה או שינוי מס'

$$n = \frac{60 * f}{p}$$

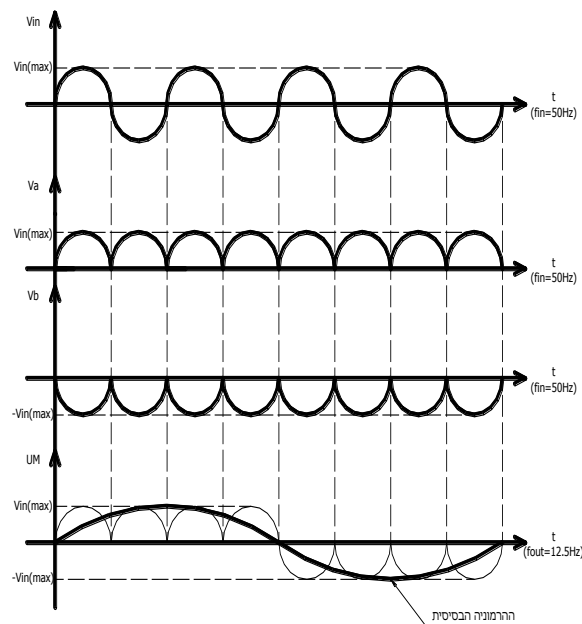
(שלא כמו במנועי DC המהירות יחסית למתח האפקטיבי על המנוע).

ממיר התדר הינו מעגל לבקרת הספק המבוסס על תריסטורים והוא מחובר בין המנוע לרשת.

עקרון פעולת ממיר התדר כמתואר בדוגמא הבאה:



צורות גלים:



הסבר לדוגמא:

העיקרון בנוי על שינוי תדר ההזנה למנוע, כאשר המערכת המבצעת זאת היא המרבה.

למרבה יש 3 מצבים:

- א. כאשר המרבה נמצא במצב $-V_c$ המנוע במצב כבוי.
- ב. כאשר המרבה נמצא במצב $-V_a$ יועבר למנוע גל מיושר בקוטביות החיובית.
- ג. כאשר המרבה נמצא במצב $-V_b$ יועבר למנוע גל מיושר בקוטביות השלילית.

בדוגמא זו תדר הכניסה: $f_{in} = 50Hz$.

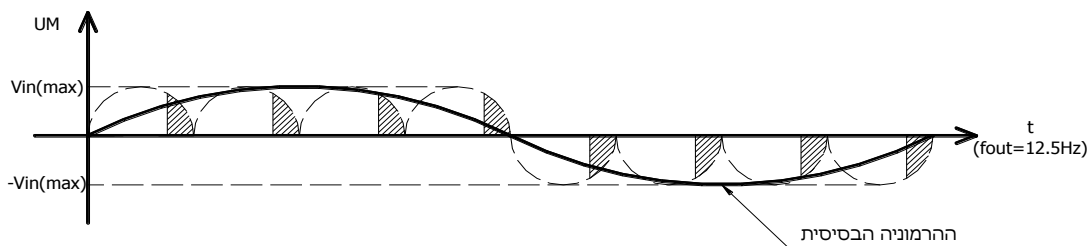
כיוון שהמרבה העביר 4 חצאי גלים בקוטביות החיובית ו-4 חצאי גלים

בקוטביות השלילית לכן: $f_{out} = \frac{f_{in}}{4} = \frac{50}{4} = 12.5Hz$

אומנם מתח המוצא איננו סינוס טהור, אך מאחר ומדובר באות מחזורי הוא מורכב מהרמוניות, כאשר ההרמוניה הבסיסית היא גל הסינוס הוא בעלת התדר שאותו המנוע מרגיש.

כאשר מדובר במנוע השראה, המנוע עצמו משמש כמסנן ליתר ההרמוניות ובקירוב טוב משאיר את ההרמוניה הבסיסית. אך בכל זאת על מנת לקבל גל סינוס טהור יותר נעזרים לצורך היישור ב-SCR-ים ולא בדיודות שלהן יש אפנון בזווית ההצתה כך שצורת המתח המתקבל היא סינוס טהור יותר.

צורת המתח המתקבלת בשימוש ב-SCR-ים מובאת באיור הבא:



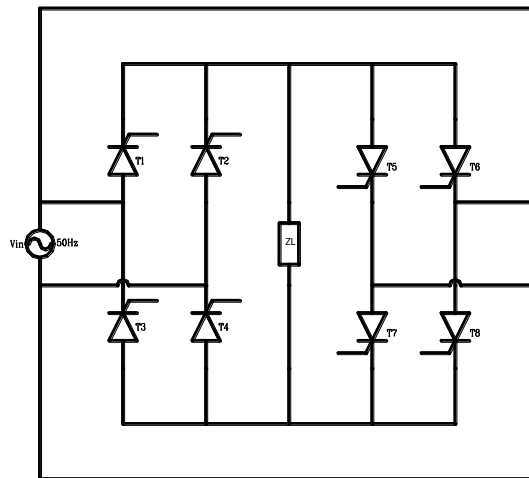
קיימים 2 מימושים של ממיר התדר החד מופעיים:

- א. באמצעות המודל של גשר דיודות.
- ב. באמצעות המודל של שנאי בעל סנף אמצעי.

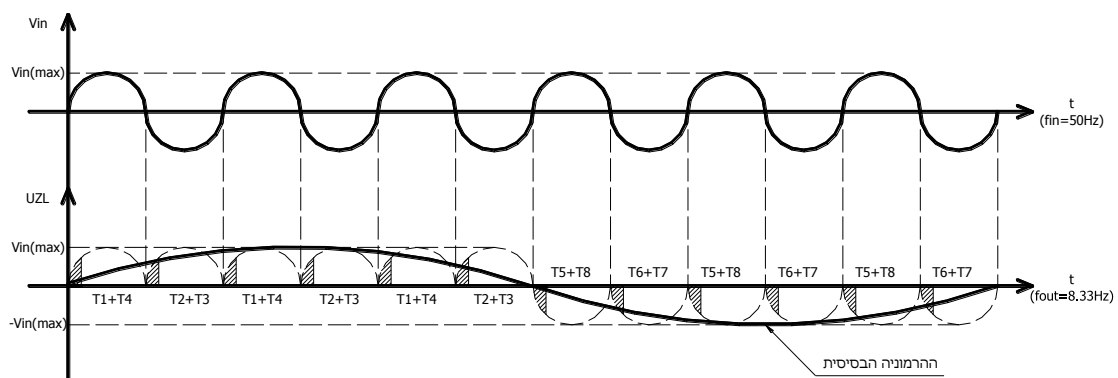
6.1.0- ממיר תדר חד מופעי מוזן מרשת חד מופעי

6.1.1- ממיר תדר באמצעות המודל של גשר דיודות

ממיר זה מבחינה מעשית נראה באיור הבא:



צורת הגלים (עם אפנון זווית ההצתה):



הסבר למעגל:

רגלי הבקרה של ה-SCR-ים מחוברות למעגל בקרה אשר מבצע 2 תפקידים

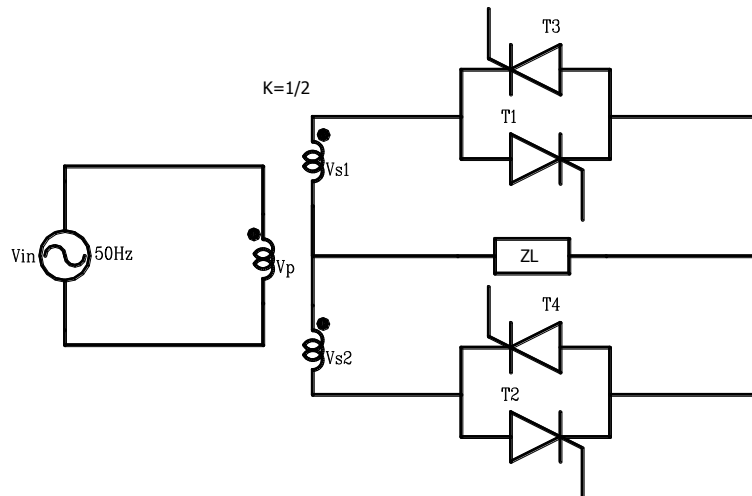
עיקריים:

- מחליט איזה צד של המעגל יפעל.
- מבצע אפנון לזווית ההצתה של הטרסטורים.

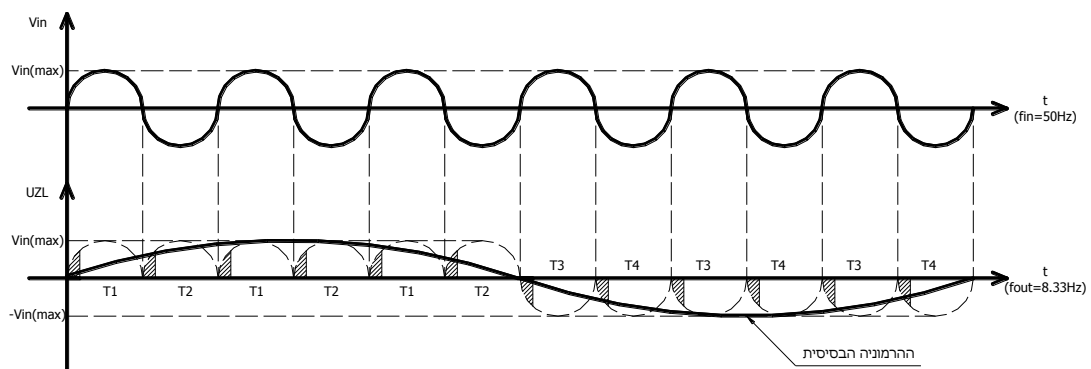
בדוגמא זו תדר הרשת הינו 50Hz ולכן מעגל הבקרה דואג לכך שכל 60msec יפעל צד אחר של המעגל ובתוך הפעולה של צד מסוים במעגל כל 10msec תמיד יד 2 תריסטורים בפעולה.

התדר על העומס הוא: $f_{out} = \frac{f_{in}}{6} = \frac{50}{6} = 8.33\text{Hz}$

6.1.2- ממיר תדר באמצעות המודל של שנאי בעל סנף אמצעי ממיר זה מבחינה מעשית נראה באיור הבא:



צורת הגלים (עם אפנון זווית ההצתה):



הסבר למעגל:

רגלי הבקרה של ה-SCRים מחוברות למעגל בקרה אשר מבצע 2 תפקידים עיקריים:

- מחליט איזה צד של המעגל יפעל.
- מבצע אפנון לזווית ההצתה של התריסטורים.

