

המחלקה לחשמל קירור ומיזוג אוויר

אלקטרוניקה של מערכות הספק חלק ב'

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים
2010

דרך הטייסים 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 4 – בקרת הספק לזרם ישר

4.1.0- באמצעות SCR עמ' 3-5

4.2.0- באמצעות SCR-ים וקבל קומוטציה עמ' 6-8

4.3.0- באמצעות מגבר שרת וטרנזיסטור עמ' 9-12

פרק 5 - ממירים DC to AC:

5.1.0- מהפך חצי גשר עמ' 13-14

5.2.0- מהפך גשר שלם עמ' 14

5.3.0- מהפך דח-סוף עמ' 15-16

5.4.0- הפיכת גל ריבועי AC לגל סינוס עמ' 17

5.5.0- ממיר מהדהד טורי עמ' 18-20

פרק 6 – ממיר תדר

6.0.0- מבוא לממירי תדר עמ' 21-22

6.1.0- ממיר תדר ח"פ מרשת ת"פ עמ' 23-24

6.2.0- ממיר תדר ת"פ מרשת ת"פ עמ' 25-26

פרק 7 – מיצבים

7.1.0- מיצבים ליניאריים עמ' 27-30

7.2.1- מבוא למיצבים ממותגים עמ' 31

7.2.2- ממיר מוריד מתח עמ' 32-39

7.2.3- ממיר מעלה מתח עמ' 40-47

7.2.4- ממיר מעלה-מוריד מתח עמ' 48-51

7.3.0- ממיר Flybuck עמ' 52

פרק 8 – מעגלים שונים

8.1.0- מהפכים מבודדים עמ' 53

8.2.0- הפרדה חשמלית עמ' 54-55

8.3.0- מערכת אל פסק עמ' 56-57

תודתי נתונה למר 'אשי יוסי' בעזרתו באיסוף החומר.

פרק 4-בקרת הספק לזרם ישר

4.0.0- מבוא

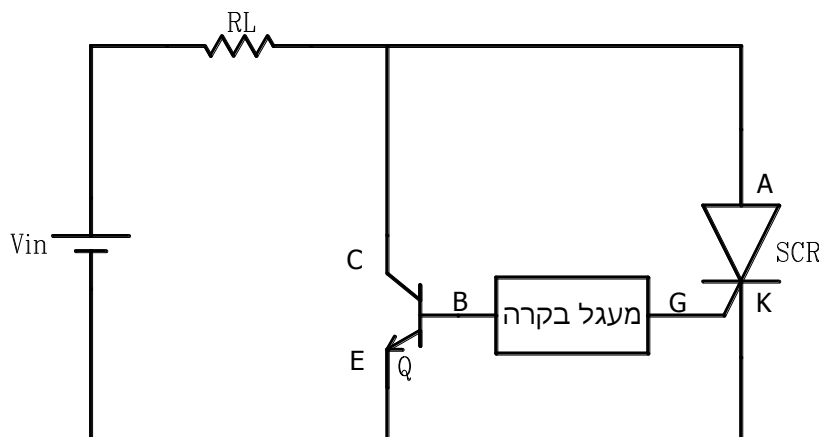
גם בזרם ישר דרושה פעולה של בקרת הספק ללא איבודי הספק. הצרכנים העיקריים שדורשים בקרת הספק מסוג זה הם המנועים לזרם ישר, כיוון שבקרת ההספק שלהם משנה את מהירותם. כאשר נחבר מנוע לזרם ישר למקור מתח באופן קבוע המנוע יסתובב במהירות הנומינאלית שלו, ואם נחבר את המנוע למקור מתח ישר לסירוגין ז"א בתדירות קבועה מסוימת 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.

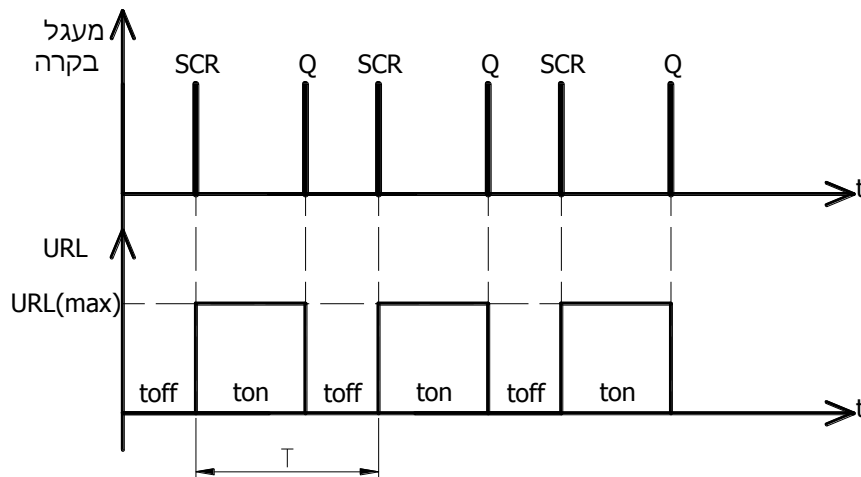
דוגמא למעגל לבקרת הספק הזרם ישר כמתואר באיור הבא:



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-

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

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

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

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

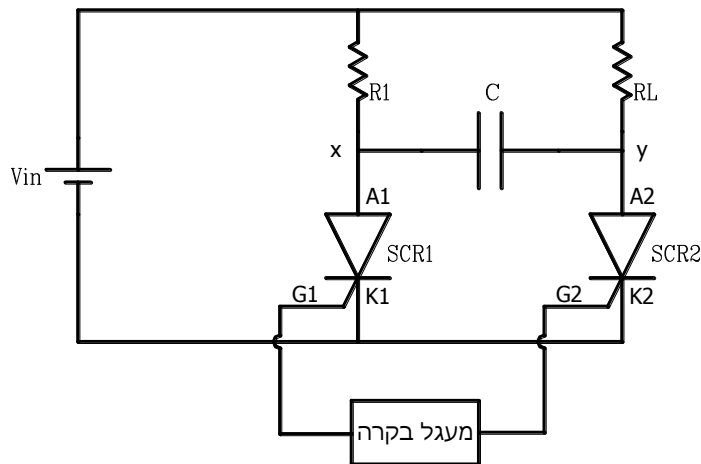
$$URL(rms) = \sqrt{\frac{ton}{T} * URL(max)^2}$$

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

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

4.2.0- בקרת הספק באמצעות SCR-ים וקבל קומוטציה

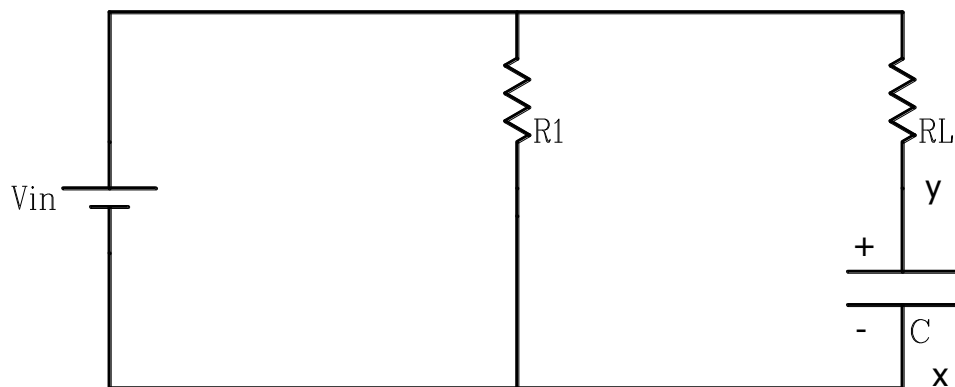
נתון המעגל המתואר באיור הבא:



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:



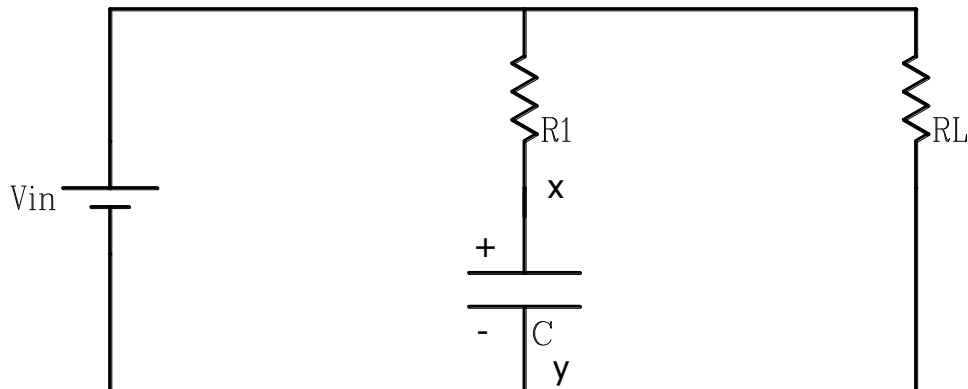
במצב זה הקבל נטען כמעט מיידיית למתח המקור V_{in} ולכן:

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:

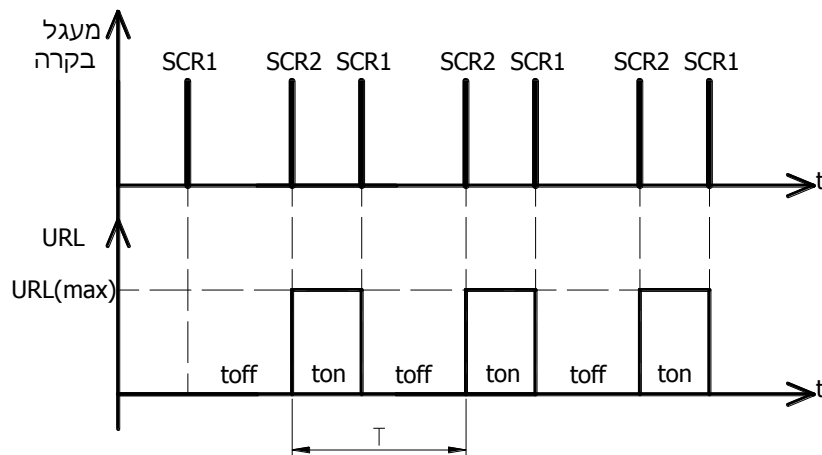


במצב זה:

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-

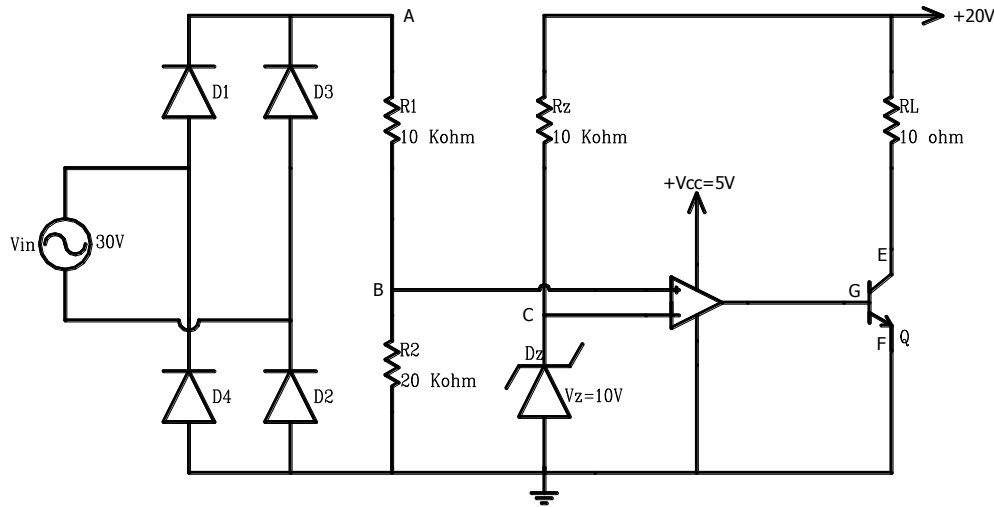
$$URL(av) = D.C * URL(max)$$

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:

