

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת חשמל



מעבדה 1,1 ח'

מעגלים פסיביים 02

חומר רקע
גרסה 2.12

קיץ 2018

מחברים: דודי בר-און, אברהם קפלן
על פי חוברת של יאן לרון מ 2009
21 עמודים

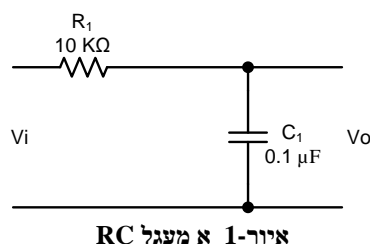
תוכן עניינים

הכרת המכשור, מעגלים אלקטרוניים בסיסיים

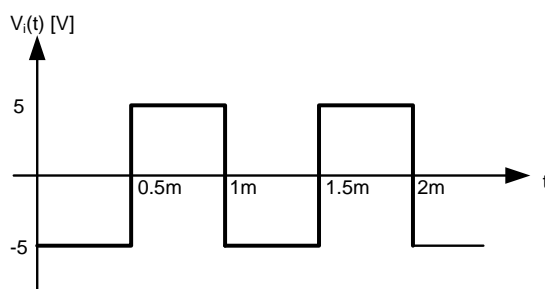
3	.....	1	מעגל RC
6	.....	2	דיודה - Diode
8	.....	2.1	מודלים ליניאריים לדיודה
10	.....	2.2	זמן התאוששות - recovery time
11	.....	3	מעגלי דיודות
11	.....	3.1	מיישר מתח חד דרכי
12	.....	3.2	מיישר מתח דו דרכי עם 4 דיודות (גשר גרץ)
13	.....	3.3	מיישר מתח עם מסנן
15	.....	3.4	מדידות גליות
17	.....	4	דיודת זנר – Zener Diode – חשמל בלבד
18	.....	4.1	מודלים ליניאריים לדיודת זנר
20	.....	5	ביבליוגרפיה

1 מעגל RC

באור-1 א מתואר מעגל RC:



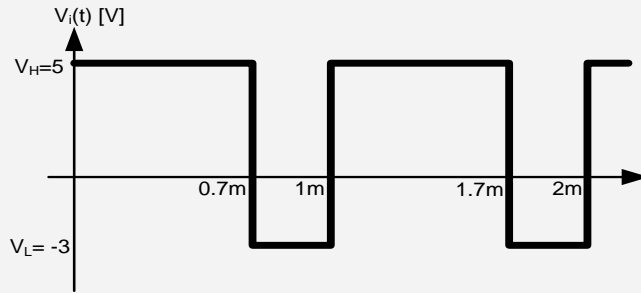
א. המעגל מוזן מגל ריבועי מחזורי המתואר באור-1 ב:



הדרכה:

שימוש במשוואות דפקים וחישוב מתח בכל מחזור ומחזור אינה הדרך הנכונה לפתרון. חשוב על צורת האות שאמור להתקבל במצב מתמיד – טעינה של הקבל במשך חצי מחזור ממתח V_L עד מתח V_H , פריקה במשך חצי מחזור ממתח V_H עד V_L , וחזור חלילה. ממשוואות הטעינה והפריקה ניתן למצוא את V_L ו- V_H .

כדי להמחיש את הנושא נבצע הדגמה חישובית. נניח שמתח המבוא למעגל RC הוא גל ריבועי המתואר ב:

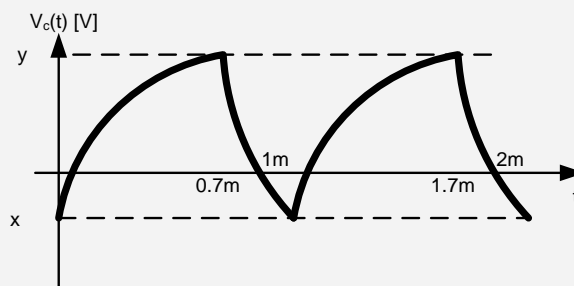


איור-1 ג מתח מבוא – דוגמת חישוב

נניח ערכי הרכיבים: $R = 15 K\Omega$, $C = 0.1 \mu F$.

כדי לחשב את מתח על פני הקבל ומתח על פני הנגד לא ניתן לבצע חישוב בדרך המקובלת, של חישוב המתח בכל מחזור ומחזור. זאת מכיוון שיתכן שנגיע למצב מתמיד רק לאחר מספר מחזורים רב. לכן, הדרך המקובלת לחשב את המתחים במצב מתמיד היא להניח כיצד נראית צורת הגל במצב מתמיד, ולחשב את הפרמטרים המאפיינים את צורת הגל. צורת הגל במצב מתמיד חייבת לקיים את התנאי שהמתח בתחילת המחזור ה-n שווה למתח בתחילת המחזור ה-n-1.

מתח על פני קבל משתנה בצורה רציפה: בתחום זמנים $0 \div 0.7m$ הקבל נטען (רואה מתח מבוא חיובי) ולכן מתח הקבל עולה בצורה מעריכית. בתחום זמנים $0.7m \div 1m$ הקבל מתפרק (רואה מתח מבוא שלילי) ולכן מתח הקבל יורד בצורה מעריכית, כמתואר באיור-1 ד:



איור-1 ד צורה משוערת של מתח הקבל במצב מתמיד

בתחום זמנים $0 < t < 0.7m$ הקבל מתחיל להטען ממתח התחלתי $V_c(0) = x$ לכוון מתח הספק $5V$, אך מספיק להטען רק עד מתח $V_c(0.7m) = y$ כעבור זמן של $0.7 msec$. קבוע הזמן של המעגל שווה ל:

$$\tau = R \cdot C = 15 K \cdot 0.1 \mu = 1.5 msec$$

לחישוב מתח על פני הקבל נשתמש בנוסחת הטעינה:

$$V_c(t) = V_\infty - [V_\infty - V_0] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ונקבל:

$$V_c(0) = x, V_c(\infty) = 5V, V_c(0.7m) = y, \tau = 1.5 msec$$

$$y = 5 - (5 - x) \cdot e^{-\frac{0.7m}{1.5m}} = 0.627 \cdot x + 1.8646$$

בתקופת זמן $0.7m < t < 1m$ הקבל מתפרק ממתח y לכוון מתח מבוא שלילי $-3V$. הפריקה נמשכת $0.3 msec$ ומתח הקבל מגיע למתח x.