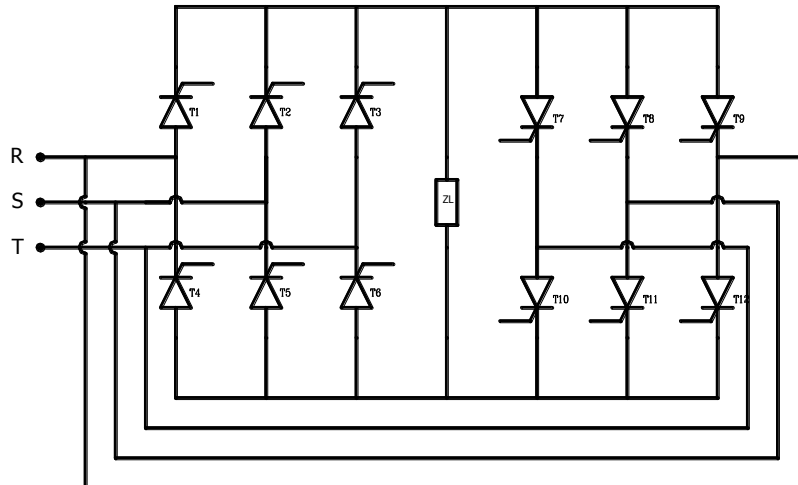
בדוגמא זו תדר הרשת הינו 50Hz ולכן מעגל הבקרה דואג לכך שכל 60msec יפעל צד אחר של המעגל ובתוך הפעולה של צד מסוים במעגל כל 10msec תמיד יד 2 תריסטורים בפעולה.

התדר על העומס הוא: $f_{out} = \frac{f_{in}}{6} = \frac{50}{6} = 8.33\text{Hz}$

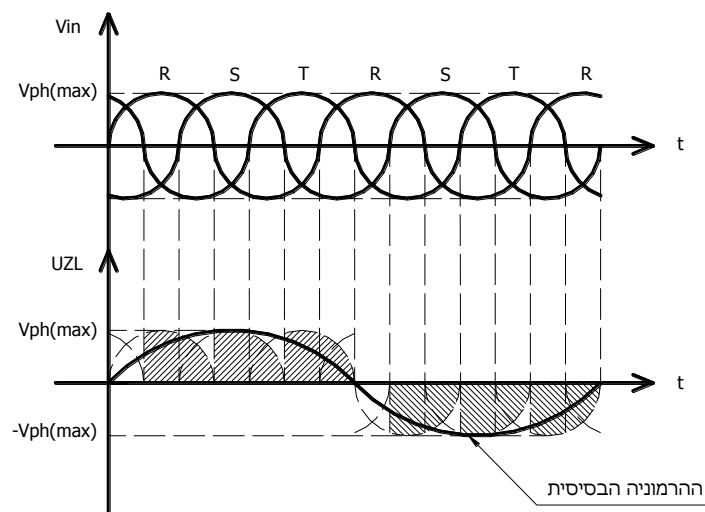
6.2.0- ממיר תדר ברשת תלת מופעית

6.2.1- ממיר תדר חד מופעי הניזון מרשת תלת מופעי

עקרון הפעולה של ממיר זה הוא כמו ממיר התדר ברשת חד מופעית אלא שבמקום 4 תריסטורים בכל מישר קיימים 6 תריסטורים בכל מישר ומקור המתח החד מופעי מחליף מקור מתח תלת מופעי. מעגל זה נראה באיור הבא:

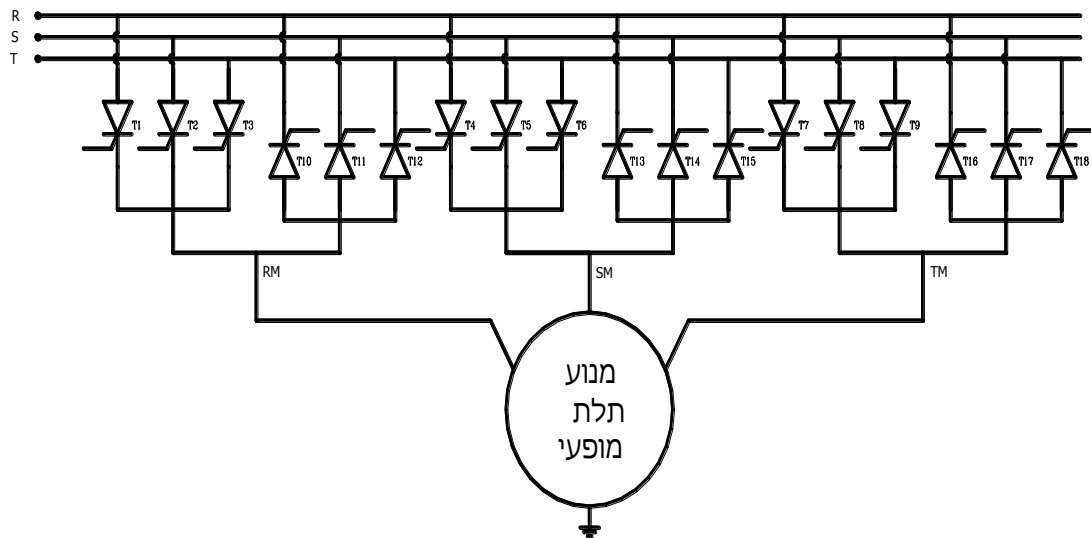


צורת הגלים (עם אפנון זווית ההצתה):

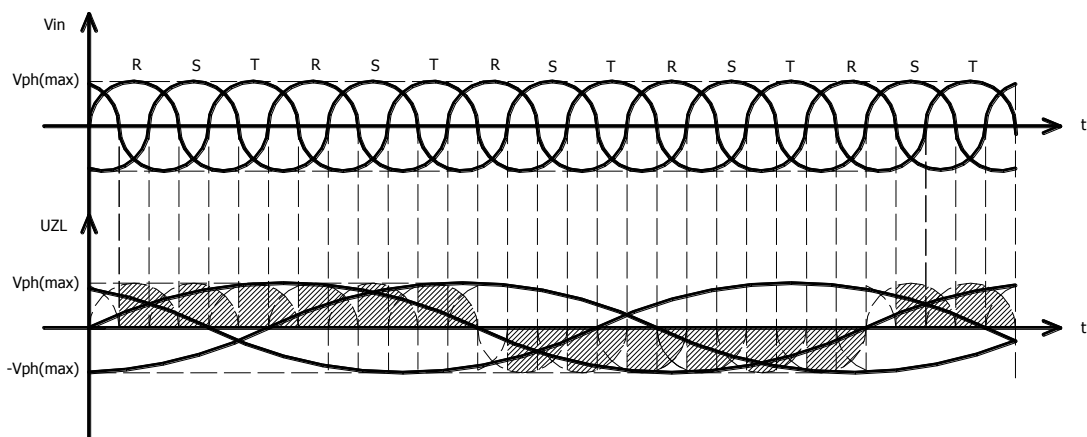


6.2.2- ממיר תדר תלת מופעי הניזון מרשת תלת מופעי

כדי לבנות ממיר תדר תלת מופעי דרושים שלשה ממירים חד מופעיים הניזונים מרשת תלת מופעית. כל ממיר יוצר את המתח עבור פאזה אחת, וכל ממיר פועל בהפרש מופע של 120° ביחס לממיר התדר שלפניו. הפרש המופע הוא ביחס לתדר המופק מהממיר ולא ביחס לתדר הרשת. לבניית ממיר תדר אחד היו צריכים 12 תריסטורים ולכן לבניית ממיר תדר תלת מופעי דרושים 36 תריסטורים. אך ניתן לממש ממיר תדר זה בעזרת 18 תריסטורים בלבד. מעגל זה נראה באיור הבא:



צורת הגלים (עם אפנון זווית ההצתה):



(עבודת בית מס' 6 בגמר לימוד פרק זה)

פרק 7-מיצבים

7.0.0-מבוא

ישנן מערכות שבהן קיים הצורך לשמור על מתח קבוע בצרכן. פעולה זו מתבצעת באמצעות חיבור מעגל הנקרא בשם "מיצב מתח". קיימים 2 סוגים עיקריים של מיצבים:

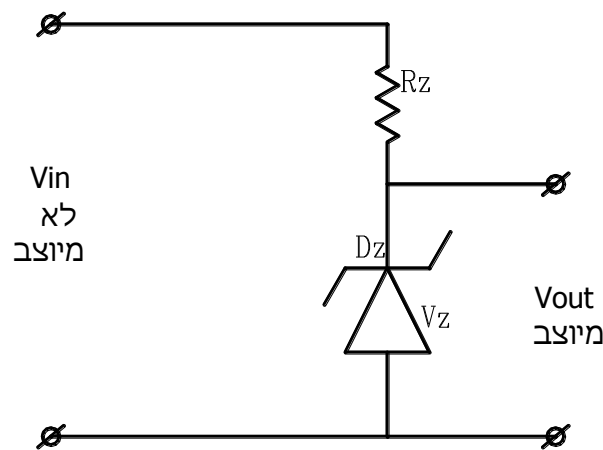
- מיצבים ליניאריים- מיצבים מתחום האלקטרוניקה.
- מיצבים ממותגים- מיצבים מתחום אלקטרוניקת הספק.

7.1.0-מיצבים ליניאריים

קיימים 2 סוגים עיקריים של מיצבים ליניאריים: מקבילי וטורי.