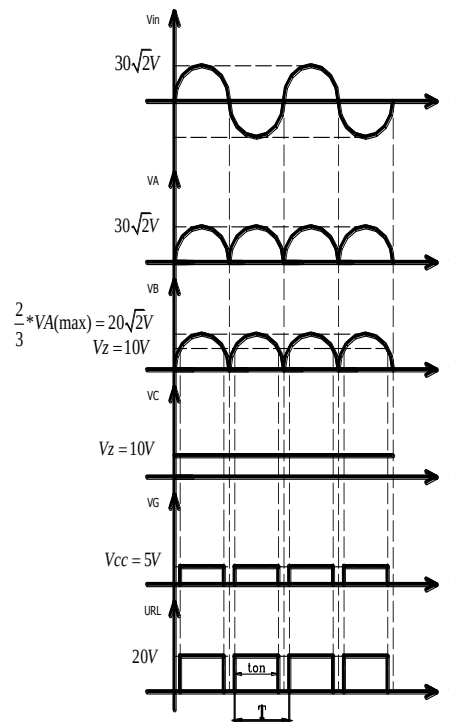


הסבר למעגל:

מעגל זה מורכב ממספר חלקים:

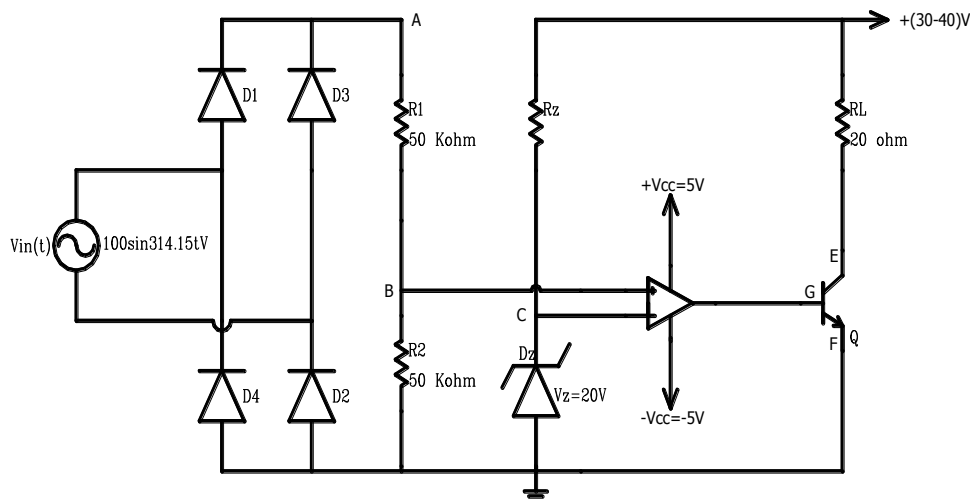
- מיישר דו דרכי חד מופעי- במוצא המיישר מתקבל גל פועם (בנקודה A ביחס לאדמה)
- דיודת זנר (D_z)- דיודת זו משמשת לייצוב המתח, כלומר המתח על פניה יהיה קבוע (בדוגמא זו $10V$).
- מגבר שרת- במעגל זה מגבר השרת יתפקד כמשווה ולא כמגבר מכיוון שאין לו משו. ז"א שהוא ישווה כל הזמן את המתחים בכניסות שלו ובתאם לתוצאת ההשוואה יתקבל אות במוצא שלו:
כאשר $V(+)>V(-)$ יתקבל במוצא המשווה $+V_{cc}$ בדוגמא זו $5V$.
כאשר $V(+)<V(-)$ יתקבל במוצא המשווה $-V_{cc}$ 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:



א. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורת הגלים הבאות:

$V_{in}(t)$, V_A , V_B , V_C , V_G , V_E , V_F , URL .

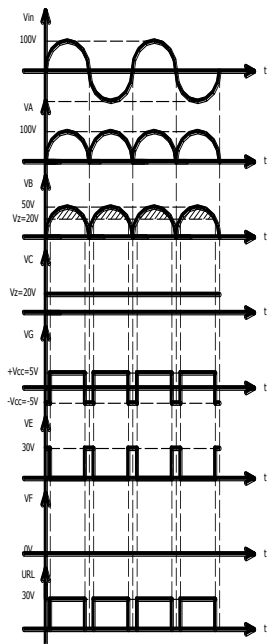
ב. חשב את הזרם הממוצע דרך נגד העומס.

ג. חשב את ההספק המתפתח בעומס.

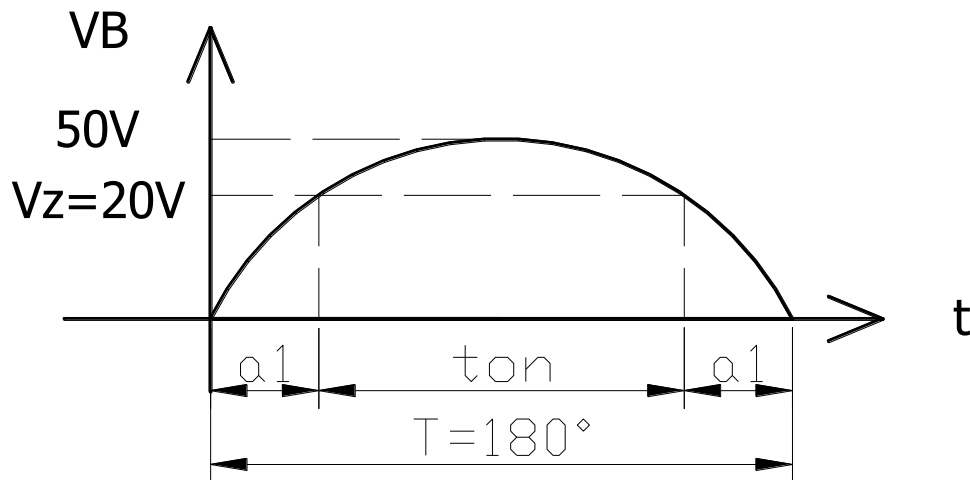
ד. סעיפים א-ג התייחסו למתח DC של $30V$ במעגל. משנים מתח זה ל- $40V$ כיצד שינויי זה ישפיע על יחס המחזור של הגל בנגד העומס, וכן על ההספק שיתפח עליו (אין צורך בחישובים).

פתרון לתרגיל דוגמא:

א. שרטוט גלים:



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



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

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

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

$$D.C = \frac{ton}{T} = \frac{180 - 2 * a1}{180} = \frac{180 - 2 * 23.5}{180} = 0.738$$

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

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

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 DC to AC (Inverters)

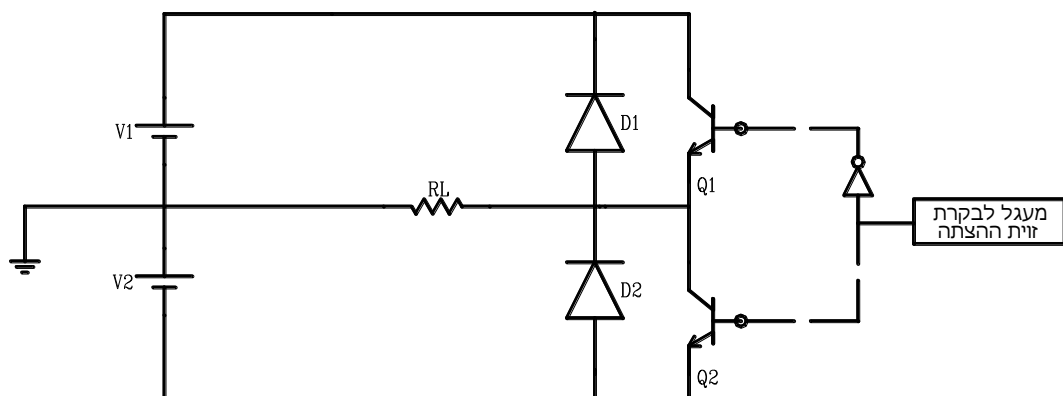
5.0.0-מבוא

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:

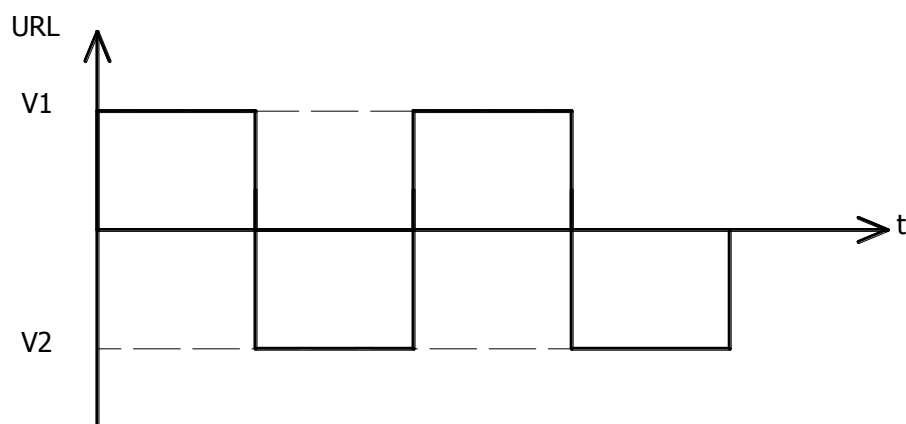
- מהפך חצי גשר Half Bridge.
- מהפך גשר שלם Full Bridge – גשר H.
- מהפך דח-סוף Push-Pull.

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:

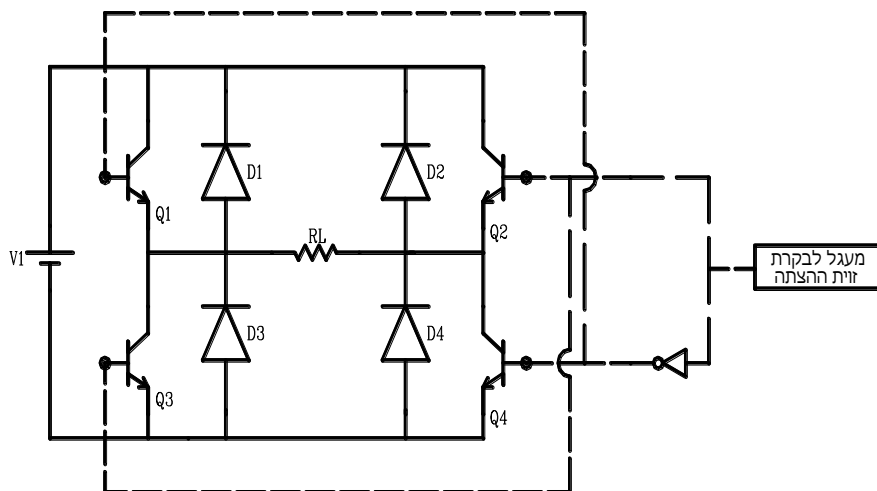


הסבר לפעולת המעגל:

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 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 במצב קטעון ולהיפך. 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 ובציודו 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.