נקבל:

$$V_c(0^*) = y, V_c(\infty) = -3V, V_c(0.3m^*) = x, \tau = 1.5msec \quad t^* = t - 0.7m$$

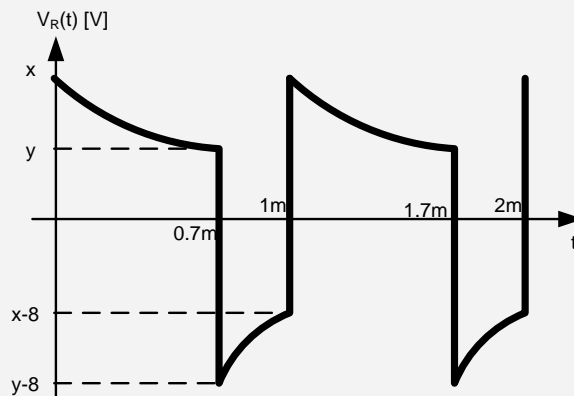
$$x = -3 - (-3 - y) \cdot e^{-\frac{0.3m}{1.5m}} = 0.819 \cdot y - 0.547$$

פתרון של שתי המשוואות נותן:

$$x = 2.0197V, \quad y = 3.131V$$

כדי לחשב את מתח הנגד ניתן להשתמש בקשר $V_i(t) = V_c(t) + V_R(t)$. אם לא היינו מחשבים את המתח על הקבל בנפרד, היה אפשר למצוא את המתח על הנגד כמתואר להלן.

המתח על פני הנגד במצב מתמיד מתואר באיור-1 ה:



איור-1 ה צורה משוערת של מתח הנגד במצב מתמיד

קפיצות במתח המבוא מועברות אל הנגד מכיוון ומתח על הקבל הוא תמיד רציף.

בתחום זמנים $0 < t < 0.7m$ מתח על פני הנגד מתחיל לרדת מערכית ממתח x לכוון 0V (במצב מתמיד הקבל נתק ולא זורם במעגל ולכן לא נופל מתח על פני הנגד). כעבור $t=0.7m$ מתח הנגד מגיע למתח y.

$$V_R(0) = x, V_R(\infty) = 0V, V_R(0.7m) = y, \tau = 1.5msec$$

$$y = 0 - (0 - x) \cdot e^{-\frac{0.7m}{1.5m}} = 0.6271 \cdot x$$

בתחום זמנים $0.7m < t < 1m$ מתח על פני הנגד מתחיל לעלות ממתח y-8 לכוון 0V. כעבור $t=0.3m$ מתח על פני הנגד מגיע ל-x-8 (לאחר קפיצה מתח הנגד מתחיל שוב ב-x):

$$V_R(0) = y - 8, V_R(\infty) = 0V, V_R(0.3m) = x - 8, \tau = 1.5msec$$

$$x - 8 = 0 - (0 - (y - 8)) \cdot e^{-\frac{0.3m}{1.5m}} = 0.818 \cdot (y - 8)$$

פתרון של שתי המשוואות:

$$x = 2.9803V \quad y = 1.868V$$

2 דיודה - Diode

דיודה היא הרכיב האלקטרוני הפשוט ביותר. הדיודה בנויה מצומת pn והדקים מתכתיים המחוברים לאזור n ולאזור p. הדק המחובר לאזור p נקרא אנודה Anode והדק המחובר לאזור n נקרא קתודה Cathode. הדיודה מוליכה בממתח קדמי: המתח בהדק אנודה חיובי יחסית למתח בהדק הקתודה. כאשר הופכים את קוטביות המתח, הדיודה נמצאת בממתח אחורי וזורם דרכה זרם רוויה אחורי (זרם זליגה) קטן מאוד. סימון מקובל של דיודה מתואר באיור-2 א:



הקשר בין מפל מתח V_D וזרם הזורם דרך הדיודה I_D נתון ע"י משוואת שוקלי:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{\eta \cdot K \cdot T}} - 1 \right)$$

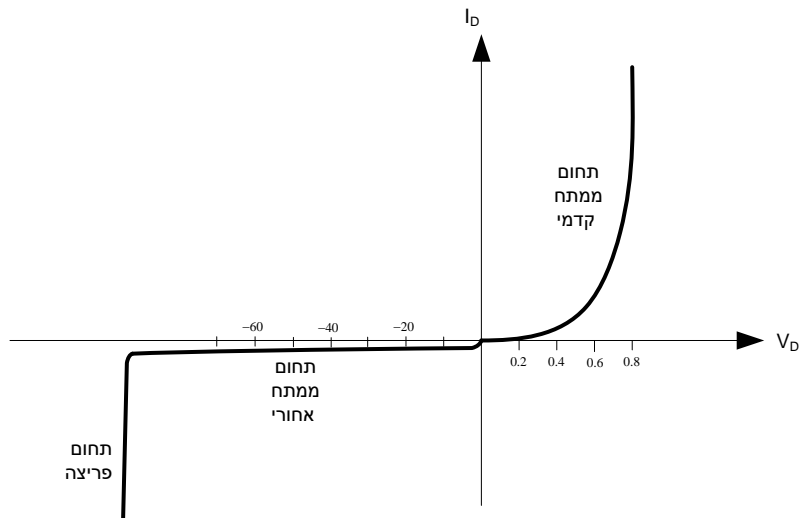
כאשר:

I_D	זרם הזורם דרך הדיודה (זרם חיובי מוגדר כזרם הזורם מאנודה לקתודה).
I_S	זרם רוויה אחורי (זרם נושאי מיעוט הזורם דרך הדיודה, מקתודה לאנודה, בממתח אחורי).
e	מספר טבעי 2.71....
q	מטען אלקטרון $q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$
η	מקדם. מקובל להניח $\eta = 2$ עבור סיליקון
K	קבוע בולצמן $K = 1.38 \cdot 10^{-23} J / ^\circ K$
T	טמפרטורה ב- $^\circ K$

בטמפרטורת חדר $T = 25^\circ C$ נוכל לרשום:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{38.9 \cdot V_D}{\eta}} - 1 \right)$$

אופיין דיודה $I_D = f(V_D)$ מתואר באיור-2 ב:



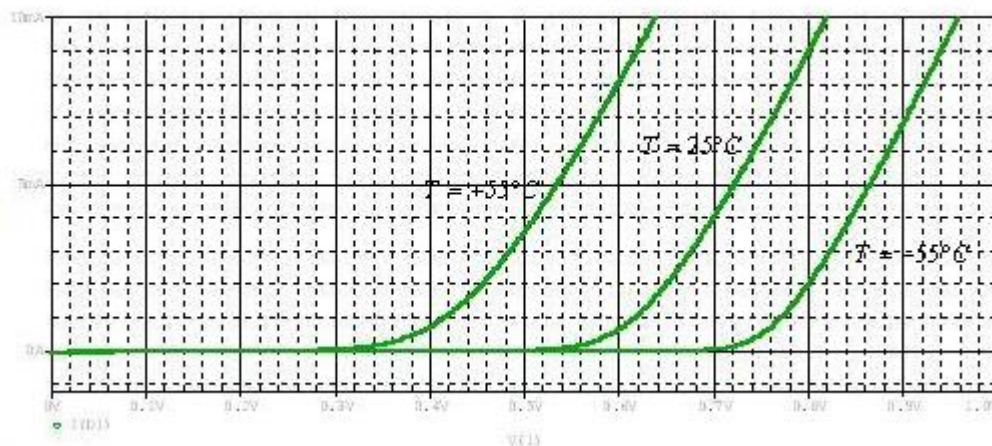
איור-2 ב אופיין זיודה

ברביע הראשון האופיין מתאר את התנהגות הדיודה בממתח קדמי. ניתן לראות שעבור שינויים קטנים של מתח מקבלים שינויים גדולים בזרם ולכן בתחום הקדמי התנגדות הדיודה נמוכה מאוד.