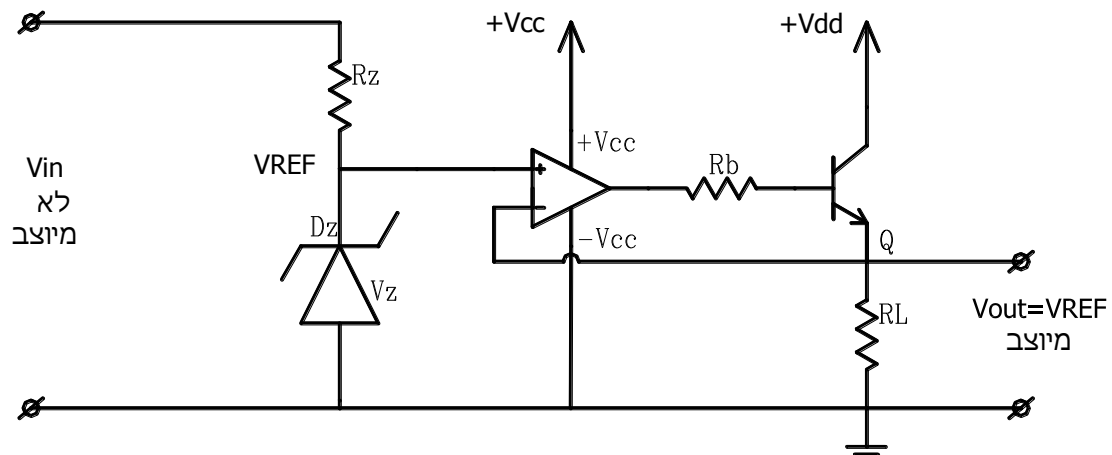
7.1.1-מיצב ליניארי טורי

מיצב זה נחשב למיצב הפשוט והזול ביותר שקיים וזאת משום שהוא מכיל בסה"כ דיודת זנר. למיצב זה חיסרון גדול בכך שאין לו משוב. ז"א כתוצאה מצרכנים גדולים מאוד או קטנים מאוד, הם אלו שישפיעו על מתח דיודת הזנר ויפול עליהם מתח השונה מהמתח V_z . מיצב זה כמתואר באיור הבא:



7.1.2-מיצב ליניארי מקבילי

מיצב זה נחשב למיצב טוב וזאת משום שיש לו משוב לתיקון מתח המוצא. מיצב זה בנוי מטרנזיסטור ומגבר שרת בעל משוב כמתואר באיור הבא:

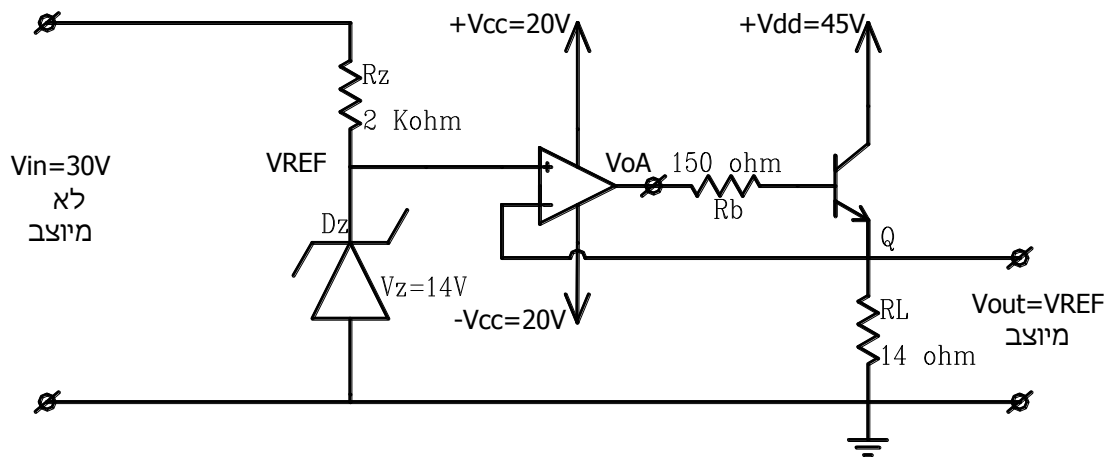


הסבר למעגל:

- מעגל זה מכיל משוב לתיקון מידי של מתח המוצא. המתח שאותו רוצים ליציב הוא המתח V_{out} . במצב תקין כאשר V_{out} מיוצב הוא שווה ל- V_{REF} ולכן מבחינת מגבר השרת $V(+)=V(-)$. במצב זה מגבר השרת מתפקד כמגבר ובמוצא קיים מתח אשר מכניס את הטרנזיסטור Q לנקודת עבודה מסוימת באזורו הפעיל. מצב זה גורם לכך ש- $V_{out}=V_z$.
 א. כאשר קיימת ירידת מתח במוצא (לדוגמא בעת חיבור צרכן גדול)- במצב זה V_{out} קטן, המגבר השרת מתפקד כמשווה כיוון ש- $V(+)>V(-)$, במוצא המשווה יופיע מתח השווה בערכו ל- $+V_{cc}$ (רוויה חיובית). מתח זה מכניס את הטרנזיסטור לרוויה, ז"א שהתנגדותו קטנה מאוד ולכן עוצמת הזרם דרך נגד העומס הולכת וגדלה והמתח על פניו גם הולך וגדל עד אשר המתח על העומס ישתווה למתח הייחוס והמגבר שוב מתפקד כמגבר והטרנזיסטור שוב באזורו הפעיל.
 ב. כאשר קיימת עליית מתח במוצא (לדוגמא בעת ניתוק צרכן גדול)- במצב זה V_{out} גדל, המגבר מתפקד כמשווה כיוון ש- $V(+)<V(-)$ במוצא המשווה יופיע מתח השווה בערכו ל- $-V_{cc}$ (רוויה שלילית). מתח זה מכניס את הטרנזיסטור לקטעון. ז"א שהתנגדותו גדלה מאוד ולכן עוצמת הזרם דרך נגד העומס הולכת וקטנה והמתח על פניו גם הולך וקטן עד אשר המתח על העומס ישתווה למתח הייחוס והמגבר שוב מתפקד כמגבר והטרנזיסטור שוב באזורו הפעיל.
הערה: שינויים במתח הכניסה אינם משפיעים על מתח המוצא בתנאי שמתח הכניסה לא ירד מתחת למתח העבודה של דיודת הזנר V_z .

תרגיל דוגמא:

נתון מיצב ליניארי כמתואר באיור הבא:



חשב:

1. I_z, P_z
2. V_{out} במצב תקין (מיוצב) ו- V_{out} כאשר $V_{in}=20V$.
3. הספק בנגד העומס במצב תקין.
4. הספק המתבזבז בטרנזיסטור במצב תקין.
5. המתח במוצא המגבר V_{oA} במצב תקין כאשר נתון כי ההגבר של הטרנזיסטור הוא $\beta=80$.

פתרון לתרגיל דוגמא:

1.

$$\begin{aligned}U_{Rz} &= V_{in} - V_z = 30 - 14 = 16V \\I_{Rz} &= \frac{U_{Rz}}{R_z} = \frac{16}{2 * 10^3} = 8mA \\P_z &= I_z * V_z = 8 * 10^{-3} * 14 = 112mW\end{aligned}$$

2. גם במצב תקין וגם במצב ש- $V_{in}=20V$:

$$U_{out} = V_z = 14V$$

3.

$$P_{RL} = \frac{U_{RL}^2}{RL} = \frac{V_z^2}{RL} = \frac{14^2}{14} = 14W$$

4.

$$\begin{aligned}P_Q &= V_{ce} * I_c \\V_{ce} &= V_{dd} - U_{RL} = 45 - 14 = 31V \\I_c &= I_{RL} = \frac{U_{RL}}{RL} = \frac{14}{14} = 1A \\P_Q &= 31 * 1 = 31W\end{aligned}$$

5. במצב תקין הטרנזיסטור באזורו הפעיל:

$$\begin{aligned}V_{oA} &= V_{Rb} + V_{be} + U_{RL} \\V_{Rb} &= I_b * R_b \\I_b &= \frac{I_c}{\beta} = \frac{1}{80} = 12.5mA \\V_{Rb} &= 12.5 * 10^{-3} * 150 = 1.875V \\V_{be} &= 0.7V \\V_{oA} &= 1.875 + 0.7 + 14 = 16.575V\end{aligned}$$

7.2.0-מיצבים (ממירים) ממותגים

7.2.1-מבוא

לממירים ממותגים משייכים את קבוצת המיצבים DC to DC כאשר היתרון הבולט של ממירים אלו בכך שהוא אינו מכיל נגדים בכלל ולכן נצילות הממיר גבוהה מאוד. ממיר זה נמצא בשימוש בתחום אלקטרוניקה ההספק. בטבלה הבאה מובא השוואת הממיר הממותג למול הממיר הליניארי:

	פרמטרים	מיצב ממותג	מיצב ליניארי
1.	נצילות	גבוהה מאוד	גבוהה מאוד
2.	ייצוב	מצוין	מצוין
3.	הרמוניות (רעש)	יש (אלמנט מיתוג)	אין
4.	אדווה (גליות) V_{out}	נמוכה מאוד	אין
5.	רמת מתח	$V_{out} > V_{in}$ או $V_{out} < V_{in}$	$V_{out} < V_{in}$

קיימים 4 סוגים עיקריים של ממירים ממותגים:

- ממיר מוריד מתח (Buck (Step Down
- ממיר מעלה מתח (Boost (Step Up
- ממיר מעלה ומוריד מתח Buck-Boost
- ממיר מעלה ומוריד ומשנה קוטביות מתח Flybuck

עקרון פעולת הממיר הממותג:

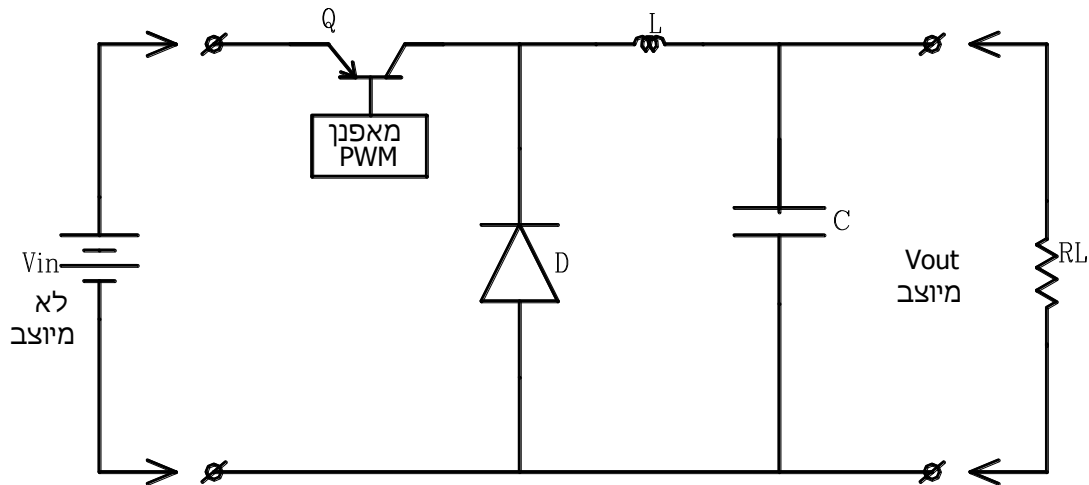
בממיר זה קיימים 2 ערוצים ערוץ ההספק וערוץ הבקרה. כאשר המשוב לתיקון המתח מתבצע באמצעות יחידת PWM (אפנון רוחב הדופק). כאשר ישנו שינוי במתח המוצא יחס המחזור של האות שמגיע מיחידת ה-PWM משתנה עד אשר שוב V_{out} מתייצב לערכו הרצוי.