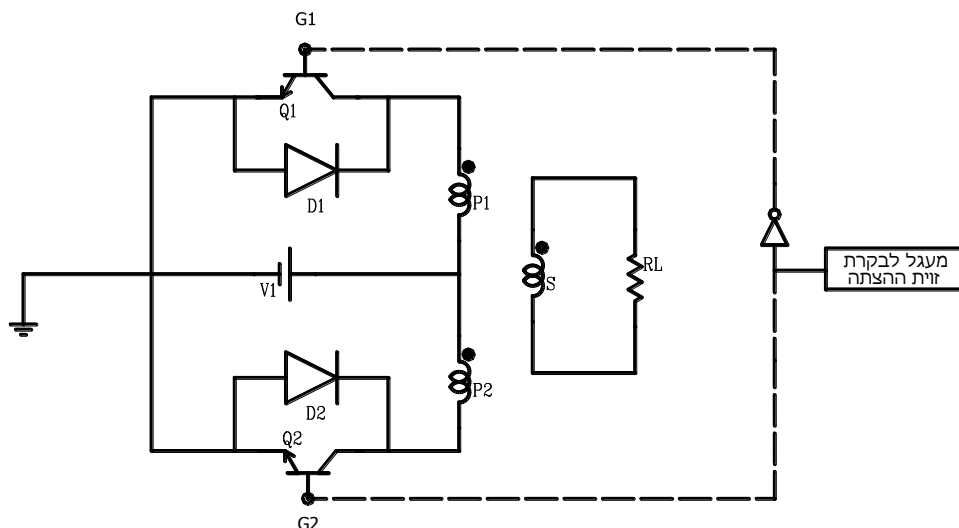
5.3.0-מהפך דח-ספ (Push Pull)

מהפך זה מכיל שנאי בעל סנף אמצעי, 2 טרנזיסטורים ומעגל בקרה. מעגל זה יכול להיות בעל 2 תפקידים:
א. ממיר DC to AC - בממיר זה לאחר האפנון מגיעים לאות AC טוב יותר (קרוב יותר לאות סינוס) מאשר בממירים הקודמים.
ב. 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

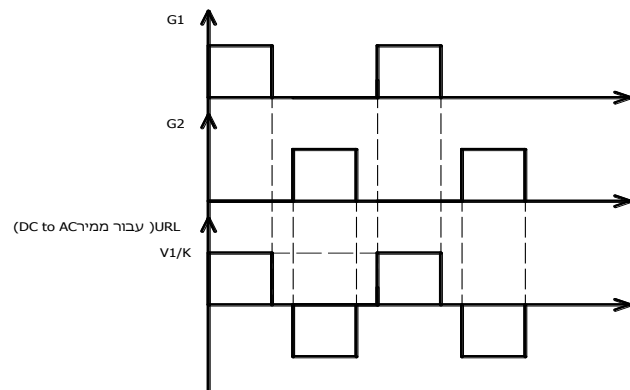
מהפך זה מתואר באיור הבא:



תאור פעולת המעגל:

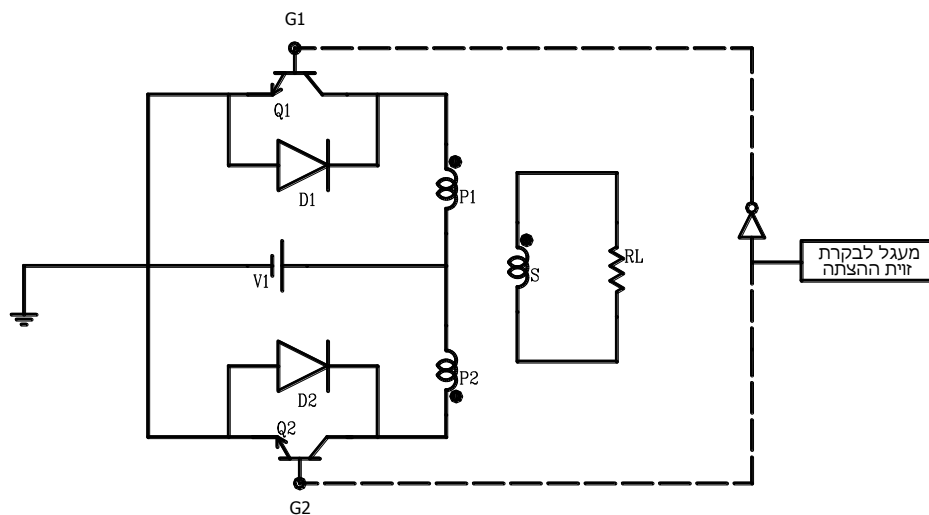
במצב זה כאשר Q1 on ב-Q2 off ולהיפך וכך על נגד העומס מופיע אות AC ריבועי כמתואר בצורת הגלים הבאה.

צורות גלים:



5.3.2-ממיר DC to DC

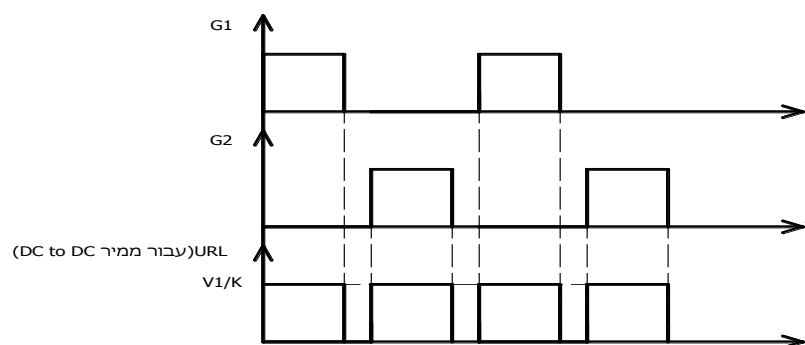
מהפך זה מתואר באיור הבא:



תאור פעולת המעגל:

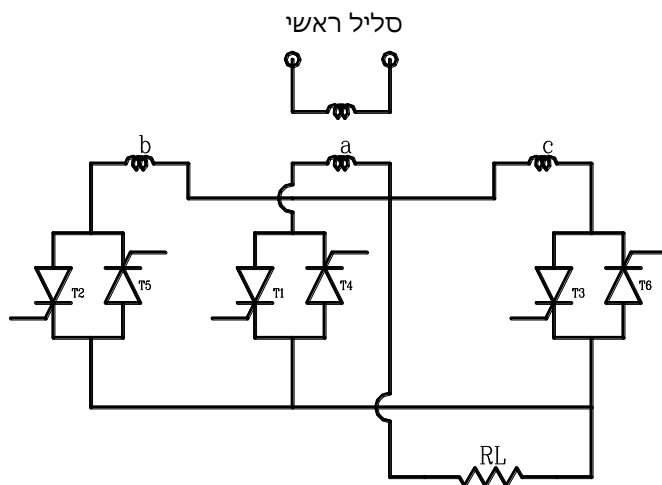
במצב זה כאשר Q1 on ב-Q2 off ולהיפך כתוצאה משינוי אחת הנקודות בסליל הראשוני בשנאי על נגד העומס מופיע אות DC ריבועי כמתואר בצורת הגלים הבאה.

צורות גלים:



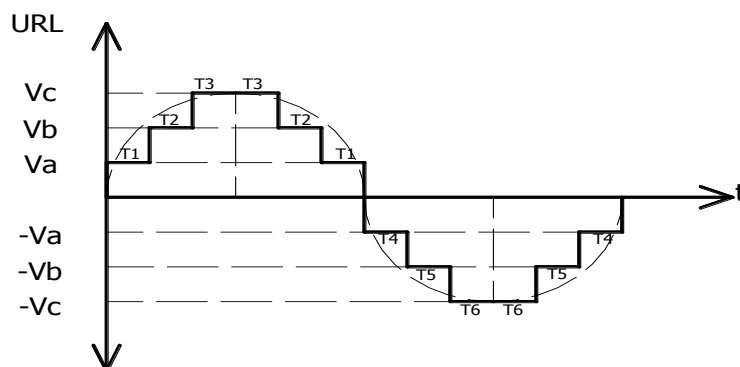
- 5.4.0- הפיכת גל AC ריבועי לגל סינוס מקורב (באמצעות מדרגות)
 במוצא המהפך מופיע גל AC ריבועי. לעיתים קיים צורך להפכו לגל סינוס.
 קיימות 2 שיטות עיקריות להפיכת אות ריבועי לאות סינוס:
 א. ע"י שימוש במסננים- באמצעות מסננים נדאג להשאיר רק את ההרמוניה
 הבסיסית שהיא בעצם אות סינוס ואילו את יתר ההרמוניות נסנן. 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:

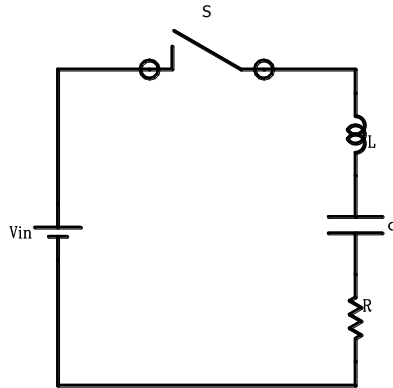


הערה: ככל שנוסף יותר סלילים בשניוני נקבל גל סינוס טוב יותר.

5.5.0 ממיר מהדהד טורי DC to AC

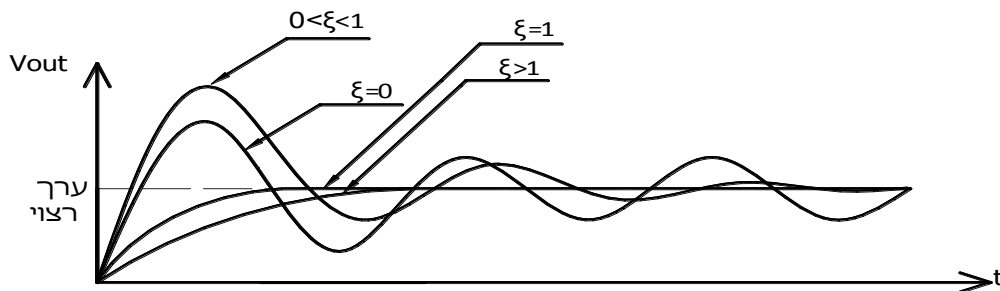
5.5.1 מבוא

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



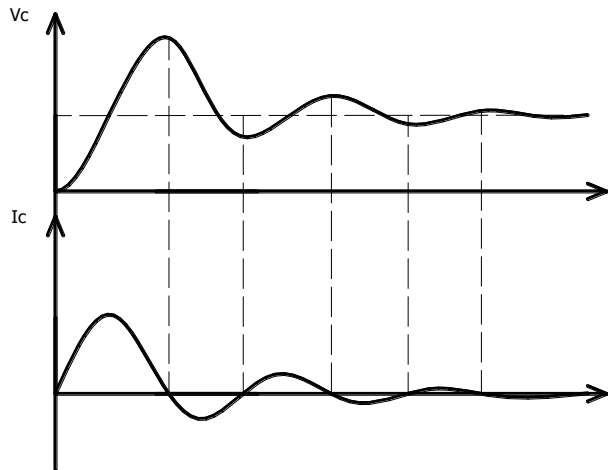
- בכל מערכת מסדר שני תיתכן יציבות בדרגות שונות אשר נקבעות לפי אותו מקדם הריסון ξ (קסיי).
- קיימות 4 דרגות ריסון:
- ריסון קריטי ($\xi=1$) - זהו מצב שבו הרשת מגיעה לערכה הרצוי ללא תנודות, מערכת זו יציבה.
 - ריסון יתר ($\xi>1$) - זהו מצב שבו המערכת מגיעה לערכה הרצוי ללא תנודות אך בצורה איטית יותר, מערכת זו יציבה.
 - 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.
 - תת ריסון ($0<\xi<1$) - זהו מצב שבו למערכת יש תנודות שהן תנודות מתרסנות.