ברביע שלישי הקו האופקי מצביע על זרימת זרם זליגה קטן I_S בכוון הפוך (זרם שלילי). כאשר המתח האחורי מגיע לערך מתח פריצה, הדיודה נפרצת - תופעה המלווה בעליה חדשה של זרם וגורמת לשריפת הדיודה.

השפעת טמפרטורה

אופיין זיודה בטמפרטורות שונות מתואר באיור-2 ג:



איור-2 ג אופיין זיודה בטמפרטורות שונות

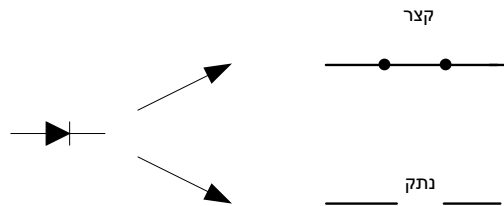
בממתח קדמי כאשר דרך הדיודה זורם זרם קבוע, עליית הטמפרטורה גורמת לירידת מפל מתח V_D בקצב של $-2mV/^\circ C$. בממתח אחורי רואים שלטמפרטורה יש השפעה גדולה מאוד על זרם רוויה אחורי I_S . נהוג להניח שזרם זה מכפיל את ערכו כל עליה של $10^\circ C$.

2.1 מודלים ליניאריים לדיודה

קירוב א' - דיודה אידיאלית

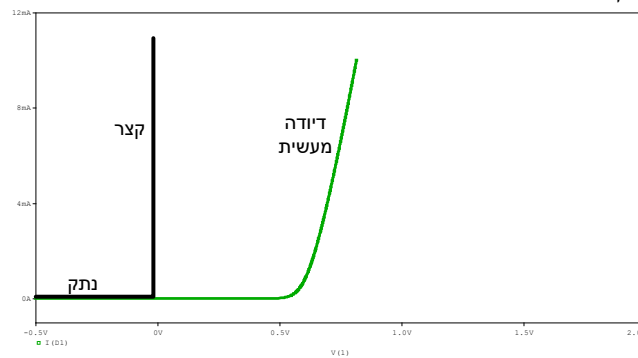
דיודה אידיאלית היא דיודה המהווה קצר בהולכה (כאשר ממתח הדיודה הוא ממתח קדמי) ונתק כאשר הממתח הוא ממתח אחורי.

ניתן להחליף את הדיודה במעגל תמורה כמתואר ב איור-2 ד:



איור-2 ד קירוב של דיודה אידיאלית

באיור-2 ה מתואר אופיין של דיודה מעשית ודיודה אידיאלית:

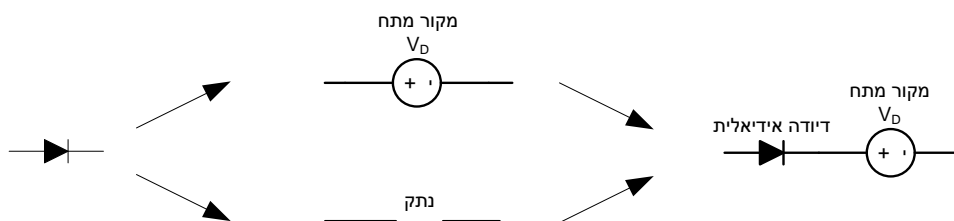


איור-2 ה אופיין דיודה מעשית ודיודה אידיאלית

שימוש עיקרי בקירוב זה נכון כאשר המתחים במעגל גבוהים ביחס למפל המתח על הדיודה שהוא כ- $0.7 V$.

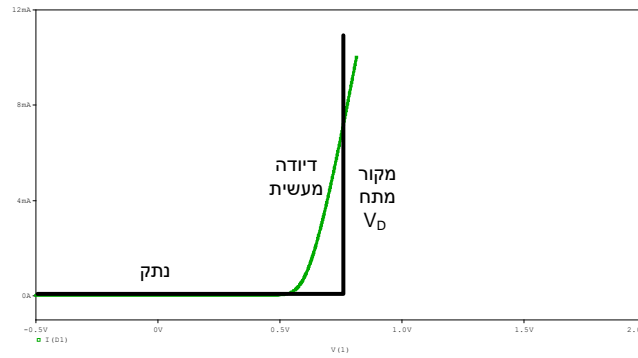
קירוב ב' - קירוב מתח קבוע

בקירוב זה מניחים שכאשר הדיודה מוליכה נופל על הדקיה מפל מתח קבוע המתנגד לזרם העובר דרך הדיודה. בממתח אחורי נניח שהדיודה מהווה נתק. ניתן להחליף את הדיודה במעגל תמורה המתואר ב איור-2 ו:



איור-2 ו קירוב מתח גבוה

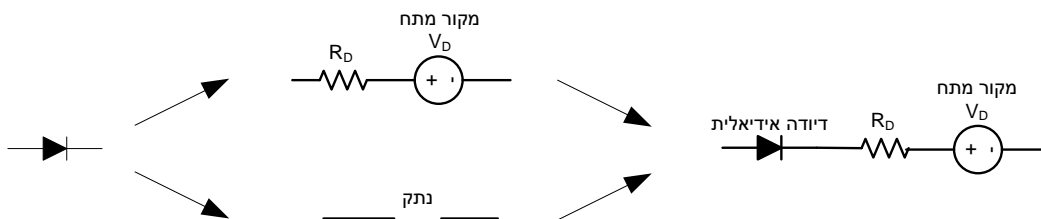
באיור-2 ז מתואר אופיין של דיודה מעשית ודיודה המיוצגת ע"י קירוב מתח קבוע:



איור-2 ז אופיין דיודה מעשית ודיודה עם קירוב מתח קבוע

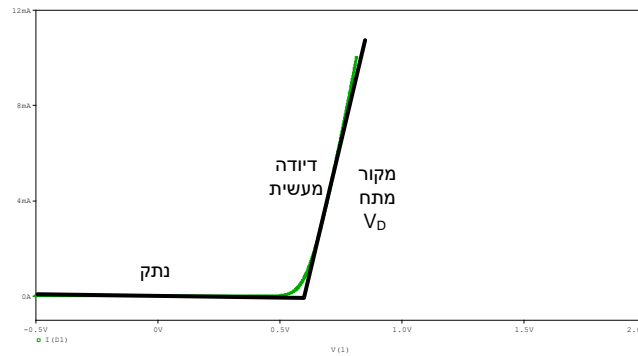
קירוב ג' - קירוב מתח קבוע והתנגדות טורית

בקירוב זה מניחים שכאשר הדיודה מוליכה ניתן לייצג אותה ע"י מקור מתח המתנגד לזרם העובר דרך הדיודה והתנגדות טורית. ניתן להחליף את הדיודה במעגל תמורה המתואר ב איור-2 ח:



איור-2 ח קירוב מתח קבוע והתנגדות טורית

באיור-2 ט מתואר אופיין של דיודה מעשית ודיודה המיוצגת ע"י קירוב מתח קבוע והתנגדות טורית:



איור-2 ט אופיין דיודה מעשית ודיודה עם קירוב מתח קבוע והתנגדות טורית

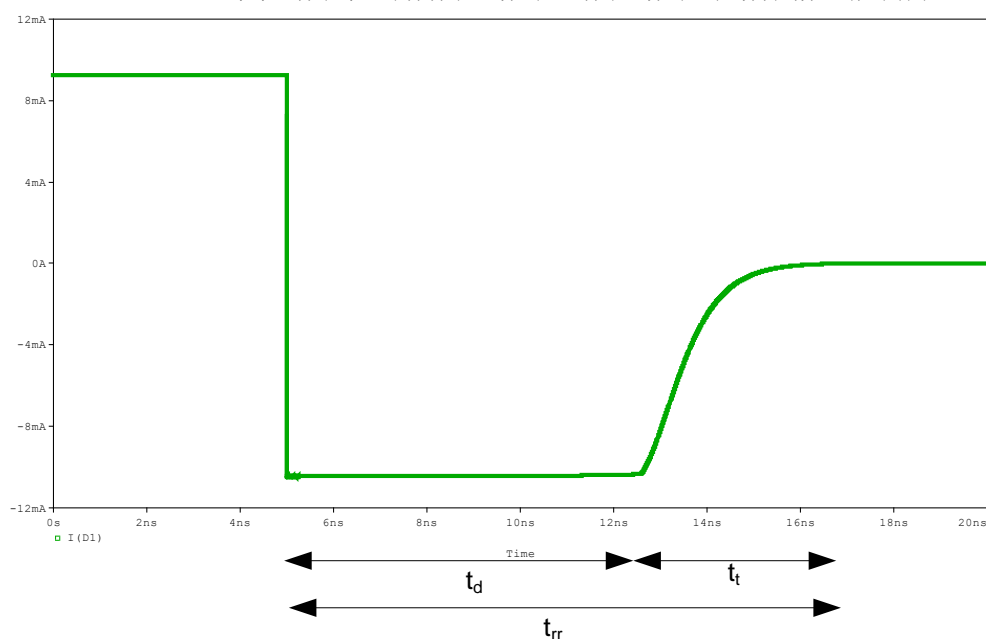
ניתן לבצע קירובים נוספים מדויקים יותר אך לרוב קירוב ג' מספק ומאפשר לקבל תוצאות קרובות לערכים מעשיים.

2.2 זמן התאוששות - recovery time

כאשר הדיודה נמצאת בממתח קדמי יש אוכלוסיה גדולה של אלקטרונים העוברים מאזור n לאזור p לכוון הקוטב החיובי של מקור המתח החיצוני ואוכלוסיה גדולה של חורים העוברים מאזור p לאזור n לכוון הקוטב השלילי של מקור המתח החיצוני. כאשר מחליפים באופן פתאומי את קוטביות הממתח, באופן רגעי באזור n יש אוכלוסיה גדולה של חורים ואילו באזור p יש אוכלוסיה גדולה של אלקטרונים. הזרם דרך הדיודה אינו מתאפס אלא מקבל ערך שלילי שערכו שווה לערך של הזרם החיובי שזרם. זרם זה נקרא זרם אחורי $I_{reverse}$ והוא יזרום לזמן t_d (הנקרא זמן אחסון - storage time) הדרוש לנושאי המיעוט לחזור לאזור המקורי (אלקטרונים לאזור n וחורים לאזור p). כאשר חלף זמן האחסון, הזרם יקטן לערך של זרם רוויה אחורי - הזמן הדרוש לפעולה זו נקרא זמן מעבר t_t (transition interval). בזמן זה מתרחשת טעינת קיבול הצומת. אופי השתנות הזרם הוא מעריכי. זמן התאוששות $t_{recovery}$ מסומן כ- t_{rr} ומוגדר כסכום של זמן אחסון וזמן מעבר:

$$t_{rr} = t_d + t_t$$

באיור-2 י מתואר זרם הדיודה כאשר הממתח משתנה ממתח חיובי למתח שלילי:



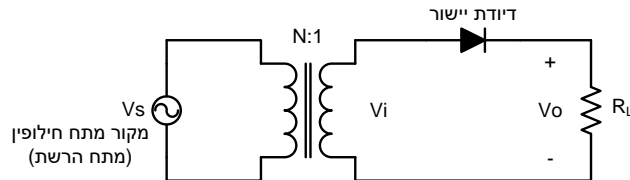
איור-2 י השתנות זרם הדיודה במעבר מהולכה לקטעון

3 מעגלי דיודות

3.1 מיישר מתח חד דרכי – מיישר חצי גל

מיישר מתח חד דרכי הוא מעגל אלקטרוני ההופך מתח חילופין בעל ממוצע אפס למתח חצי מיישר - מתח פועם.

מיישר מתח חד דרכי מתואר באיור-3 א:



איור-3 א מיישר מתח חד דרכי

השנאי מוריד את מתח המבוא שמקורו בדרך כלל במתח הרשת (230 V מתח פאזי בתדר 50 Hz), מכיוון ורוב ספקי הכוח המזינים מעגלים אלקטרוניים מפיקים מתחים נמוכים יחסית - עד עשרות וולט לכל היותר. בקירוב טוב היחס בין מפל המתח בליפוף ראשוני למפל המתח בליפוף משני מוגדר ע"י יחס הליפופים:

$$V_i = V_s \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

כאשר N_p - מספר הליפופים בצד הראשוני של השנאי.

N_s - מספר הליפופים בצד המשני של השנאי.