יחידת ה-PWM (אפנון רוחב הדופק)

באופן כללי יחידת ה-PWM מכילה מגבר שרת המשמש כמשווה כאשר בהדק אחד מופיע ערך המתח הרצוי וההדק השני דוגם את מתח המוצא בפועל. זאת הסיבה שבמוצא ה-PWM מתקבל גל ריבועי מאופן. הערה: באפנון רוחב הדופק (PWM) משתמשים גם להמרת גל AC ריבועי לגל סינוס (מקורב).

7.2.2-ממיר מוריד מתח (Buck Step Down)

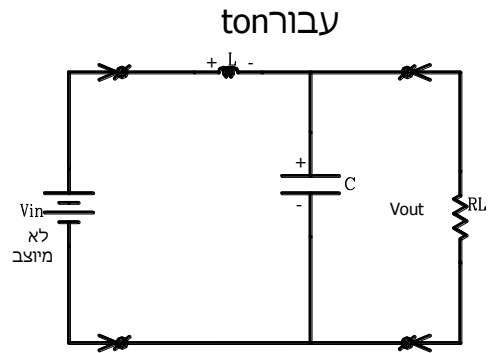
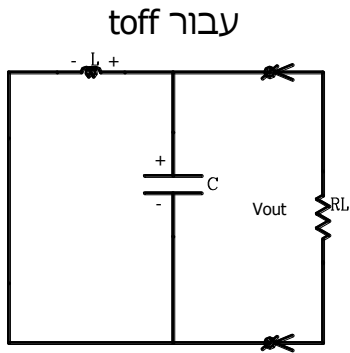
ממיר זה מתואר באיור הבא:



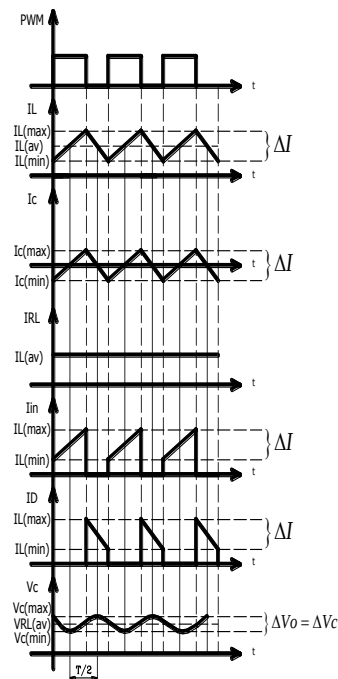
מבחינה מעשית נצילות המערכת אינה 100% אך מוגדרת כגבוהה מאוד.

בממירים ממותגים מבחינה מעשית מבחינים ב- 3 סוגי הפסדים:

1. הפסדי מיתוג- אותם הפסדים שנובעים מהטרנזיסטור (הפסדים אלו רק כאשר הטרנזיסטור נמצא במצב רוויה)
2. הפסדי פיזור- אותם הפסדים שקיימים בדיודה (במצב הולכה $0.7V$).
3. הפסדי נחושת וברזל- הפסדים אלו קיימים בסליל, הפסדי הנחושת מעצם זה שהסליל הינו מוליך ובעל התנגדות אומית, ואילו הפסדי הברזל כתוצאה מפיזור השטף המגנטי בסליל.



	$V_L = L \frac{di}{dt}$	
<u>toff</u>		<u>ton</u>
$V_o = L \frac{\Delta I}{t_{off}}$		$V_{in} - V_o = L \frac{\Delta I}{t_{on}}$
$\Delta I = \frac{V_o * t_{off}}{L}$		$\Delta I = \frac{(V_{in} - V_o) * t_{on}}{L}$
	על פי חוק שימור האנרגיה: אנרגיה הטעינה והפריקה בסליל חיבות להיות שוות.	
	$\Delta I_{on} = \Delta I_{off}$	
	$\frac{V_o * t_{off}}{L} = \frac{(V_{in} - V_o) * t_{on}}{L}$	
	$V_o * t_{off} = V_{in} * t_{on} - V_o * t_{on}$	
	$V_o(t_{off} + t_{on}) = V_{in} * t_{on}$	
	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{t_{on}}{T} = D.C$	
	$D.C = \frac{V_o}{V_{in}}$	



$$\Delta I_L = I_L(max) - I_L(min)$$

$$I_L(max) = I_L(av) + \frac{1}{2} \Delta I$$

$$I_L(min) = I_L(av) - \frac{1}{2} \Delta I$$

$$I_c(max) = \frac{1}{2} \Delta I$$

$$I_c(min) = -\frac{1}{2} \Delta I$$

$$\Delta V_o = \Delta V_c = V_c(max) - V_c(min)$$

$$V_c(max) = U_{RL}(av) + \frac{1}{2} \Delta V_o$$

$$V_c(min) = U_{RL}(av) - \frac{1}{2} \Delta V_o$$

פיתוח נוסחאות:

את גודל המשרן L או את שינוי הזרם ΔI ניתן לחשב גם במצב ton וגם במצב $toff$:

עבור מצב ton נעזר בנוסחה הבאה-

$$V_{in} - V_o = L \frac{\Delta I}{t_{on}}$$

עבור מצב $toff$ נעזר בנוסחה הבאה-

$$V_o = L \frac{\Delta I}{t_{off}}$$

הזרם הממוצע בסליל-

$$I_{L(av)} = I_{RL} = \frac{V_o}{RL}$$

נצילות-

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{I_o^2 * RL}{V_{in} * I_{in(av)}} = \frac{\frac{V_o^2}{RL}}{V_{in} * I_{in(av)}}$$

חישוב גודל הקבל / שינוי המתח ΔV_o (ΔV_c):

$$Q_c = V_c * C = I_c * t$$

$$\Delta V_o = \Delta V_c = \frac{\Delta Q_c}{C}$$

$$\Delta Q_c = \frac{\frac{T}{2} * \frac{\Delta I}{2}}{2} = \frac{\frac{T * \Delta I}{4}}{2} = \frac{T * \Delta I}{8}$$

נבחר למשל ב- t_{off} -

$$\Delta I_L = \frac{V_o * t_{off}}{L}$$

$$\Delta V_o = \frac{\frac{T * \Delta I}{8}}{C} = \frac{\frac{T * V_o * t_{off}}{8}}{C} = \frac{T * \frac{V_o * t_{off}}{8 * C}}{L} = \frac{T * V_o * t_{off}}{8 * L * C}$$

ומכאן אדוות מתח המוצא –

$$\Delta V_o = \frac{T * V_o * t_{off}}{8 * L * C}$$

או

$$\Delta V_o = \frac{(1 - D \cdot C) * V_o}{8 * L * C * f(pwm)^2}$$

הערות:

1. בממיר ממותג מסוג Buck מתח המוצא תמיד יהיה נמוך ממתח הכניסה, וכן תהיה לו גם אדווה קטנה של מתח (זהו אחד החסרונות בממיר ממותג).
2. מגדירים פרמטר בשם R_p שמציין את אדוות המתח במוצא הממיר, ככל שמקדם זה נמוך יותר מדובר בממיר איכותי יותר: $R_p = \frac{\Delta V_c}{V_o}$
3. ניתן לראות בנוסחת חישוב אדוות מתח המוצא שככל שתדר המיתוג f_{pwm} יהיה גדול יותר אדוות מתח המוצא תהיה קטנה יותר.
4. על מנת לחשב את הספק הכניסה P_{in} מומלץ לחשב זאת דרך הנצילות (במידה וניתן). וכן ניתן לחשב גם דרך מכפלת מתח הכניסה בזרם הכניסה הממוצע.

$$P_{in} = V_{in} * I_{in}(av)$$

5. כאשר מתכננים ממיר ממותג יש לבחור בגודל סליל מינימאלי כך שהוא "לא ינוח" אלא שהוא יהיה ברציפות במצב טעינה ופריקה. על מנת לבחור סליל שיבטיח רציפות יש לחשבו לפי הנוסחה הבאה:

$$L(min) = \frac{toff * RL}{2}$$

הוכחה:

במצב -toff

$$V_o = L \frac{\Delta I}{toff}$$

$$IL(min) = IL(av) - \frac{\Delta I}{2}$$

המשמעות ל- $L(min)$ הוא שבסיום -toff

$$IL(min) = 0A$$

ולכן-

$$\frac{\Delta I}{2} = IL(av)$$

$$\Delta I = 2 * \frac{V_o}{RL}$$

$$\frac{V_o * toff}{L(min)} = 2 * \frac{V_o}{RL}$$

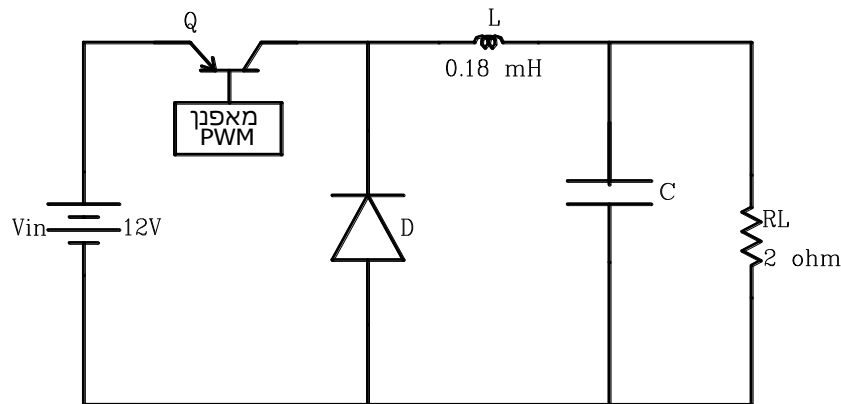
$$L(min) = \frac{toff * RL}{2}$$

באופן מעשי יש לבחור סליל שהוא גדול ב- 25% מ- $L(min)$.

$$L_p = 1.25 * L(min)$$

תרגיל דוגמא 1:

נתון ממיר DC to DC כמתואר באיור הבא:



נתון: תדר המיתוג 25KHz בעל יחס מחזור של 60%.