4 דרגות הריסון מתוארות באיור הבא:

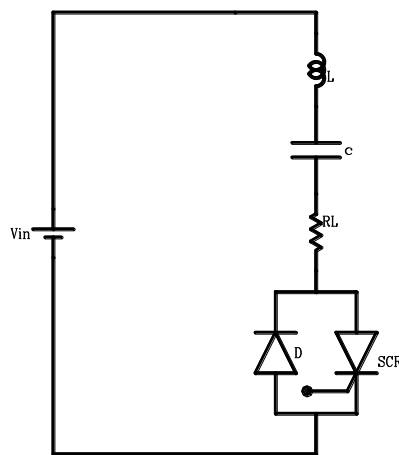


5.5.2-ממיר מהדהד טורי

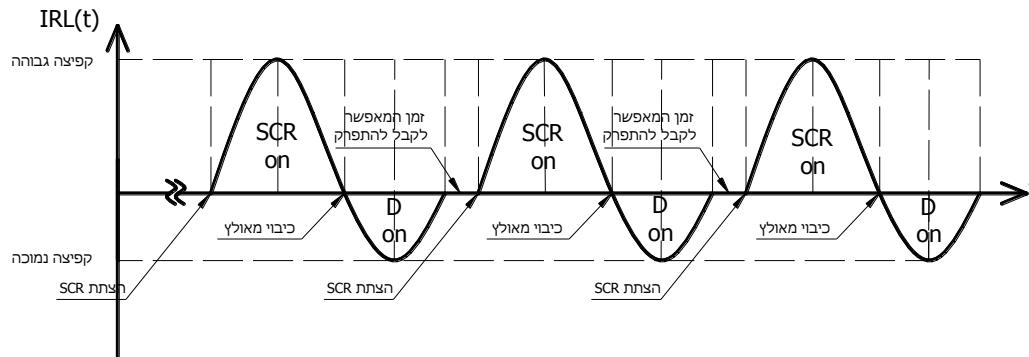
בבניית ממיר מהדהד טורי על המערכת להיות מסדר שני בעלת תת ריסון (תנודות מתרסנות). לכן צורת המתח שתופיע על הקבל תהיה בעלת תנודות מתרסנות. אך ידוע שבקבל הזרם מקדים את המתח ב- 90° . לכן צורת אות הזרם בקבל ביחס לאות המתח בקבל כמתואר באיור הבא:



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



צורות גלים:



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 שהיה 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

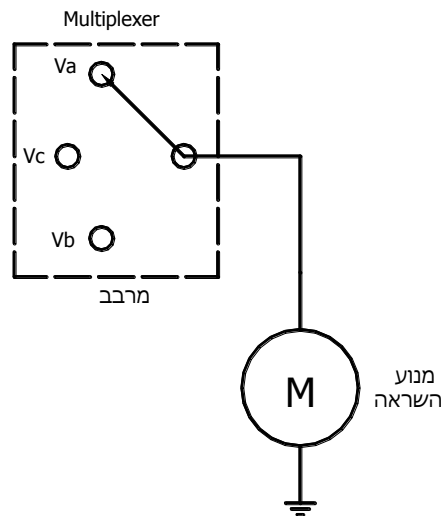
ויסות מהירות של מנוע השראה מתקבל ע"י שינוי תדר הכניסה או שינוי מס'

$$\text{הקטבים-} n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

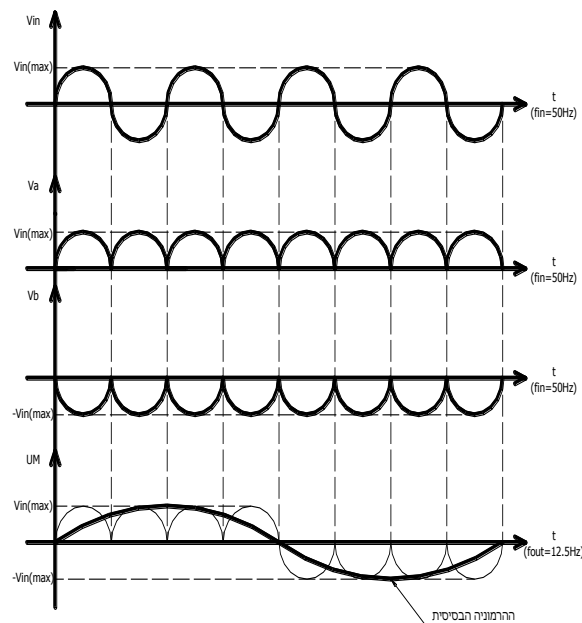
(שלא כמו במנועי DC המהירות יחסית למתח האפקטיבי על המנוע).

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: $f_{in} = 50Hz$.

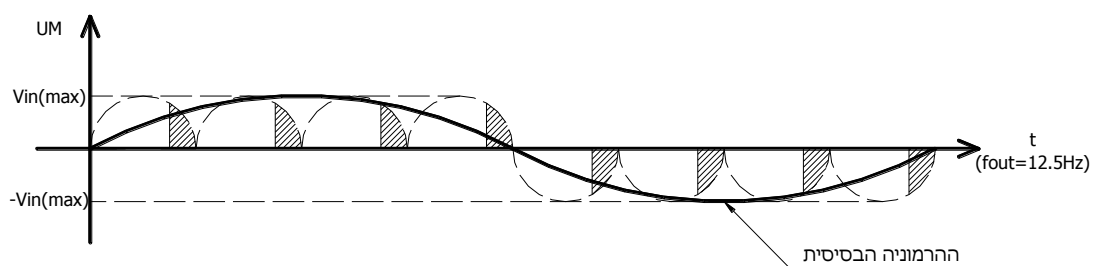
כיוון שהמרבה העביר 4 חצאי גלים בקוטביות החיובית ו-4 חצאי גלים

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:



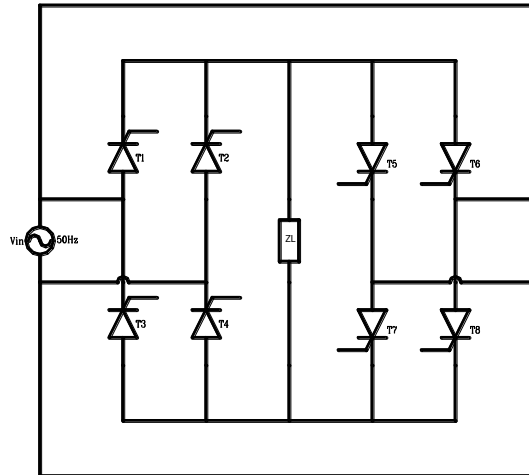
קיימים 2 מימושים של ממיר התדר החד מופעיים:

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

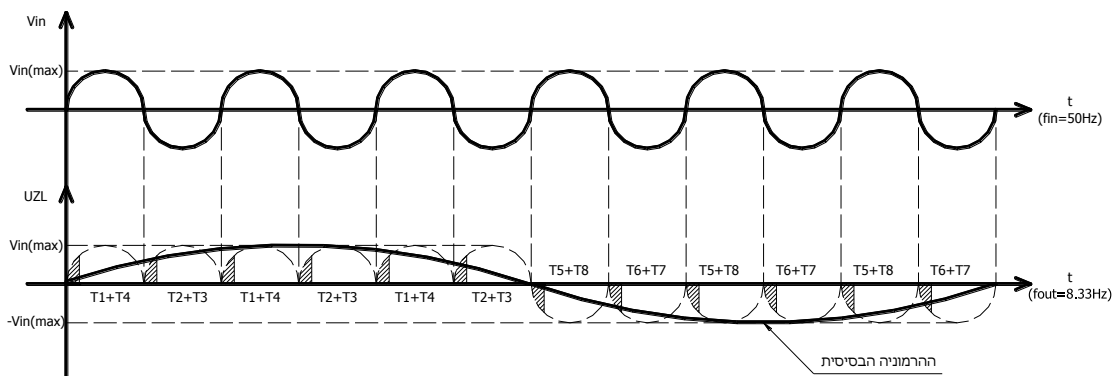
6.1.0- ממיר תדר חד מופעי מוזן מרשת חד מופעי

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:

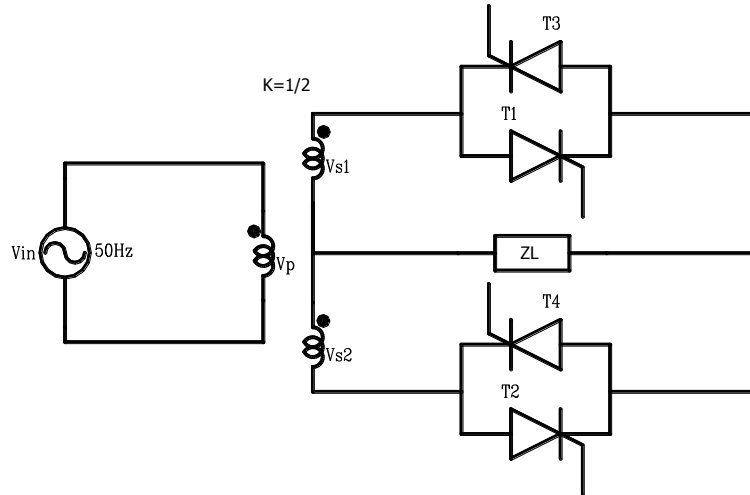
רגלי הבקרה של ה-SCR-ים מחוברות למעגל בקרה אשר מבצע 2 תפקידים עיקריים:

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

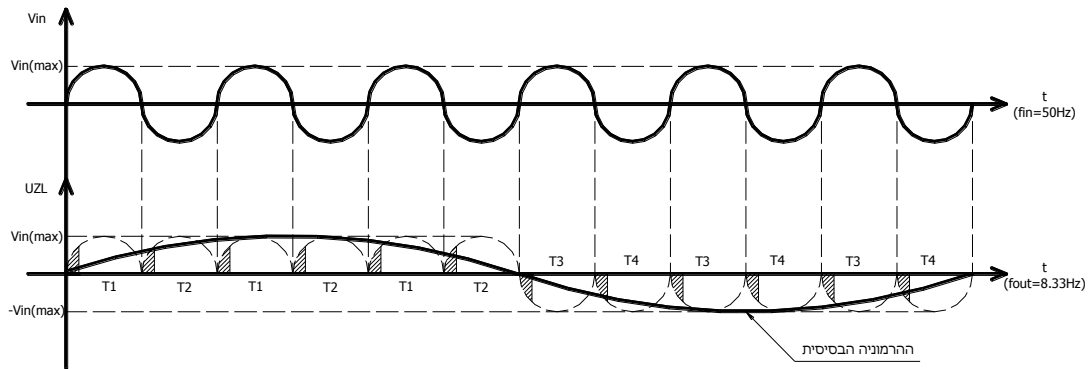
בדוגמא זו תדר הרשת הינו 50Hz ולכן מעגל הבקרה דואג לכך שכל 60msec יפעל צד אחר של המעגל ובתוך הפעולה של צד מסוים במעגל כל 10msec תמיד יד 2 טריסטורים בפעולה.