המתח בליפוף משני של השנאי נתון ע"י:

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

כאשר V_m הוא אמפליטודת המתח.

ננתה את המעגל בהנחה שהדיודה אידיאלית. כאשר מתח $V_i(t)$ חיובי (מחצית ראשונה של המחזור),

הדיודה מוליכה ומתח המוצא $V_o(t)$ שווה למתח המקור $V_i(t)$:

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

במחצית שנייה של גל המבוא, המתח במבוא שלילי ולכן הדיודה נמצאת בממתח אחורי ולא מוליכה. מכיוון ולא זורם זרם במעגל, מתח המוצא שווה לאפס. מתח מבוא שלילי נופל על הדיודה ולכן יש לדרוש שהדיודה תעמוד במתחים אלו.

נוכל לסכם:

$$V_o(t) = \begin{cases} V_m \cdot \sin(\omega t) & 0 < \omega t < \pi \\ 0 & \pi < \omega t < 2 \cdot \pi \end{cases}$$

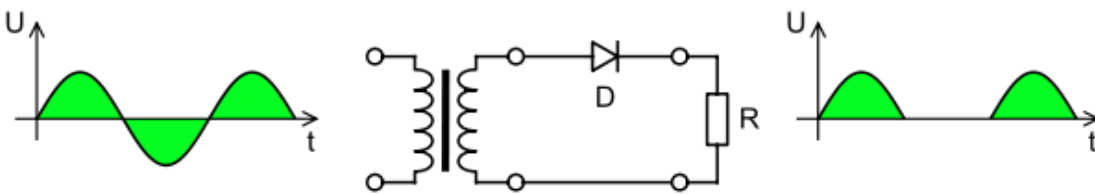
ערכו הממוצע של מתח מוצא $\overline{V_o}$ נתון ע"י:

$$\overline{V_o} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi V_m \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi}$$

ערכו היעיל של מתח המוצא $V_{o(rms)}$ נתון ע"י:

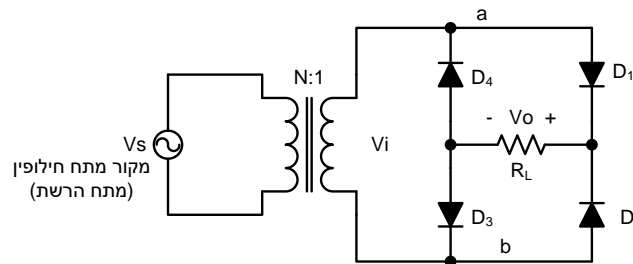
$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi [V_m \cdot \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} = \frac{V_m}{2}$$

החיסרון הגדול של מיישר חצי גל הוא הערך הממוצע הנמוך יחסית של מתח המוצא (חצי המחזור השלילי של הגל אינו מנוצל).
חשוב זה הוא מקורב ומזניח את מפל המתח על הדיודה, להוספת מפל המתח יש לשים לב שהמתח על העומס קטן יותר ושכחלק מהזמן המתח הוא אפס ואינטגרל מבוצע רק בחלקים שהדיודה מוליכה.



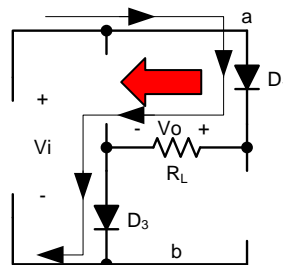
3.2 מיישר מתח דו דרכי עם 4 דיודות (גשר גרץ) – מיישר גל מלא

מיישר מקובל ביותר במעגלים אלקטרוניים הוא מיישר הבנוי מ-4 דיודות כמתואר באיור-3 ב:



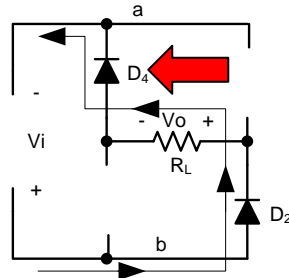
איור-3 ב מיישר דו דרכי עם 4 דיודות

כאשר מתח מבוא V_i חיובי, המתח בנקודה a גבוה מהמתח בנקודה b וזרם זורם מנקודה a לנקודה b דרך דיודה D_1 , נגד עומס R_L , דיודה D_3 כמתואר באיור-3 ג:



איור-3 ג זרימת זרם במיישר דו דרכי - חצי מחזור הראשון

כאשר מתח מבוא V_i שלילי, המתח בנקודה b גבוה מהמתח בנקודה a. הזרם זורם מנקודה b לנקודה a דרך דיודה D_2 , נגד עומס R_L , דיודה D_4 כמתואר באיור-3 ד:



איור-3 ד זרימת זרם במיישר דו דרכי - חצי מחזור השני

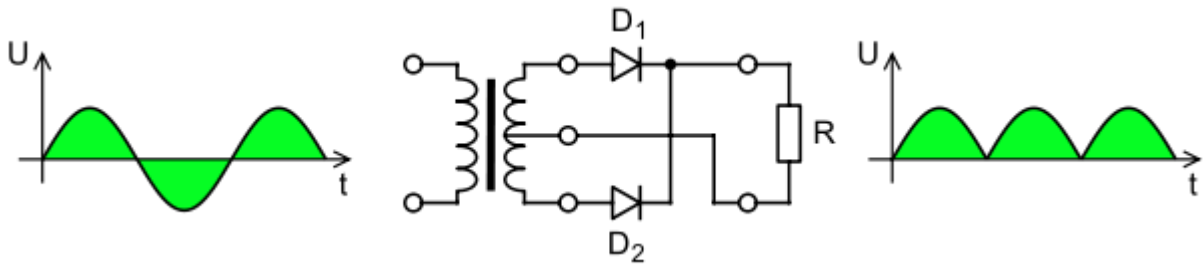
הזרם זורם דרך נגד העומס מימין לשמאל גם בחצי ראשון של המחזור וגם בחצי השני של המחזור ולכן מתח המוצא $V_o(t)$ הוא תמיד חיובי. המתח המתקבל הוא גל סינוס מיושר המורכב משני חצאי גל סינוס חיוביים.

ערכו הממוצע של מתח מוצא $\overline{V_o}$ נתון ע"י:

$$\overline{V_o} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}$$

ערכו היעיל של מתח המוצא $V_{o(rms)}$ נתון ע"י:

$$V_{o(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

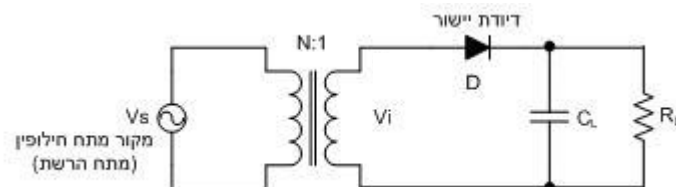


שימו לב למפל המתח על שתי דיודות

3.3 מיישר מתח עם מסנן

הגל המתקבל במוצא של מייצב מתח הוא מתח פועם עם ממוצע חיובי. הוספת מסנן המסלק רכיבי ac יהפוך את הגל הפועם לגל מיושר עם גליות (רכיב ac, ripple) נמוכה. ניתן לבנות מסננים בעזרת קבלי C, רשתות π עם שני קבלים ונגד או לבנות מסנן עם סליל Choke טורי.