חשב:

- א. מתח המוצא.
- ב. זרם ממוצע בסליל.
- ג. זמן הפוגה.
- ד. זרם מבוא מרבי.
- ה. את גודל הקבל אם ידוע שאדוות מתח המוצא 0.2V.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

$$V_o = D \cdot C \cdot V_{in} = 0.6 \cdot 12 = 7.2V$$

ב.

$$I_L(av) = \frac{V_o}{R_L} = \frac{7.2}{2} = 3.6A$$

ג.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{25 \cdot 10^3} = 40\mu sec$$

$$ton = D \cdot C \cdot T = 0.6 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 24\mu sec$$

$$toff = T - ton = (40 - 24) \cdot 10^{-6} = 16\mu sec$$

.7

$$I_{in(max)} = I_L(max) = I_L(av) + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_o * t_{off}}{L} = \frac{7.2 * 16 * 10^{-6}}{0.18 * 10^{-3}} = 0.64A$$

$$I_{in(max)} = 3.6 + \frac{0.64}{2} = 3.92A$$

.ה

$$\Delta V_o = \frac{(1 - D.C) * V_o}{8 * L * C * f(pwm)^2}$$

$$C = \frac{(1 - D.C) * V_o}{8 * L * \Delta V_o * f(pwm)^2} = \frac{(1 - 0.6) * 7.2}{8 * 0.18 * 10^{-3} * 0.2 * (25 * 10^3)^2} = 16\mu F$$

תרגיל דוגמא 2:

תכנן ממיר ממותג מוריד מתח (Buck) בעל הנתונים הבאים:

1. תדר המיתוג $f(pwm)=12KHz$.

2. הממיר מייצב במוצא מתח של 5V כאשר הוא מוזן ממצברים בערך של 12V.
חשב:

א. את יחס המחזור.

ב. את גודל הסליל שיבטיח רציפות כאשר ידוע שהממיר מחובר לעומס של 5Ω .

ג. בחר קבל אשר יבטיח שאדוות מתח המוצא R_p לא יעלה על 5% (יש להשתמש בסליל מעשי).

ד. שרטט את הממיר כולל ערכי הרכיבים.

ה. בהנחה ונצילות הממיר המתוכנן 95%, חשב את הזרם הממוצע במבוא.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

א.

$$D.C = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{5}{12} = 0.4166 = 41.66\%$$

ב.

$$L(\min) = \frac{toff * RL}{2}$$

$$T = \frac{1}{f(pwm)} = \frac{1}{12 * 10^3} = 83.333 \mu sec$$

$$ton = D.C * T = 0.4166 * 83.33 * 10^{-6} = 34.716 \mu sec$$

$$toff = T - ton = (83.333 - 34.716) * 10^{-6} = 48.617 \mu sec$$

$$L(\min) = \frac{48.617 * 10^{-6} * 5}{2} = 121.53 \mu H$$

$$Lp = 1.25 * L(\min) = 1.25 * 121.53 * 10^{-6} = 151.9 \mu H$$

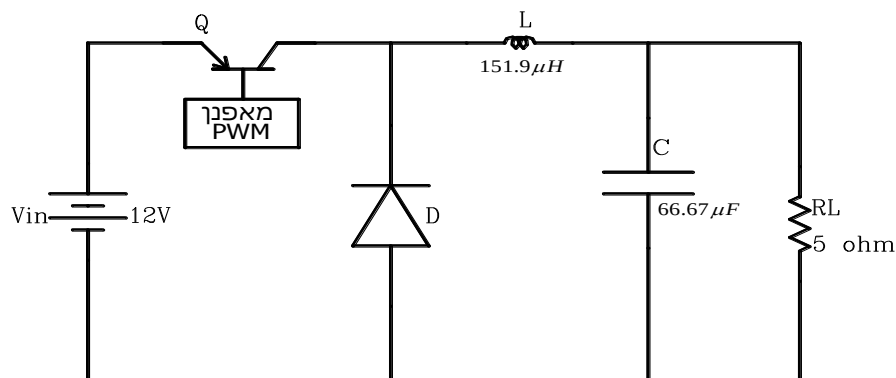
ג.

$$Rp = \frac{\Delta Vo}{Vo}$$

$$\Delta Vo = Rp * Vo = \frac{5}{100} * 5 = 0.25V$$

$$C = \frac{(1 - D.C) * Vo}{8 * L * \Delta Vo * f(pwm)^2} = \frac{(1 - 0.4166) * 5}{8 * 151.9 * 10^{-6} * 0.25 * (12 * 10^3)^2} = 66.67 \mu F$$

ד.



ה.

$$\eta = \frac{Vo^2}{RL} \Rightarrow Iin(av) = \frac{Vo^2}{RL} = \frac{5^2}{12 * 0.95} = 0.438A$$

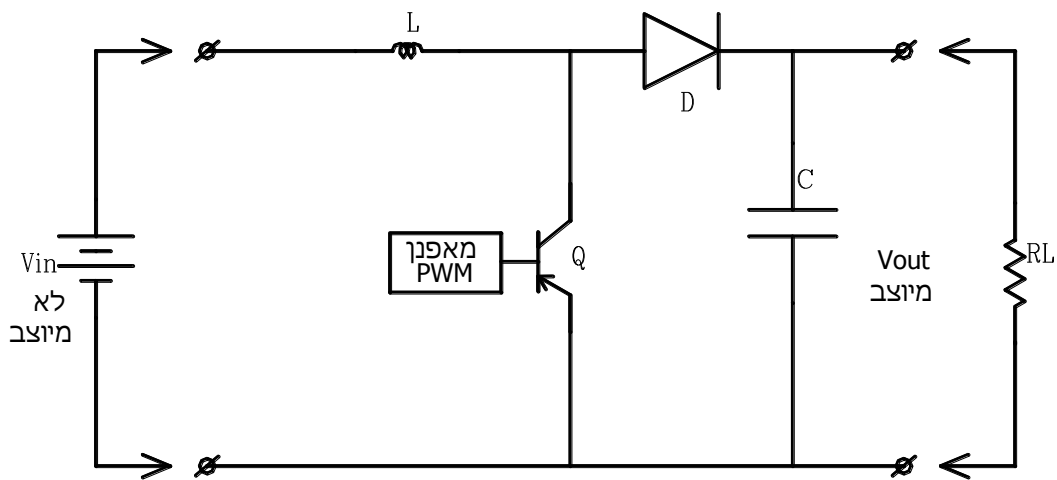
(עבודת בית מס' 7 בגמר לימוד פרק זה)

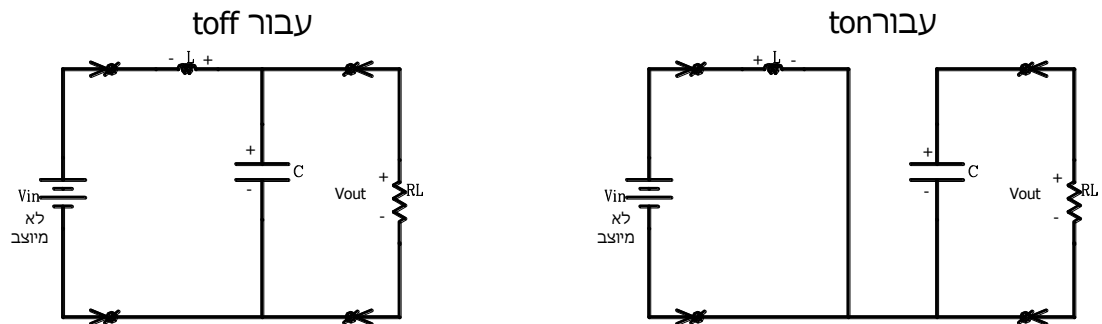
7.2.3-ממיר מעלה מתח (Boost Step Up)

לעיתים נדרשת פעולת ייצוב למתח הגדול ממתח הכניסה, וכמדובר על תחום אלקטרוניקת הספק חשוב שיהיה מייצב מתח נטול הפסדים.

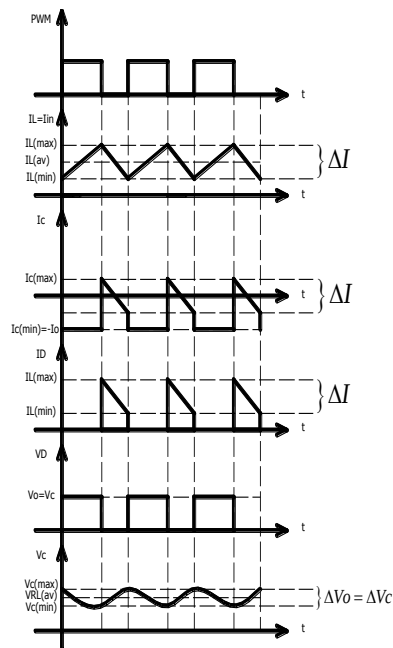
הממיר הממותג המבצע פעולה זו נקרא ממיר מעלה מתח Boost.

גם בממיר זה פעולת הייצוב מתבצעת באמצעות יחידת PWM (אפנון רוחב הדופק) אשר דואגת לשמור על מתח המוצא ע"י שינוי יחס המחזור בהתאם. ממיר זה מתואר באיור הבא:





	$V_L = L \frac{di}{dt}$	
<u>toff</u>		<u>ton</u>
$V_L = L \frac{\Delta I}{toff}$		$V_L = L \frac{\Delta I}{ton}$
$V_o - V_{in} = L \frac{\Delta I}{toff}$		$V_{in} = L \frac{\Delta I}{ton}$
$\Delta I = \frac{(V_o - V_{in}) * toff}{L}$		$\Delta I = \frac{V_{in} * ton}{L}$
	על פי חוק שימור האנרגיה: אנרגיה הטעינה והפריקה בסליל חייבות להיות שוות.	
	$\Delta I_{on} = \Delta I_{off}$	
	$\frac{(V_o - V_{in}) * toff}{L} = \frac{V_{in} * ton}{L}$	
	$V_o * toff - V_{in} * toff = V_{in} * ton$	
	$V_o * toff = V_{in} * (ton + toff)$	
	$\frac{toff}{T} = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$\frac{T - ton}{T} = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$\frac{T}{T} - \frac{ton}{T} = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$1 - D.C = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$D.C = 1 - \frac{V_{in}}{V_o}$	



$$\Delta I = IL(max) - IL(min)$$

$$IL(max) = IL(av) + \frac{\Delta I}{2}$$

$$IC(max) = \frac{\Delta I}{2}$$

$$IC(min) = -I_o$$

$$ID(max) = IL(max)$$

$$Vc(max) = V_{RL(av)} + \frac{\Delta V_o}{2}$$

$$Vc(min) = V_{RL(av)} - \frac{\Delta V_o}{2}$$

פיתוח נוסחאות:

חישוב גודל המשרן/שינוי הזרם ΔI :

עבור ton-

$$V_{in} = L \frac{\Delta I}{t_{on}}$$

עבור toff-

$$V_o - V_{in} = L \frac{\Delta I}{t_{off}}$$

הקשר בין V_o ל- V_{in} -

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D \cdot C}$$

הנצילות-

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} * 100$$

$$IL(av) = I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}}$$

חישוב גודל הקבל/אדוות מתח המוצא ΔV_o :

$$I_c = C \frac{\Delta V_c}{\Delta t}$$

עבור ton בלבד-

$$I_c = I_o$$

$$\Delta V_c = \frac{I_o * t_{on}}{C}$$

מקדם אדוות מתח המוצא R_p -

$$R_p = \frac{\Delta V_o}{V_o}$$

קביעת גודל המשרן המינימאלי בתכנון ממיר Boost:

עבור toff בלבד-

$$V_o - V_{in} = L \frac{\Delta I}{t_{off}}$$

$$IL(min) = IL(av) - \frac{\Delta I}{2}$$

תנאי לרציפות-

$$IL(min) = 0$$

$$IL(av) = \frac{\Delta I}{2}$$

$$IL(av) = I_{in} = \frac{\left[\frac{(V_o - V_{in}) * toff}{L(min)} \right]}{2} = \frac{(V_o - V_{in}) * toff}{2 * L(min)}$$

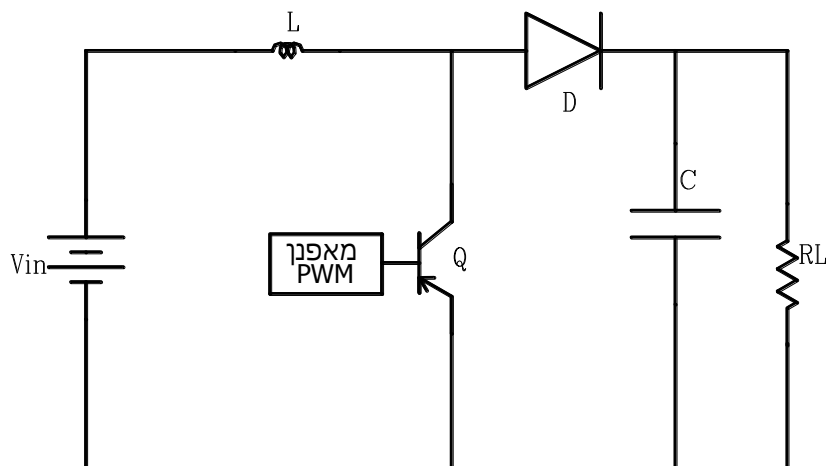
$$L(min) = \frac{(V_o - V_{in}) * toff}{2 * I_{in}}$$

סליל מעשי-

$$L_p = 1.25 * L(min)$$

תרגיל דוגמא 1:

נתון ממיר DC to DC מסוג Boost כמתואר באיור הבא:



נתוני הממיר:

$$L=100\mu H, RL=20\Omega, fpwm=40KHz, toff=15\mu sec, PRL=7.2W$$

חשב:

- א. יחס המחזור D.C.
- ב. מתח הכניסה Vin.
- ג. בהנחה ונצילות הממיר 92% חשב זרם ממוצע בסליל.
- ד. זרם המבוא המרבי.
- ה. גודל הקבל עבור אדוות מתח של 0.2V.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40 * 10^3} = 25 \mu sec$$

$$t_{on} = T - t_{off} = (25 - 15) * 10^{-6} = 10 \mu sec$$

$$D.C = \frac{t_{on}}{T} = \frac{10 * 10^{-6}}{25 * 10^{-6}} = 0.4 = 40\%$$

ב.

$$V_o = \sqrt{P_{RL} * R_L} = \sqrt{7.2 * 20} = 12V$$

$$V_{in} = V_o * (1 - D.C) = 12 * (1 - 0.4) = 7.2V$$

ג.

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{7.2}{0.92} = 7.82W$$

$$I(av) = I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{7.82}{7.2} = 1.08A$$

ד.

$$\Delta I = \frac{V_{in} * t_{on}}{L} = \frac{7.2 * 10 * 10^{-6}}{100 * 10^{-6}} = 0.72A$$

$$I_{in(max)} = I_{L(av)} + \frac{1}{2} * \Delta I = 1.08 + \frac{1}{2} * 0.72 = 1.44A$$

ה.

$$\Delta V_o = \Delta V_c = 0.2V$$

$$I_c = C \frac{\Delta V_c}{t_{on}}$$

$$I_c = I_o$$

$$\Delta V_c = \frac{I_o * t_{on}}{C}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{12}{20} = 0.6A$$

$$C = \frac{I_o * t_{on}}{\Delta V_c} = \frac{0.6 * 10 * 10^{-6}}{0.2} = 30 \mu F$$

תרגיל דוגמא 2:

נתון ממיר מעלה מתח *Step Up Boost* בעל הנתונים הבאים:

$$IL(av)=2A, Po=10W, \eta=0.94, D.C=0.35$$

חשב:

- א. מתח המוצא.
- ב. נתון שזמן ההפוגה (*toff*) הינו $25\mu sec$ חשב את תדר המיתוג.
- ג. את גודל המשרן אם נתון $\Delta IL=0.1*IL(av)$.
- ד. את מתח המוצא המרבי אם ידוע שגודל הקבל הינו $90\mu F$.

פתרון תרגיל דוגמא 2:

א.

$$I_{in} = IL(av) = 2A$$

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{10}{0.94} = 10.63W$$

$$V_{in} = \frac{P_{in}}{I_{in}} = \frac{10.63}{2} = 5.315V$$

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D.C} = \frac{5.315}{1 - 0.35} = 8.17V$$

ב.

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

$$D.C = \frac{T - t_{off}}{T} = 1 - \frac{t_{off}}{T}$$

$$\frac{t_{off}}{T} = 1 - D.C$$

$$T = \frac{t_{off}}{1 - D.C} = \frac{25 * 10^{-6}}{1 - 0.35} = 38.46\mu sec$$

$$f(pwm) = \frac{1}{T} = \frac{1}{38.46 * 10^{-6}} = 26KHz$$

ג.

$$\Delta IL = 0.1 * IL(av) = 0.1 * 2 = 0.2A$$

$$V_{in} = VL = L \frac{\Delta I}{t_{on}}$$

$$t_{on} = T - t_{off} = (38.46 - 25) * 10^{-6} = 13.46\mu sec$$

$$L = \frac{V_{in}}{\frac{\Delta I}{t_{on}}} = \frac{5.312}{\frac{0.2}{13.46 * 10^{-6}}} = 357.7\mu H$$

.ד

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{10}{8.17} = 1.22A$$

$$I_o = I_c = C \frac{\Delta V_c}{t_{on}}$$

$$\Delta V_c = \frac{I_o * t_{on}}{C} = \frac{1.22 * 13.46 * 10^{-6}}{90 * 10^{-6}} = 0.182V$$

$$V_o(max) = V_o + \frac{\Delta V_o}{2} = 8.17 + \frac{0.182}{2} = 8.26V$$

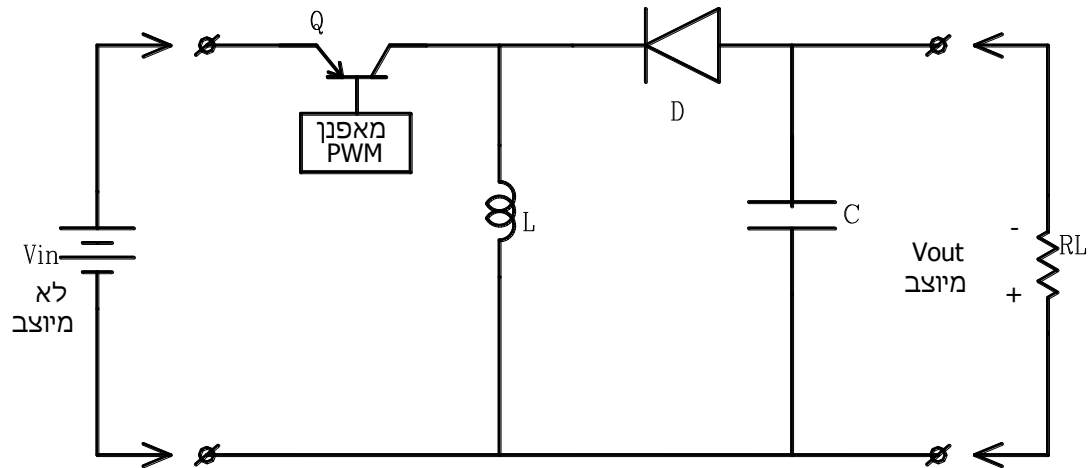
(עבודת בית מס' 8 בגמר לימוד פרק זה)

7.2.4-ממיר מעלה-מוריד מתח Buck-Boost

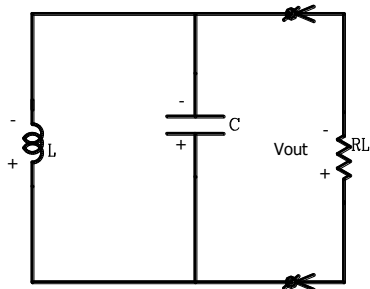
קיימת אפשרות לבנות ממיר ממותג DC to DC אשר:

- באמצעות יחס המחזור ניתן יהיה לקבוע את אופיו- (מעלה מתח, מוריד מתח, שומר מתח).
- קוטביות מתח המוצא שלו תמיד תהיה הפוכה לקוטביות מתח הכניסה.