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-SCR-ים 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.

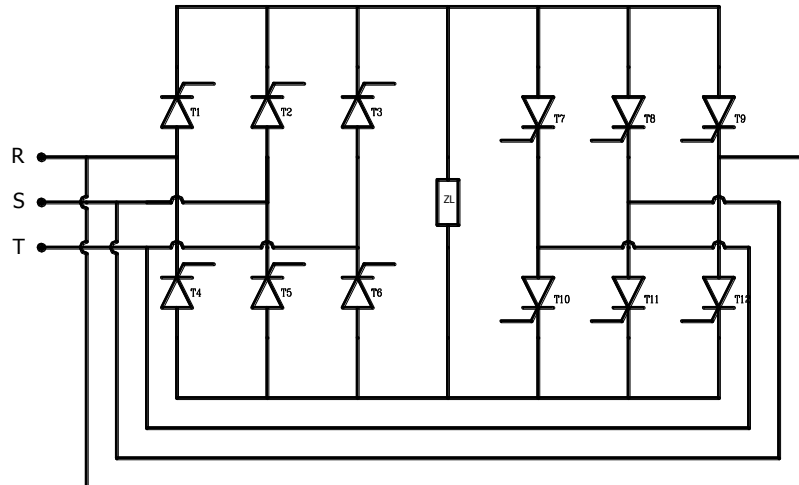
$$f_{out} = \frac{f_{in}}{6} = \frac{50}{6} = 8.33\text{Hz}$$

התדר על העומס הוא:

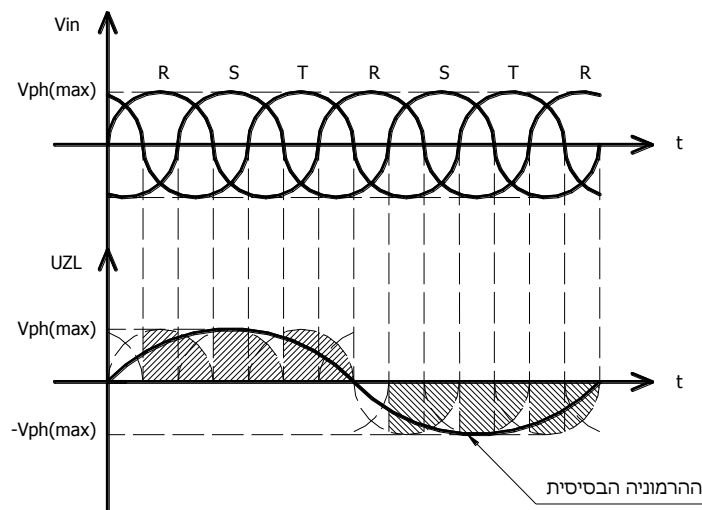
6.2.0- ממיר תדר ברשת תלת מופעית

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:

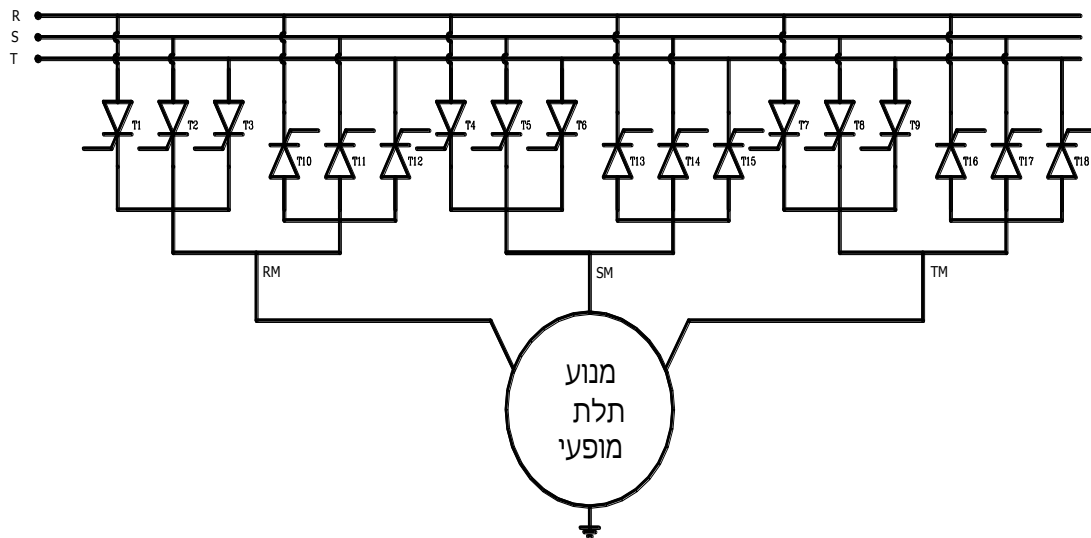


צורת הגלים (עם אפנון זווית ההצתה):

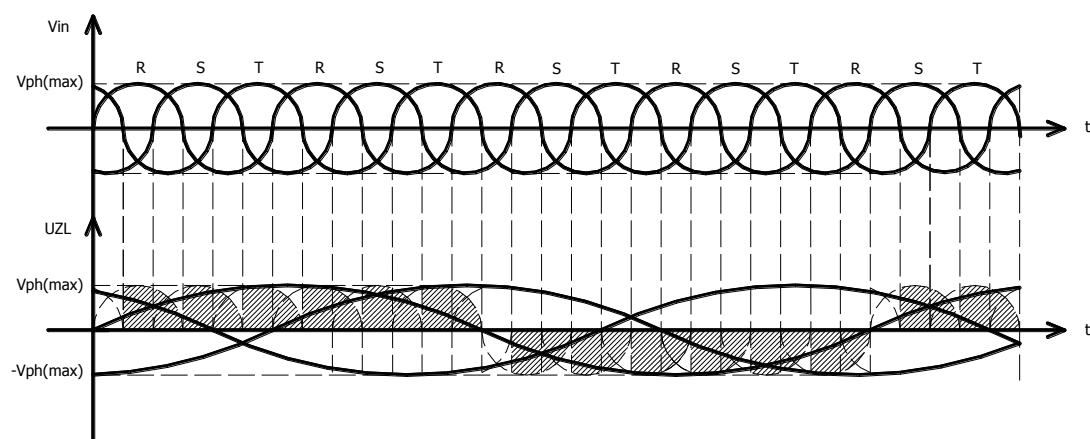


6.2.2- ממיר תדר תלת מופעי הניזון מרשת תלת מופעי

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:

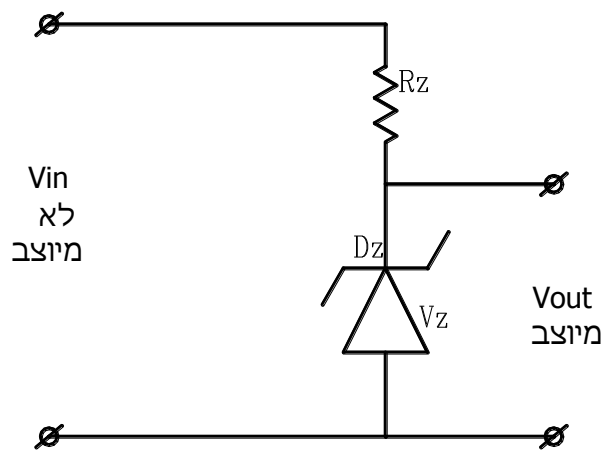
- מיצבים ליניאריים- מיצבים מתחום האלקטרוניקה.
- מיצבים ממותגים- מיצבים מתחום אלקטרוניקת הספק.

7.1.0-מיצבים ליניאריים

קיימים 2 סוגים עיקריים של מיצבים ליניאריים: מקבילי וטורי.

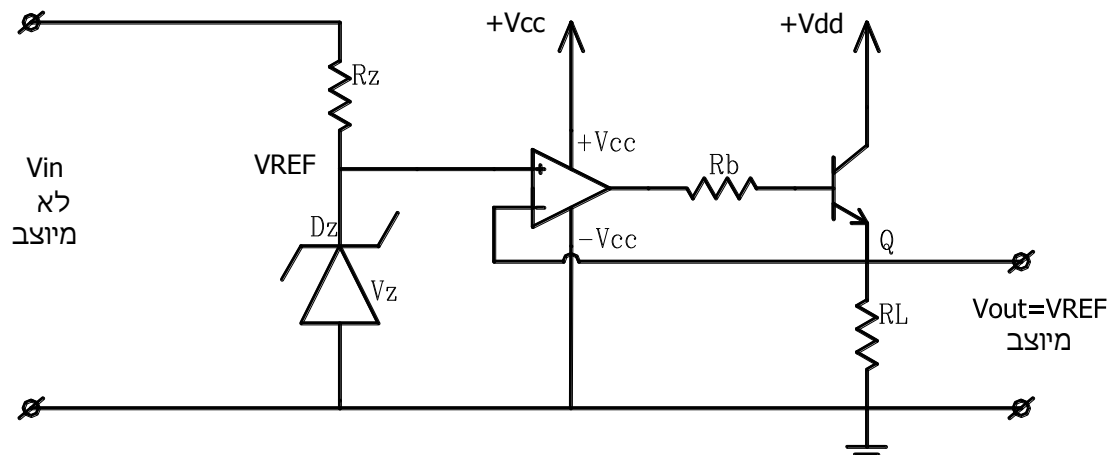
7.1.1-מיצב ליניארי טורי

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:

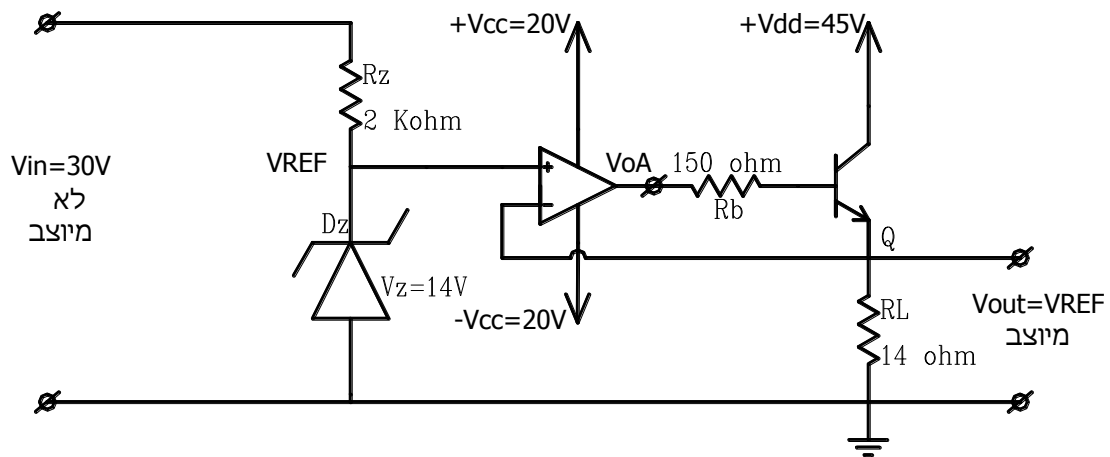
מעגל זה מכיל משוב לתיקון מידי של מתח המוצא. המתח שאותו רוצים ליציב הוא המתח V_{out} . במצב תקין כאשר V_{out} מיוצב הוא שווה ל- V_{REF} ולכן מבחינת מגבר השרת $V(+)=V(-)$. במצב זה מגבר השרת מתפקד כמגבר ובמוצאו קיים מתח אשר מכניס את הטרנזיסטור Q לנקודת עבודה מסוימת באזורו הפעיל. מצב זה גורם לכך ש- $V_{out}=V_z$. 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 הזר 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.

$$UR_z = V_{in} - V_z = 30 - 14 = 16V$$

$$IR_z = \frac{UR_z}{R_z} = \frac{16}{2 * 10^3} = 8mA$$

$$P_z = I_z * V_z = 8 * 10^{-3} * 14 = 112mW$$

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

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

3.