המסנן הנפוץ ביותר הוא מסנן המורכב מקבל המתחבר במקביל לעומס. מיישר חצי גל עם מסנן קבל מתואר באיור-3 ה:



איור-3 ה מיישר חצי גל עם מסנן קבל

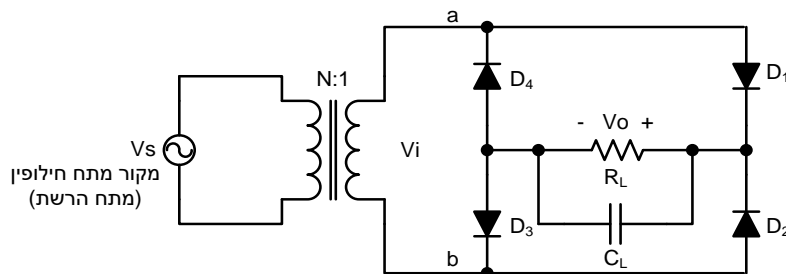
במחזור הראשון הדיודה מוליכה והקבל נטען מיידית דרך קבוע זמן $(R_L \parallel R_D) \cdot C_L$. קבוע זמן זה הוא קטן מאוד - התנגדות הדיודה R_D בהולכה נמוכה מאוד. מתח המוצא עוקב אחרי העלייה במתח המבוא. כאשר מתח המבוא מתחיל לרדת נוצר מפל מתח הפוך על הדיודה והיא מפסיקה להוליך. מעגל המורכב מנגד עומס R_L וקבל C_L מנותק מהמיישר והקבל מתחיל להתפרק דרך נגד R_L . אם נניח שקבוע זמן החדש $R_L \cdot C_L$ גדול, הפריקה תהיה כמעט ליניארית. כאשר מתח המבוא במחזור הבא עולה מעל מתח המוצא, הדיודה מתחילה להוליך והקבל נטען שוב למתח המרבי.

ערכו של מתח מוצא ממוצע שווה ל:

$$\overline{V_o} = V_m - \frac{\Delta V}{2} = V_m - \frac{I_{DC}}{2 \cdot C_L \cdot f}$$

מיישר גל שלם עם מסנן קבל

מיישר גל שלם עם מסנן קבל מתואר באיור-3 ו:



איור-3 ו מיישר גל שלם עם מסנן קבל

במיישר גל שלם תדר אות המוצא V_o הוא $2 \cdot f$, הקבל מתפרק זמן קצר יותר ולכן הגליות של מתח המוצא תהיה נמוכה יותר.

ערכו של מתח מוצא ממוצע שווה ל:

$$\overline{V_o} = V_m - \frac{\Delta V}{2} = V_m - \frac{I_{DC}}{4 \cdot C_L \cdot f}$$

במיישרים עם מסנן מקובל לתת אומדן לטיב הסינון ע"י חישוב מקדם האדווה γ . מקדם אדווה מוגדר כיחס בין הערך היעיל של מתח חילופין ומתח הישר המרכיבים את מתח המוצא V_o :

$$\gamma = \frac{V_{o(rms)}}{V_{o(DC)}}$$

מקדם אדווה במיישר דו דרכי עם קבל שווה ל:

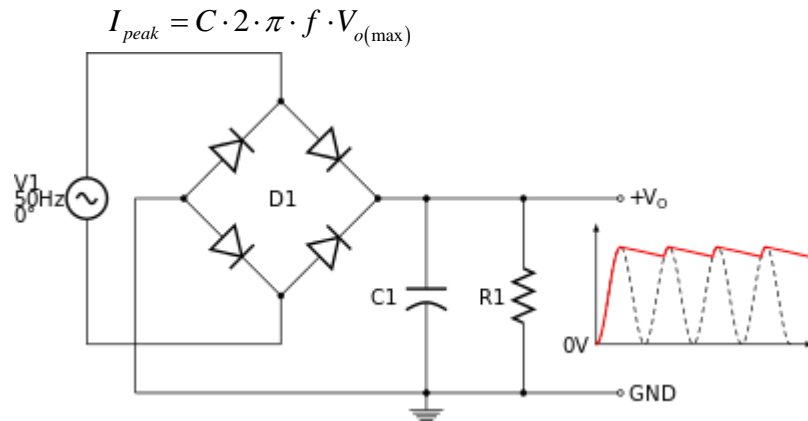
$$\gamma = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot C_L \cdot R_L}$$

כאשר ערכו היעיל של מתח החילופין במתח המוצא שווה ל:

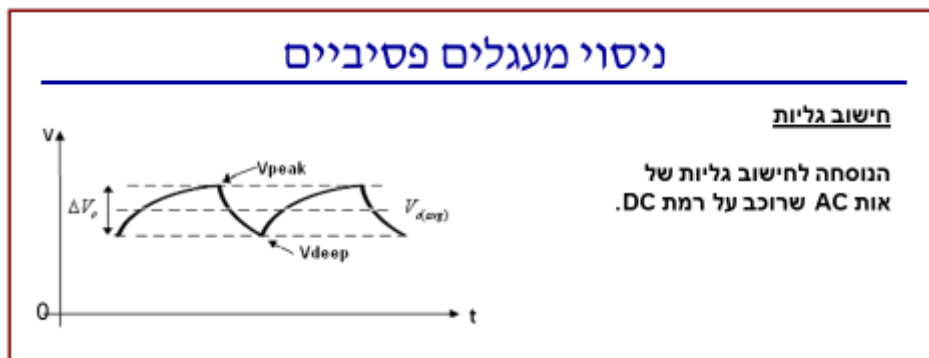
$$V_{o(ac)rms} = \frac{I_{DC}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot C}$$

ערכו המרבי של זרם במחזור הראשון

מתוך איורים המתארים את צורות הגלים במיישרים עם מסנן קבל רואים שהזרם במחזור הראשון גדול מאוד יחסית לשאר המחזורים. במחזור הראשון הקבל אינו טעון וברגע הראשון מהווה קצר. ערכו המקורב של זרם מרבי במחזור הראשון שווה ל:



3.4 מדידות גליות



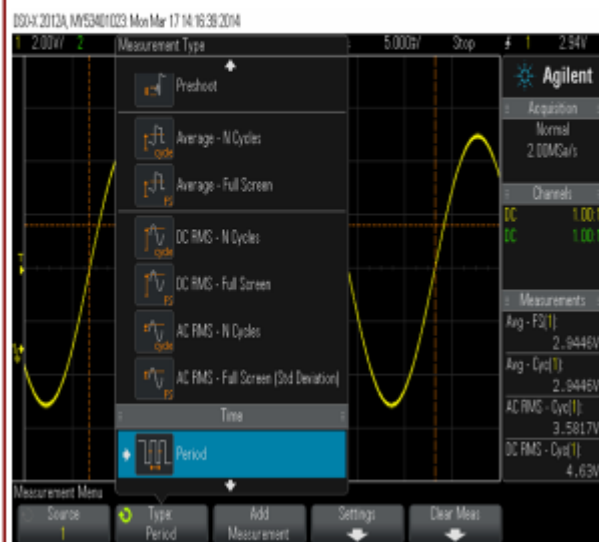
$$r = \frac{RMS_{AC}}{AVG_{DC}}$$

למידה בעזרת סקופ ניתן לבחור:

1. מדידת AC או DC
2. בחירת צימוד הכניסה AC או DC
3. מדידת ממוצע או RMS
4. מדידה על מספר שלם של מחזורים או על כל המסך

ניסוי מעגלים פסיביים

מידת ממוצע (Average) וערך יעיל (RMS) ע"י הסקופ



DC RMS

אם נדרש למדוד RMS של האות כולו, רכיב DC + רכיב AC.

AC RMS

אם נדרש למדוד RMS של רכיב AC בלבד.

Full Screen

הסקופ מבצע את המדידה על כל דגימות האות המופיעות על המסך – אות DC.

N Cycles

הסקופ מחשב את הגודל הנדרש על מספר שלם של מחזורים – אות AC.

6

4 דיודת זנר – Zener Diode – חשמל בלבד

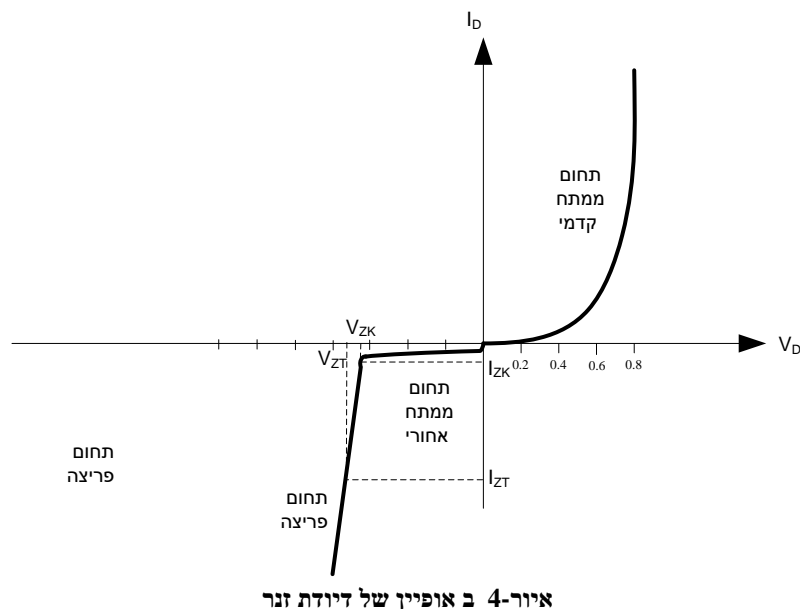
ראינו שבדיודות רגילות תחום פריצה אחורי מאופיין ע"י שינויים גדולים מאוד בזרם תוך שמירה על מתח כמעט קבוע. בדיודות רגילות, כניסה לתחום פריצה מסתיימת בנזק בלתי הפיך לרכיב.

בנוסף לדיודות רגילות קיימת משפחת דיודות מיוחדות הנקראות דיודות זנר. דיודות אלה נפרצות במתח אחורי נמוך יחסית ואופייני לכל דיודה. בניגוד לדיודה רגילה, דיודות אלה אינן ניזוקות בכניסתן לתחום הפריצה (כל עוד מגבילים את ההספק). המתח על הדיודה נשאר כמעט קבוע ולכן דיודות זנר יכולות לשמש כמקור מתח ייחוס ולהשתלב במעגלי ייצוב מתח.

סימון דיודת זנר נתון באיור 4-א:



אופיין של דיודת זנר מתואר באיור 4-ב:



ניתן לחלק את האופיין ל:

- תחום קדמי בו $V_{AC} > 0$. בתחום זה דיודת זנר מתנהגת בצורה דומה לדיודה רגילה.
- תחום אחורי (תחום קטעון) בו $V_Z < V_{AC} < 0$. בתחום זה הדיודה אינה מוליכה וזורם דרכה זרם זליגה בלבד.
- תחום הפריצה $V_{AC} < V_Z$. בתחום זה הדיודה נפרצת. התנגדות הדיודה בתחום הפריצה נמוכה מאוד ולכן שינויים גדולים בזרם הזורם דרכה מלווים בשינויים קטנים מאוד במפל מתח על פניה.

מתח V_Z אופייני בדיודות זנר יכול לנוע ממספר וולטים לעשרות וולטים.

לדיודת זנר יש מספר פרמטרים אופייניים:

נקודת ברכ knee point - נקודה זו מהווה גבול בין תחום הקטעון לתחום הפריצה. בנקודה זו מגדירים את מתח V_{ZK} , שהוא מתח מינימלי המפריד בין תחום הקטעון ותחום הפריצה. זרם I_{ZK} הוא זרם מינימלי הדרוש לפריצת דיודה. יצרנים רבים מציינים את התנגדות הדיודה בתחום הברך:

$$R_{ZK} = \left. \frac{dV_z}{dI_z} \right|_{knee_point}$$

בתחום הפריצה מקובל להגדיר נקודה אופיינית הנקראת test point. בנקודה זו ההספק המתפזר בדיודה שווה ל- $\frac{1}{4}$ מההספק המרבי:

$$P_T = \frac{1}{4} \cdot P_{max}$$

בנקודה זו מגדירים את ההתנגדות הדינמית של הדיודה בתחום הפריצה:

$$R_{ZT} = \left. \frac{dV_z}{dI_z} \right|_{test_point}$$

פרמטר נוסף הוא יכולת פיזור הספק P_{Zmax} . הספק זה מוגדר לרוב בטמפרטורה $25^\circ C$.

פרמטר נוסף של הדיודה הוא הדיוק Tolerance. מתח הפריצה של דיודת זנר אינו מדויק והיצרן מציינ מהו מתח פריצה מינימלי ומכסימלי.