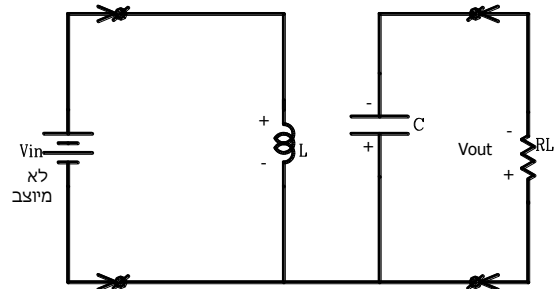
ממיר זה נקרא ממיר מעלה-מוריד מתח (Buck-Boost) כמתואר באיור הבא:



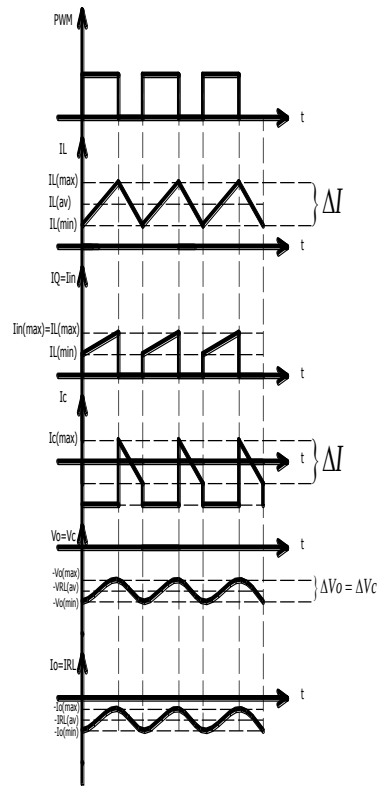
עבור toff



עבור ton



	$V_L = L \frac{di}{dt}$	
<u>toff</u>		<u>ton</u>
$V_o = V_L = L \frac{\Delta I}{toff}$		$V_{in} = V_L = L \frac{\Delta I}{ton}$
$\Delta I = \frac{V_o * toff}{L}$		$\Delta I = \frac{V_{in} * ton}{L}$
	על פי חוק שימור האנרגיה: אנרגיה הטעינה והפריקה בסליל חיבות להיות שוות.	
	$\Delta I_{on} = \Delta I_{off}$	
	$\frac{V_o * toff}{L} = \frac{V_{in} * ton}{L}$	
	$V_o = V_{in} * \frac{ton}{toff}$	
	$D.C = \frac{ton}{T}$ $D.C = \frac{ton}{ton + toff}$ $\frac{ton}{toff} = \frac{D.C}{1 - D.C}$	
	$V_o = V_{in} \frac{D.C}{1 - D.C}$	
	מסקנה: $D.C < 0.5 \Rightarrow V_{in} > V_o$ – מוריד $D.C = 0.5 \Rightarrow V_{in} = V_o$ – שומר $D.C > 0.5 \Rightarrow V_{in} < V_o$ – מעלה	



$$IL(max) = IL(av) + \frac{\Delta I}{2}$$

$$IL(min) = IL(av) - \frac{\Delta I}{2}$$

$$I_{in}(max) = IL(max)$$

$$I_c(max) = \frac{\Delta I}{2}$$

$$V_o(max) = V_c(max) = V_o + \frac{\Delta V_o}{2}$$

$$V_o(min) = V_c(min) = V_o - \frac{\Delta V_o}{2}$$

$$I_o(max) = I_o + \frac{\Delta V_o}{2 * RL}$$

$$I_o(min) = I_o - \frac{\Delta V_o}{2 * RL}$$

פיתוח נוסחאות:

חישוב גודל הקבל/אדוות מתח המוצא:

$$I_c = C \frac{\Delta V_c}{\Delta t}$$

עבור ton בלבד-

$$I_c = I_o$$

$$\Delta V_c = \Delta V_o$$

$$I_o = C \frac{\Delta V_o}{ton}$$

$$C = \frac{I_o * ton}{\Delta V_o}$$

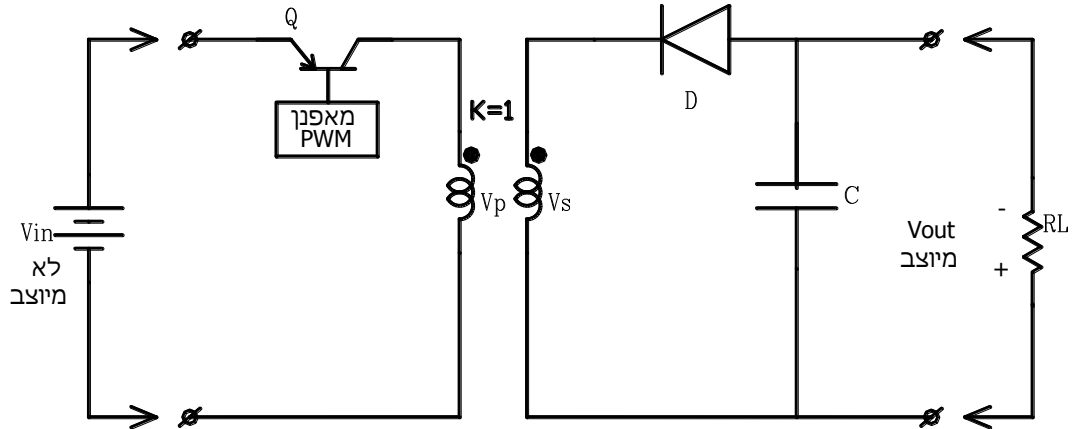
חישוב נצילות:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{V_o * I_o}{V_{in} * I_{in}}$$

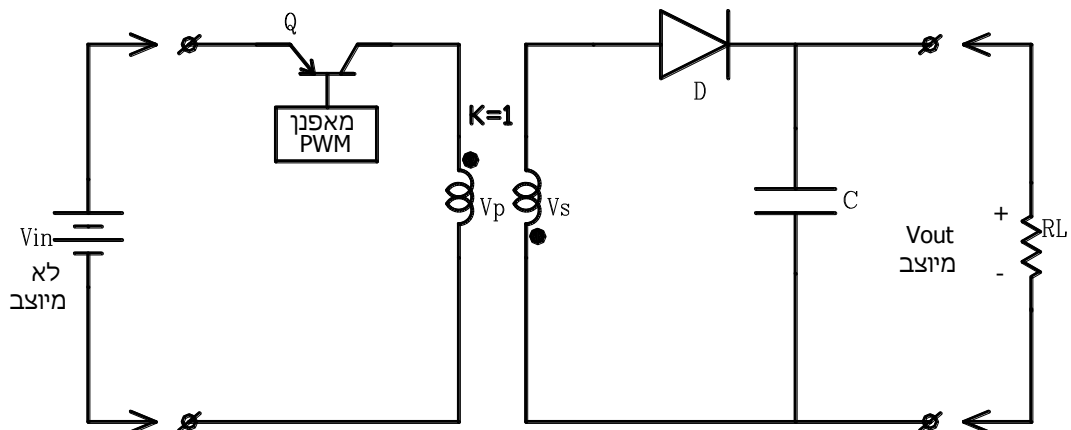
(עבודת בית מס' 9 בגמר לימוד פרק זה)

7.3.0 ממיר מעלה-מוריד מתח Buck-Boost עם שנאי Flyback
ממיר זה הינו ממיר מסוג Buck-Boost אך עם אפשרות לשינוי קוטביות מתח המוצא (באמצעות שינוי קוטביות השנאי)

7.3.1 ממיר Flyback עם קוטביות מתח מוצא הפוכה
ממיר זה כמתואר באיור הבא:



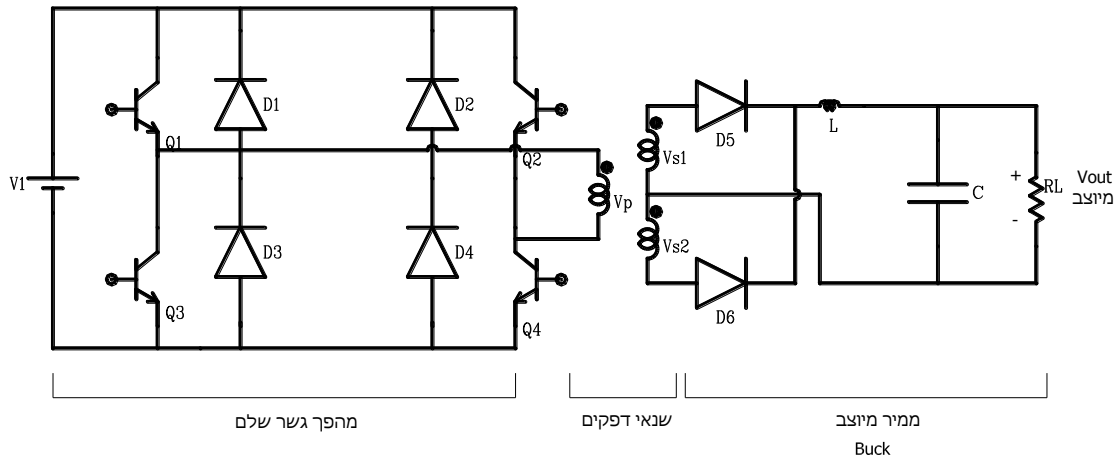
7.3.2 ממיר Flyback עם קוטביות מתח מוצא זהה לכניסה