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

4.

$$P_Q = V_{ce} * I_c$$

$$V_{ce} = V_{dd} - URL = 45 - 14 = 31V$$

$$I_c = I_{RL} = \frac{URL}{RL} = \frac{14}{14} = 1A$$

$$P_Q = 31 * 1 = 31W$$

5. במצב תקין הטרנזיסטור באזורו הפעיל:

$$V_{oA} = V_{Rb} + V_{be} + URL$$

$$V_{Rb} = I_b * R_b$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1}{80} = 12.5mA$$

$$V_{Rb} = 12.5 * 10^{-3} * 150 = 1.875V$$

$$V_{be} = 0.7V$$

$$V_{oA} = 1.875 + 0.7 + 14 = 16.575V$$

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 אלקטרוניקת 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:

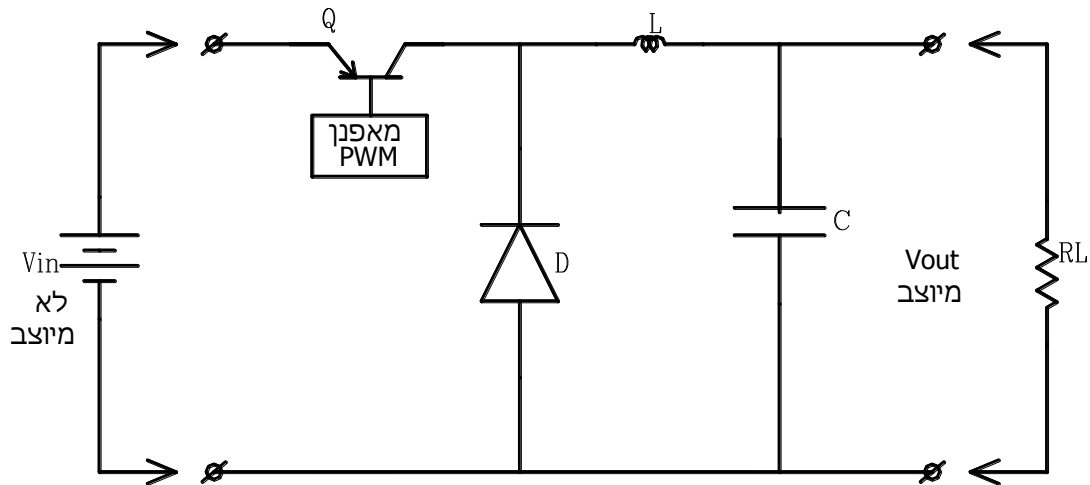
- ממיר מוריד מתח (Buck (Step Down)
- ממיר מעלה מתח (Boost (Step Up)
- ממיר מעלה ומוריד מתח Buck-Boost
- ממיר מעלה ומוריד ומשנה קוטביות מתח Flybuck

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 מאופקן. הערה: באפנון רוחב הדופק (PWM) משתמשים גם להמרת גל AC ריבועי לגל סינוס (מקורב).

7.2.2-ממיר מוריד מתח (Buck Step Down)

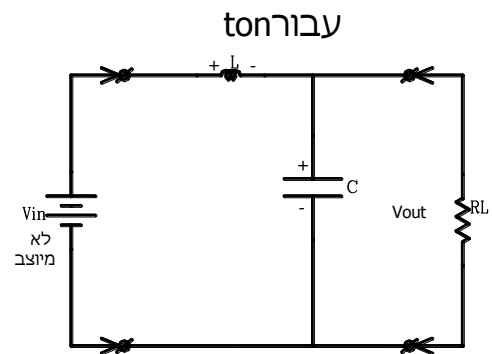
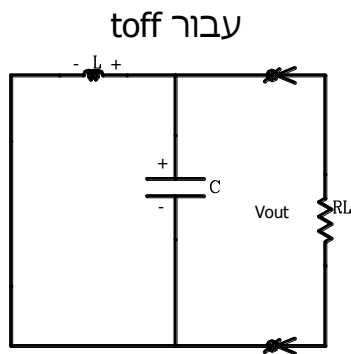
ממיר זה מתואר באיור הבא:



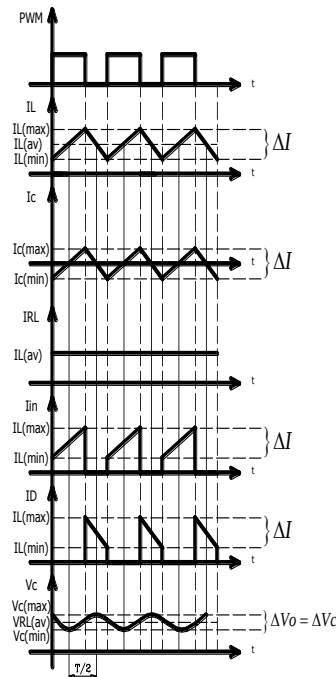
מבחינה מעשית נצילות המערכת אינה 100% אך מוגדרת כגבוהה מאוד.

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>t_{off}</u>		<u>t_{on}</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- $toff$ -

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

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

ומכאן אדוות מתח המוצא –

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

או

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

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 שכלל 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-

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

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

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

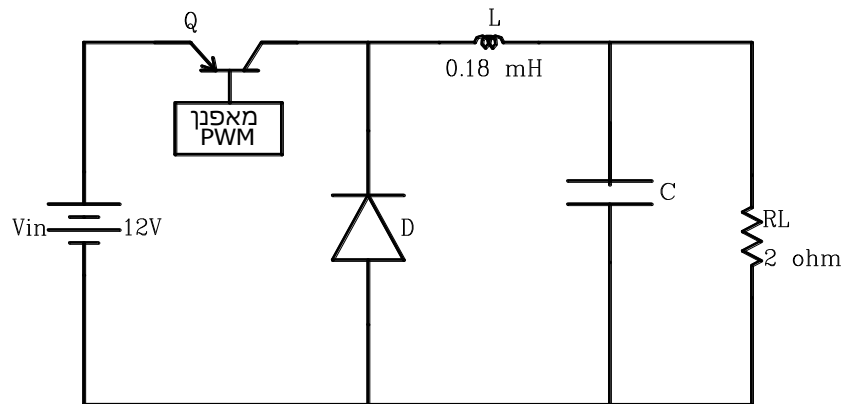
$$L(min) = \frac{toff * RL}{2}$$

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.

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

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

$$t_{off} = T - t_{on} = (40 - 24) \cdot 10^{-6} = 16\mu sec$$

.7

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

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

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

.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.

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

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

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

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

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

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

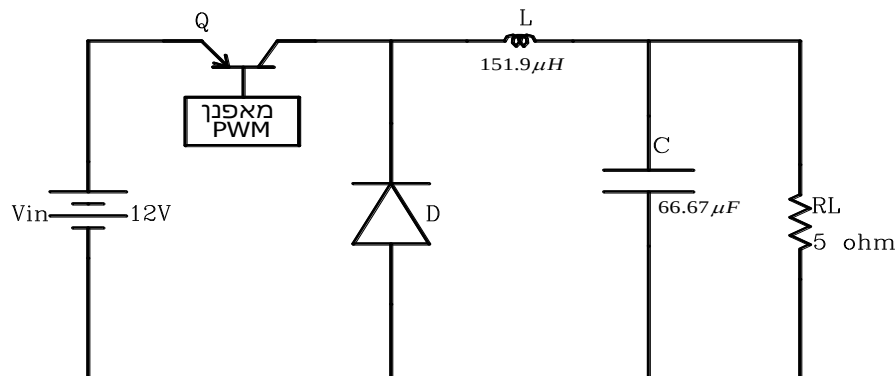
ג.

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

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

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

ד.



ה.

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

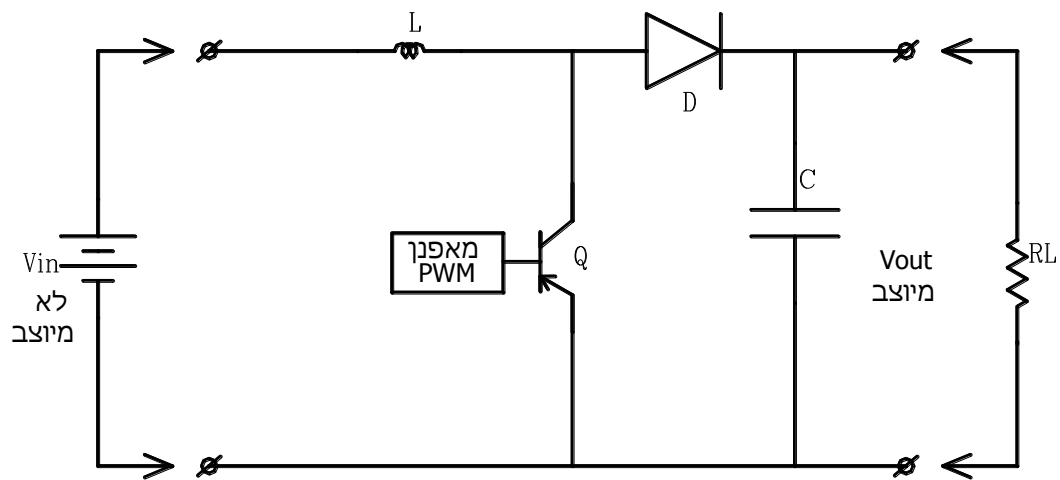
(עבודת בית מס' 7 בגמר לימוד פרק זה)

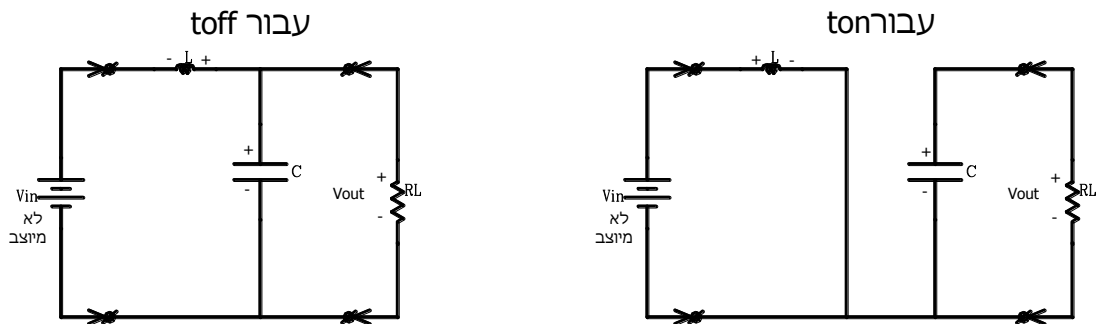
7.2.3-ממיר מעלה מתח (Boost Step Up)

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.