מקדם טמפרטורה Temperature Coefficient T_c . נתון זה מבוטא לרוב באחוזים:

$$TC[\%] = \frac{V_z / V_{ZT}}{T} \cdot 100[\% / ^\circ C]$$

מקדם זה יכול להיות חיובי או שלילי. גודלו תלוי אך ורק במתח פריצה V_{BK} . מתברר שבדיודות בעלות מתח פריצה קטן מ-6 V מקדם TC הוא שלילי, כלומר עליית טמפרטורה גורמת לירידת מתח הפריצה. במתחי פריצה מעל 6 V מקדם זה חיובי כלומר עלייה בטמפרטורה גורמת לעלייה במתח הפריצה.

זאת הסיבה שבמעגלים רבים נפגוש דיודות זנר בעלות מתח פריצה קרוב ל- 6 V, רגישות הדיודות לשינוי טמפ' סביבה תהיה נמוכה.

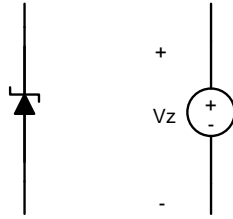
4.1 מודלים ליניאריים לדיודת זנר

ראינו שהקשר המדויק בין הזרם והמתח בדיודה אינו מאפשר לבצע חישובים ידניים. בדומה לדיודה רגילה, משוואות של דיודת זנר מורכבות ולכן גם כאן נחליף את הדיודה במעגל ליניארי.

נתייחס רק למעגל תמורה בתחום הפריצה. בתחום הולכה קדמית, מודל דיודת זנר יהיה זהה למודלים שתוארו לדיודות רגילות.

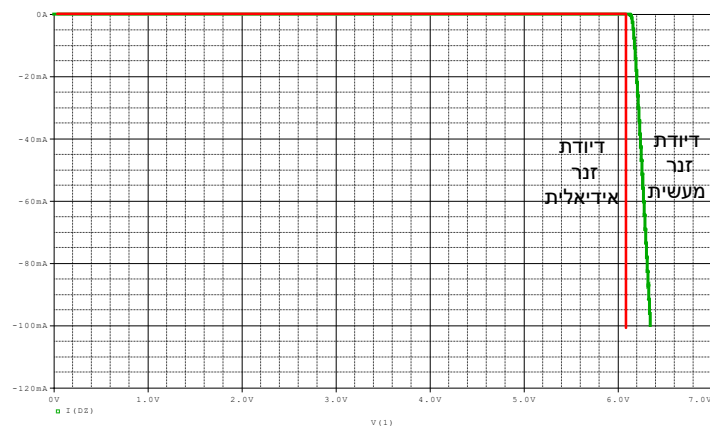
קירוב א' - דיודת זנר אידיאלית

אם נניח שבתחום הפריצה התנגדות הדיודה אידיאלית, נוכל להחליף את הדיודה במקור מתח שערכו V_z כמתואר באיור-4 ג:



איור-4 ג קירוב של דיודת זנר אידיאלית

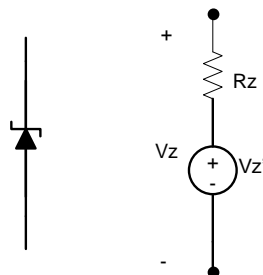
באיור-4 ד מתוארים אופייניים של דיודת זנר מעשית וקירוב ליניארי:



איור-4 ד אופיין דיודה זנר מעשית ודיודת זנר אידיאלית

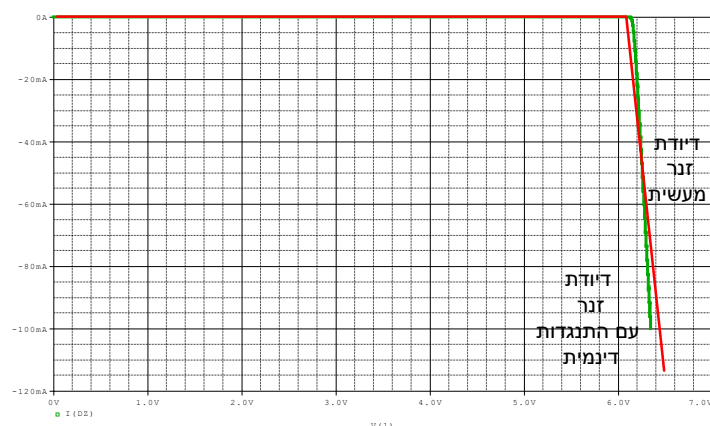
קירוב ב' - דיודת זנר עם התנגדות דינמית

ראינו באופייני דיודת זנר שבתחום הפריצה המתח משתנה (מעט) עם שינויי הזרם. זאת הודות להתנגדות דינמית של הדיודה בתחום הפריצה. מעגל ליניארי המתאר את דיודת זנר בתחום הפריצה באופן מדויק יותר מתואר באיור-4 ה:



איור-4 ה קירוב של דיודת זנר עם התנגדות דינמית

באיור-4 ו מתוארים אופייניים של דיודת זנר מעשית וקירוב ליניארי:



איור-4 ו אופיין דיודה זנר מעשית ומעגל תמורה של דיודת זנר הכולל התנגדות

5 ביבליוגרפיה

תורת החשמל:

- תורת החשמל – שיטות פתרון מעגלי זרם ישר – יאן לרון – הוצאת שורש 2002

רשתות RC, RL:

- אלקטרוניקה ספרתית – ספר לימוד - חלק א' – מהדורה 2 - יאן לרון - הוצאת שורש 2003
- אלקטרוניקה ספרתית – תרגילים – חלק א' – יאן לרון – הוצאת שורש 1999
- Engineering Circuit Analysis – William Hayt, Jack Kemmerly – 3-ed Mc-Graw Hill

דיודות, דיודות זנר

- אלקטרוניקה תקבילית – מבוא למוליכים למחצה, מעגלי דיודות ודיודות זנר - יאן לרון - הוצאת שורש 2002
- Electronic Devices and Circuit Theory – 10-ed – Robert Boylestad & Louis Nashelsky – Prentice Hall
- Microelectronic Circuit -5-ed – Sedra & Smith – Saunders College Publishing
- Electronics -2ed- Allan R. Hambley – Prentice Hall
- Electronics Circuit Analysis and Design – Donald A. Neamen – Mc-Graw Hill
- Electronic Devices – Steven R. Fleeman – Prentice Hall
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>

תורת המדידות:

- Electronic Instrumentation and Measurement Techniques – W.D.Cooper & A.D. Helfrick – 3ed –Prentice –Hall
- Electronics Test Instrument – 2ed – Robert.A. White – Prentice Hall