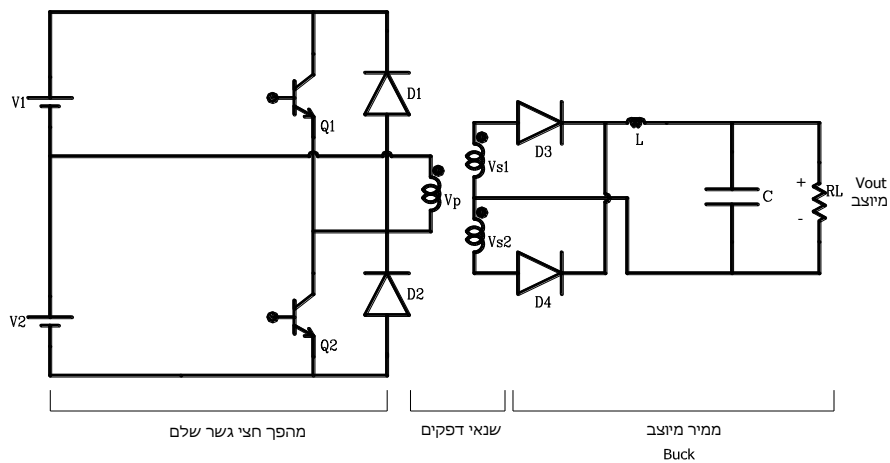
פרק 8-מעגלים שונים

8.1.0-מהפכים מבודדים ממיר ממותג מוריד מתח Buck

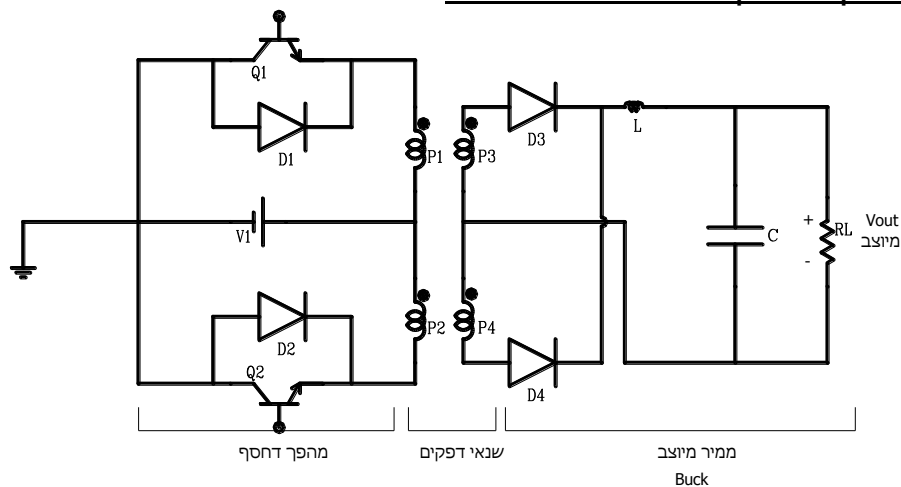
8.1.1-מהפך גשר שלם מבודד ממיר Buck



8.1.2-מהפך חצי גשר שלם מבודד ממיר Buck



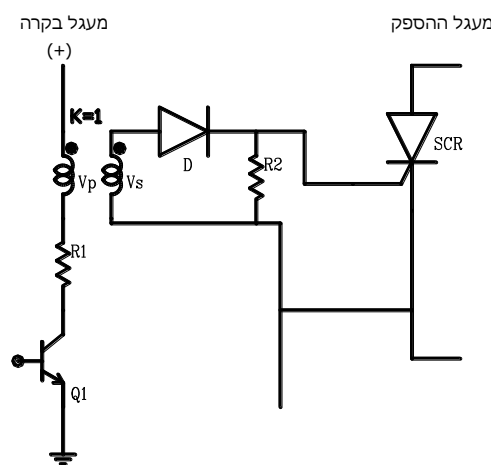
8.1.3-מהפך דח-סף מבודד ממיר Buck



8.2.0- הפרדה חשמלית (גלוונית) בין מעגל ההספק לבין מעגל הבקרה
בממיר ההספק מתקיים חיבור בין המעגלים הפועלים במתחים שונים. מעגלי ההספק מוזנים במתחים גבוהים עד למאות וולטים, בעוד שמעגלי הבקרה עובדים במתחים נמוכים המקובלים במערכות הממוחשבות (של כ- 5 וולט). הדבר מחייב להשתמש בהתקנים המאפשרים לבצע הפרדה חשמלית בין שני סוגי המעגלים.
התקנים המקובלים הם שנאי ומצמד אופטי, להלן מספר דוגמאות לביצוע ההפרדה.

8.2.1- הפרדה חשמלית באמצעות שנאי דפקים

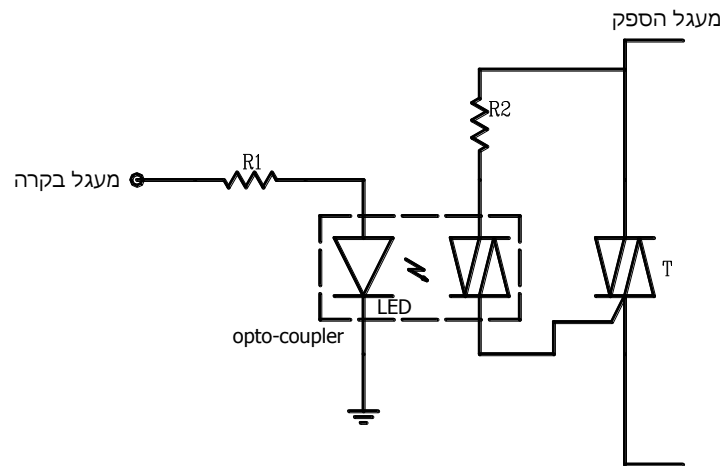
מעגל הצתת ה-SCR דרך שנאי דפקים כמתואר באיור הבא:



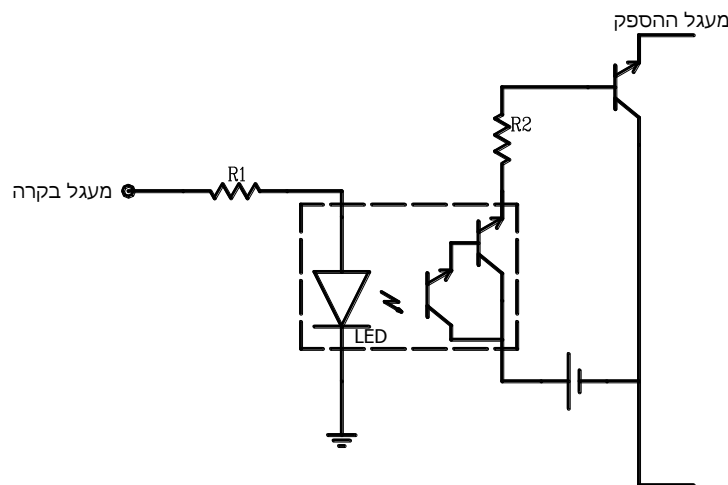
הסבר למעגל:

דופקי הצתה מועברים דרך השנאי. יחס ההשנאה של השנאי הוא 1:1 בדרך כלל. ליבת השנאי עשויה מחומר פרומגנטי המיועד לפעול בתדירות גבוהה. שנאי דפקים הינו שנאי מיוחד שנותן להעביר לסליל המשני דפקים בתדירות גבוהה ללא עיוותים. שנאי דפקים הוא שנאי קטן המתאים לעבוד עם אותות בהספקים נמוכים.

8.2.2-הפרדה חשמלית באמצעות מצמד מבודד אופטי Opto-coupler
מעגל הצתת Triac דרך מצמד אופטי מסוג Photo-Triac כמתואר באיור
הבא:



מעגל דחיפה ליצירת זרם הבסיס של טרנזיסטור הספק הבנוי על מצמד אופטי
מסוג Photo-Darlington כמתואר באיור הבא:



8.3.0-מערכת אל-פסק (Uninterruptible Power Supply) UPS

8.3.1-מבוא

מערכת אל-פסק משמשת כאמצעי גיבוי למכשירים חשמליים, כך שהיא מספקת אנרגיה סדירה לצרכנים גם בעת הפרעות ברשת החשמל. אנו מבחינים במס' סוגי הפרעות ברשת החשמל:

1. שינויי מתח- הנובעים מניתוק או חיבור של עומסים "כבדים" לרשת.
2. הפסקת האנרגיה החשמלית- עקב תקלה או עבודה ברשת.
3. שינוי בתדר הרשת- לעיתים תדר הרשת משתנה.

הפרעות כגון אלו שצוינו לעיל עלולות לגרום לאובדן מידע עבור מערכות ממוחשבות ולנזק בצידוד אלקטרוני רגיש. כמוכן כאשר מדובר על צידוד חיוני מאוד או יקר אסור לאפשר להפרעות מסוג זה להשפיע.

8.3.2-מבנה עקרוני של מערכת אל-פסק

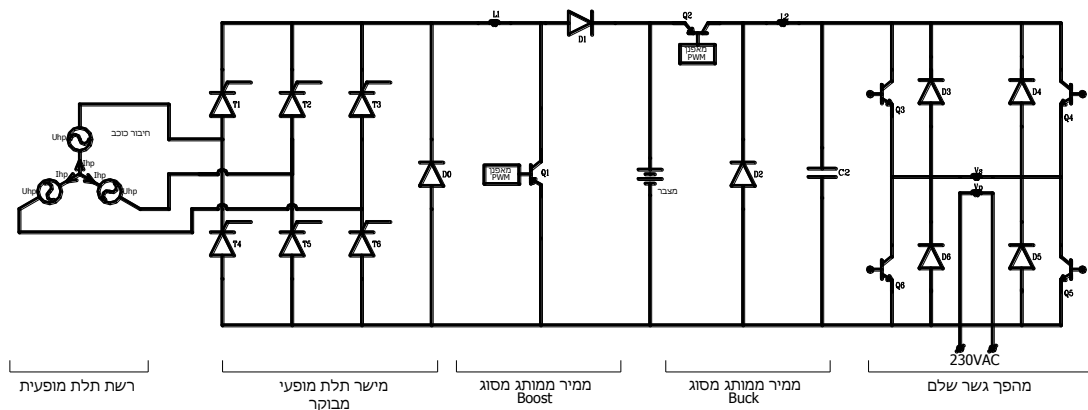
באופן כללי המערכת הבסיסית מתוארת באופן הבא:

מקור רשת החשמל	מיישר	סוללת מצברי DC	מהפך AC/DC עם יציאת סינוס מדורג	עומס
-------------------	-------	-------------------	---------------------------------------	------

אל מתח הרשת מתחבר מיישר AC to DC כאשר באופן מעשי משתמשים במיישר מבוקר על מנת לווסת את המתח המיושר. במוצא המיישר מחוברים מצברים לזרם ישר כאשר באופן מעשי על מנת לווסת את זרם הטעינה של המצברים, נעזרים בממיר מעלה מתח מסוג Boost שלו יש אופי של מקור זרם (לקבלת חיי מצבר אופטימאליים).

את מתח המצבר הופכים למתח חילופין באמצעות מהפך Inverter כאשר באופן מעשי בין המצברים למהפך מחובר ממיר מוריד מתח מסוג Buck אשר שולט על מתח הכניסה למיישר ובכך ניתן לשלוט על מתח החילופין במוצא המהפך. חשוב לזכור שזרם הטעינה הוא פרמטר חשוב בקביעת אורך חיי המצבר. טעינה נכונה יכולה להאריך במידה רבה את אורך חייו.

המעגל העקרוני של ה-UPS נראה באיור הבא:



8.3.3-משטרי עבודה של מערכת אל פסק

1. **ON LINE** - בשיטה זו העומס מחובר באופן קבוע למוצא המהפך ואילו המצברים כל הזמן נמצאים בטעינה מצד אחד ומתפרקים לעומס מצד שני. לשיטה זו נצילות נמוכה, כי בערך 20% מאנרגיית הטעינה הופכת לחום. מה עוד שאורך חיי המצברים מתקצר בהרבה בגלל הטעינה והפריקה התמידית המשמעות לכך אמינות נמוכה.

2. **STAND BY (OFF LINE)** - בשיטה זו העומס מחובר באופן קבוע לרשת (דרך מסנן אשר תפקידו לספק אנרגיה רציפה בעת הפרעות קלות). רק כאשר קיימת הפרעה חמורה ברשת, מעגל הבקרה מנתק את העומס מהרשת ומחבר אותו מיידית למהפך (פעולה זו מתבצעת בפחות מ-2msec באמצעות מפסק סטטי). לשיטה זו אמינות גבוהה בעיקר בשל העובדה שאורך חיי המצברים ארוך מאוד, כי המצברים מתפרקים רק כאשר קיימת הפרעה ברשת החשמל.

הערות:

1. השימוש ב-UPS מוגבל בזמן (ממס' דקות עד מס' שעות תלוי בעוצמת המצברים).
2. כיום בדגמי ה-UPS קיים ממשק למחשב, כך שבעת הפעלתו מתבצע כיבוי מסודר של המחשב לאחר שמירת הנתונים.
3. הספק של UPS צריך להיות גבוה ב-20% לפחות מהספק העומס.
4. את משך הזמן שיכולים המצברים לספק אנרגיה ניתן לחשב באמצעות הביטוי הנוסחה הבאה:

$$Q = I * t$$