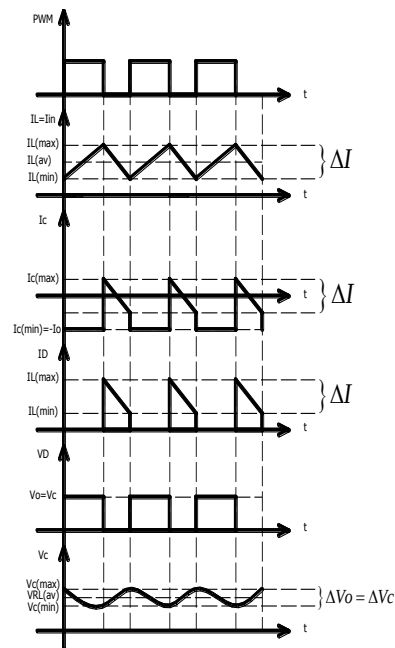
גם בממיר זה פעולת הייצוב מתבצעת באמצעות יחידת PWM (אפנון רוחב הדופק) אשר דואגת לשמור על מתח המוצא ע"י שינוי יחס המחזור בהתאם. ממיר זה מתואר באיור הבא:





	$V_L = L \frac{di}{dt}$	
<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.	
	$\Delta I_{on} = \Delta I_{off}$	
	$\frac{(V_o - V_{in}) * toff}{L} = \frac{V_{in} * ton}{L}$	
	$V_o * toff - V_{in} * toff = V_{in} * ton$	
	$V_o * toff = V_{in} * (ton + toff)$	
	$\frac{toff}{T} = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$\frac{T - ton}{T} = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$\frac{T}{T} - \frac{ton}{T} = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$1 - D.C = \frac{V_{in}}{V_o}$	
	$D.C = 1 - \frac{V_{in}}{V_o}$	

צורות גלים:



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

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

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

$$I_C(min) = -I_o$$

$$I_D(max) = I_L(max)$$

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

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

פיתוח נוסחאות:

חישוב גודל המשרן/שינוי הזרם ΔI :

עבור t_{on} -

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

עבור t_{off} -

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

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 t_{on} 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 t_{off} בלבד-

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

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

תנאי לרציפות-

$$IL(min) = 0$$

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

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

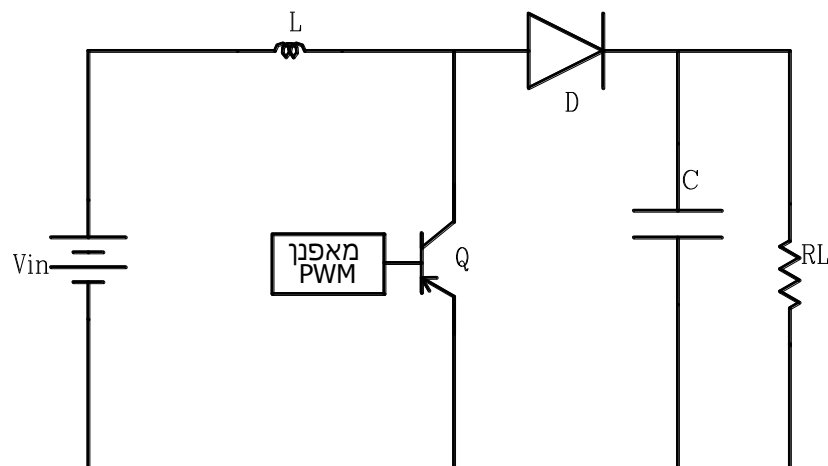
$$L(min) = \frac{(V_o - V_{in}) * toff}{2 * I_{in}}$$

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:

- יחס המחזור D.C.
- מתח הכניסה V_{in} .
- בהנחה ונצילות הממיר 92% חשב זרם ממוצע בסליל.
- זרם המבוא המרבי.
- גודל הקבל עבור אדוות מתח של 0.2V.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

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

$$ton = T - toff = (25 - 15) * 10^{-6} = 10 \mu sec$$

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

ב.

$$Vo = \sqrt{PRL * RL} = \sqrt{7.2 * 20} = 12V$$

$$Vin = Vo * (1 - D.C) = 12 * (1 - 0.4) = 7.2V$$

ג.

$$Pin = \frac{Po}{\eta} = \frac{7.2}{0.92} = 7.82W$$

$$I(av) = Iin = \frac{Pin}{Vin} = \frac{7.82}{7.2} = 1.08A$$

ד.

$$\Delta I = \frac{Vin * ton}{L} = \frac{7.2 * 10 * 10^{-6}}{100 * 10^{-6}} = 0.72A$$

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

ה.

$$\Delta Vo = \Delta Vc = 0.2V$$

$$Ic = C \frac{\Delta Vc}{ton}$$

$$Ic = Io$$

$$\Delta Vc = \frac{Io * ton}{C}$$

$$Io = \frac{Vo}{RL} = \frac{12}{20} = 0.6A$$

$$C = \frac{Io * ton}{\Delta Vc} = \frac{0.6 * 10 * 10^{-6}}{0.2} = 30 \mu F$$

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 (t_{off}) 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.

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

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

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

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

.ד

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

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

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

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

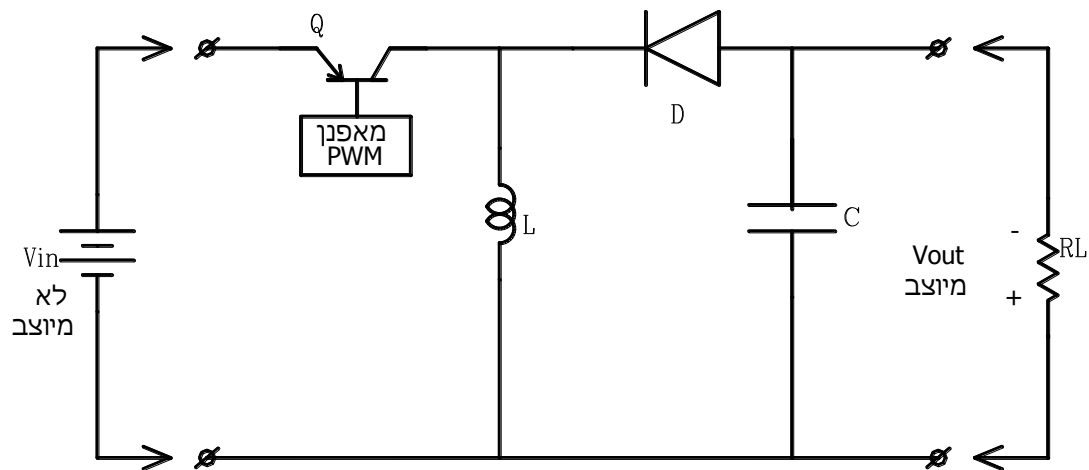
(עבודת בית מס' 8 בגמר לימוד פרק זה)

7.2.4 ממיר מעלה-מוריד מתח Buck-Boost

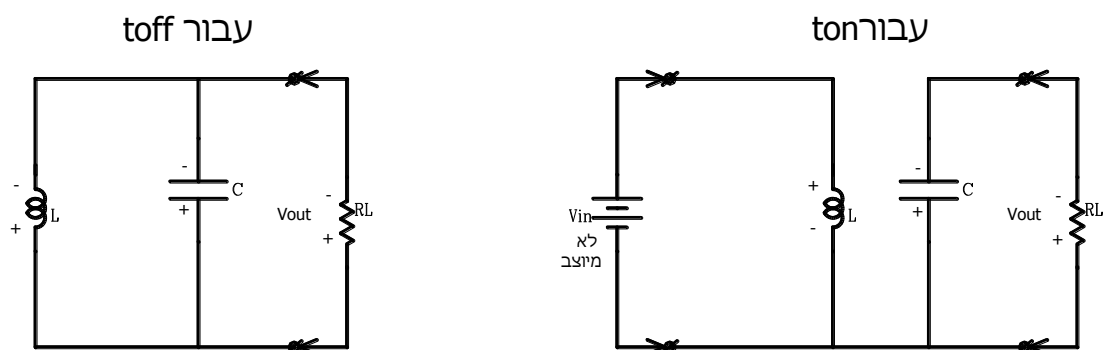
קיימת אפשרות לבנות ממיר ממותג DC to DC אשר:

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

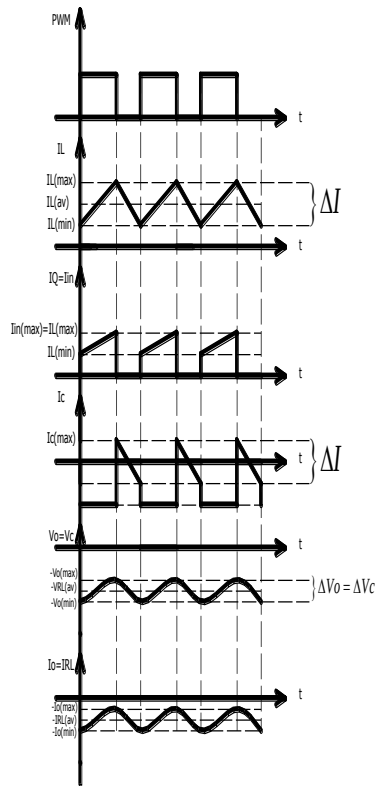
ממיר זה נקרא ממיר מעלה-מוריד מתח (Buck-Boost) כמתואר באיור הבא:



ניתוח המעגל:



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



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

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

$$Iin(max) = IL(max)$$

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

$$Vo(max) = Vc(max) = Vo + \frac{\Delta Vo}{2}$$

$$Vo(min) = Vc(min) = Vo - \frac{\Delta Vo}{2}$$

$$Io(max) = Io + \frac{\Delta Vo}{2 * RL}$$

$$Io(min) = Io - \frac{\Delta Vo}{2 * RL}$$

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:

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

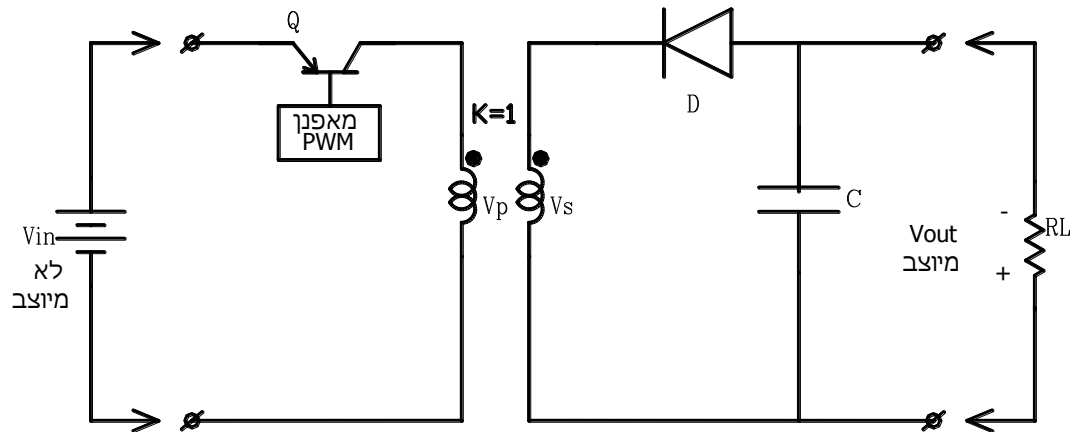
(עבודת בית מס' 9 בגמר לימוד פרק זה)

7.3.0 ממיר מעלה-מוריד מתח Buck-Boost עם שנאי Flyback

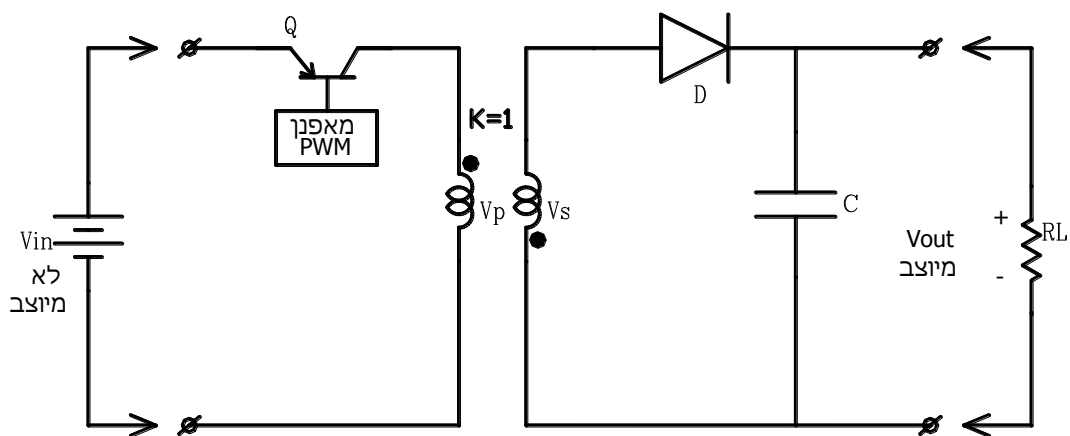
ממיר זה הינו ממיר מסוג Buck-Boost אך עם אפשרות לשינוי קוטביות מתח המוצא (באמצעות שינוי קוטביות השנאי)

7.3.1 ממיר Flyback עם קוטביות מתח מוצא הפוכה

ממיר זה כמתואר באיור הבא:



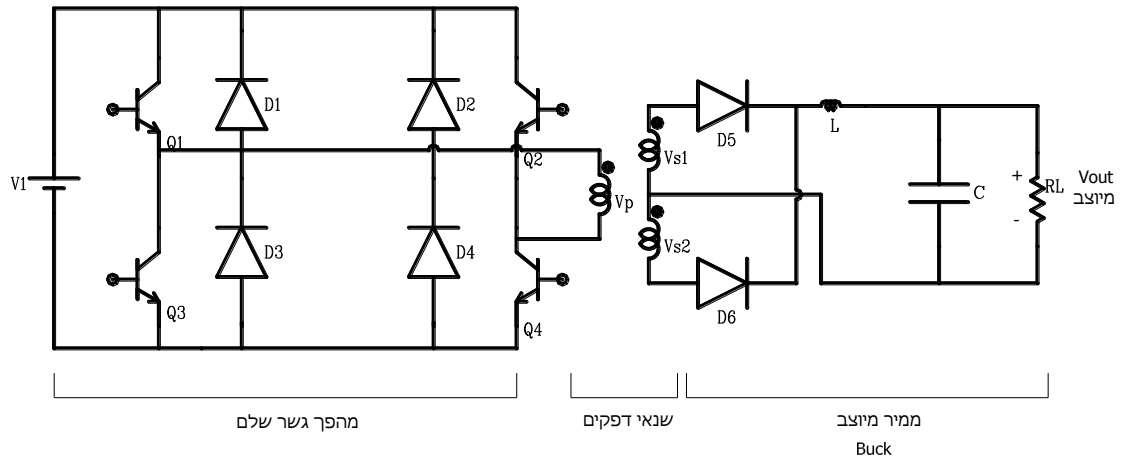
7.3.2 ממיר Flyback עם קוטביות מתח מוצא זהה לכניסה



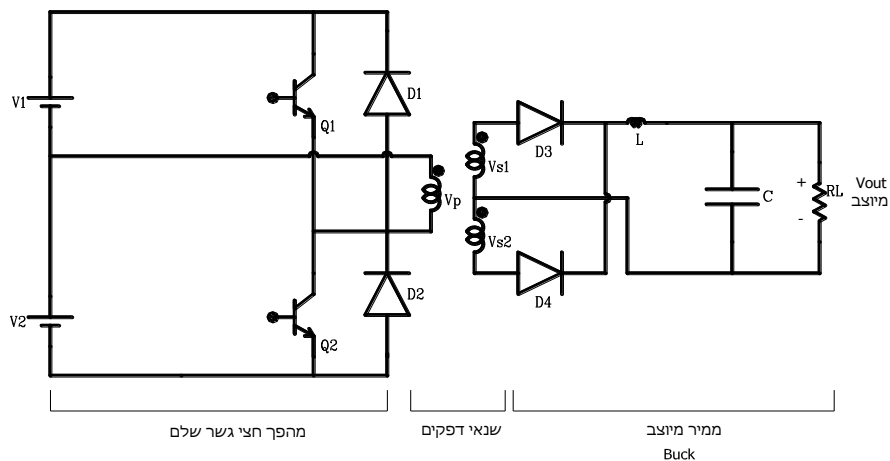
פרק 8-מעגלים שונים

8.1.0-מהפכים מבודדים ממיר ממותג מוריד מתח Buck

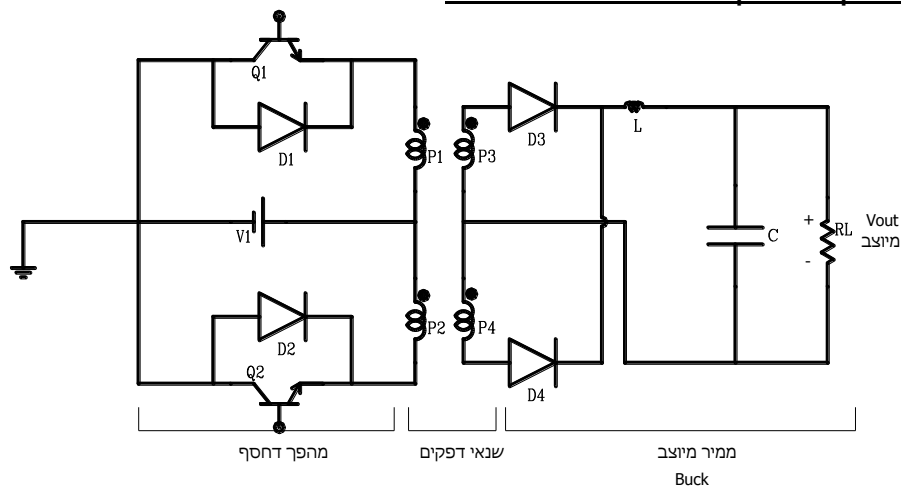
8.1.1-מהפך גשר שלם מבודד ממיר Buck



8.1.2-מהפך חצי גשר שלם מבודד ממיר Buck



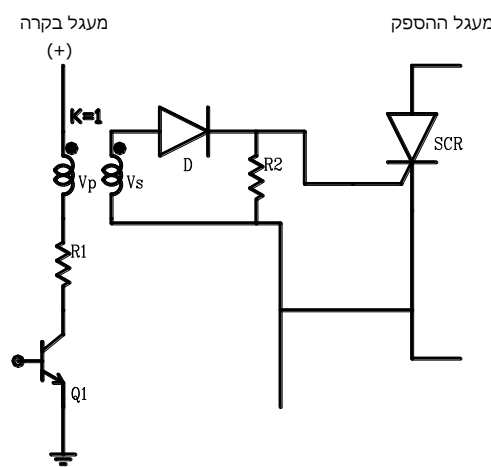
8.1.3-מהפך דח-סוף מבודד ממיר Buck



8.2.0- הפרדה חשמלית (גלונית) 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

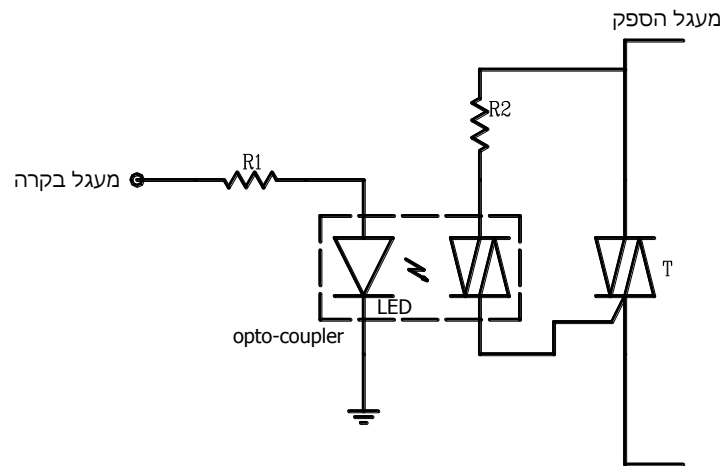
מעגל הצתת ה-SCR דרך שנאי דפקים כמתואר באיור הבא:



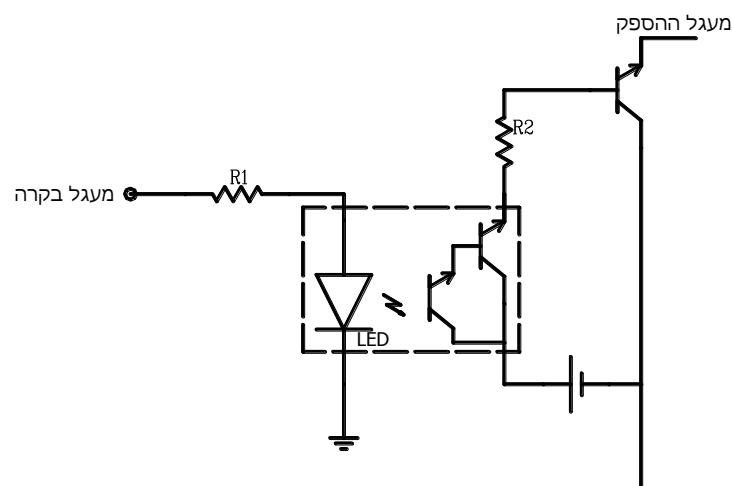
הסבר למעגל:

דופקי ההצתה 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. כמובן 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:

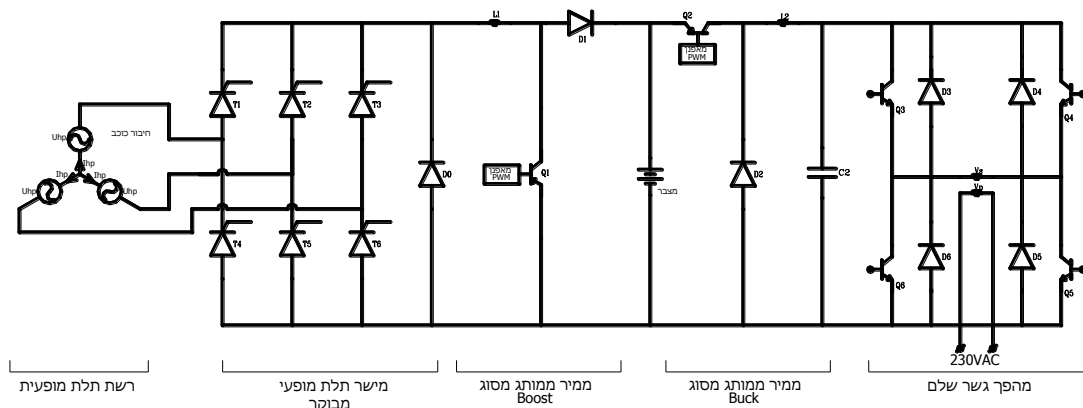
מקור רשת החשמל	מיישר	סוללת מצברי DC	מהפך AC/DC עם יציאת סינוס מדורג	עומס
-------------------	-------	-------------------	---------------------------------------	------

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:

$$Q = I * t$$