

1 חומר רקע ותיאוריה

1.1 חזרה קצרה על סלילים וקבלים

כדי להבין את פעולת הממיר הממוגג צריך להבין את התנהגות הסלילים והקבלים בהפעלת מתח עליהם ותכונות אגירת האנרגיה שלהם.

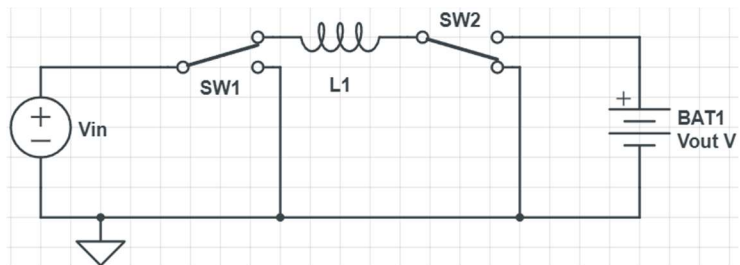
סליל יתנהג לפי $\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L}$ והוא התקן אוגר אנרגיה מגנטית לפי $E_L = \frac{1}{2} LI^2$ (הסליל קצר ב DC)

קבל יתנהג לפי $\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_C}{C}$ והוא התקן אוגר אנרגיה חשמלית לפי $E_C = \frac{1}{2} CV^2$ (הקבל נתק ב DC)

במקרה האידיאלי כאשר מחברים מתח ישר לקבל או סליל, הקבל יתנהג כנתק וייטען למתח קבוע והסליל כקצר יעביר זרם קבוע דרכו, ואפשר לראות מהנוסחאות ששינוי פתאומי בזרם/מתח ה סליל/קבל יגרום למפל מתח גבוהה מאוד על הסליל וזרם גבוהה מאוד דרך הקבל, ערכים אינסופיים במקרה האידיאלי.

לדוגמה אם ננתח את המעגל הבא, נניח אנו רוצים לטעון את הבטריה (שמתח קבוע) בעזרת מקור מתח וסליל, במצב המתגים הראשון (זמן כולל של t_1) אנו נטען את הסליל וכאשר עוברים למצב השני אנו נפרוק אנרגיה אשר

נטענה בסליל בבטריה (זמן כולל של t_2)

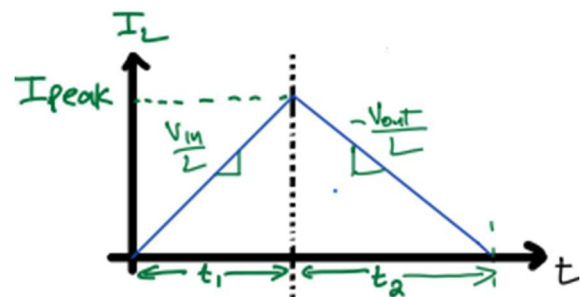


איור 1 מעגל כללי של סליל לטעינה ופריקה

האנרגיה הכוללת שנטענה בסליל היא

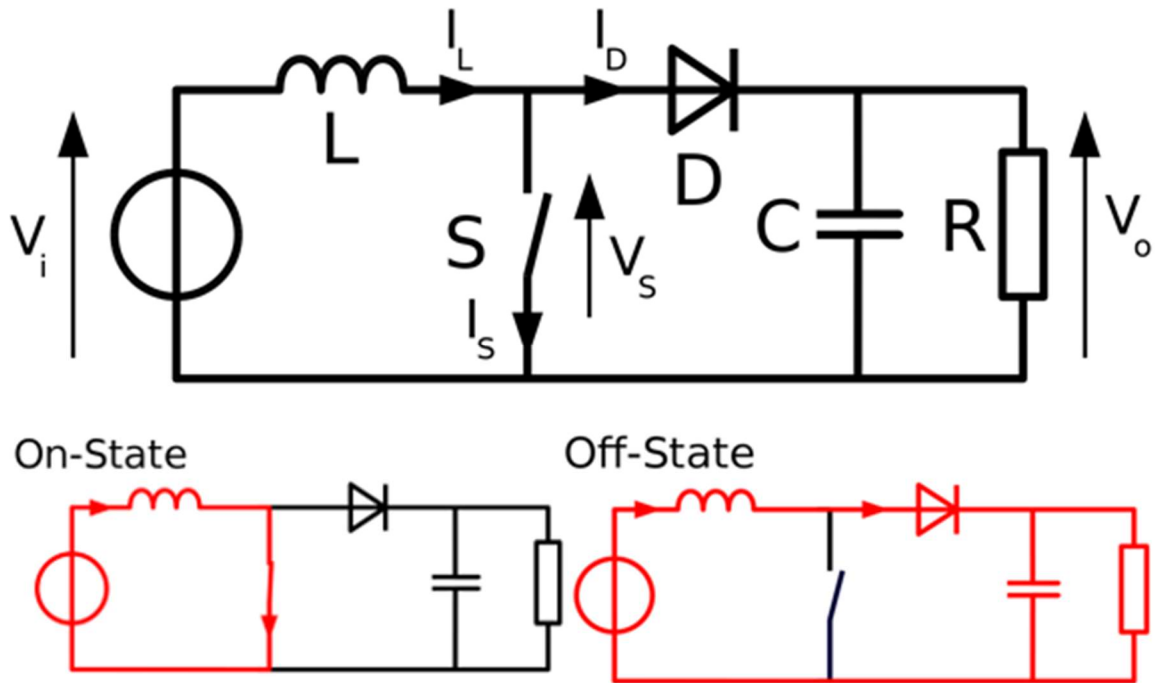
$$E_L = \frac{1}{2} LI_{peak}^2 = \frac{1}{2} L \left(\frac{V_{in}}{L} t_1 \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{V_{in}^2}{L} t_1^2$$

והזרם דרך הסליל הוא



ניתן גם להראות התנהגות דומה עבור קבל ומקור זרם, מה לגבי האנרגיה? האם נוכל להזריק אנרגיה לסליל ולטעון אותו? לא, כי אנו נשרוף את המעגל ובאופן מעשי הסליל יגיע לרוויה מהר מאוד ויתנהג כקצר, בכל שימוש בסלילים ובקבלים נדאג שמתקיים איזון אנרגטי עליהם ← האנרגיה הנטענת שווה לאנרגיה הנפרקת דרכם!

1.2 ניתוח פעולת ממיר מטופולגיית BOOST אידיאלית



איור 2 טופולגיה כללית של ממיר BOOST , ומצבי פעולת המתג

משתמשים בממיר זה להמרת $DC \rightarrow DC$.

כאשר המתג סגור (On-State) בסליל עובר זרם והוא נטען באנרגיה מגנטית במצב זה הדיודה בקיטעון עקב הממתח האחורי שנופל עליה, אחרי שהמתג נפתח (Off-State) הסליל יתנגד לשינויים במעבר הזרם דרכו ועל הדיודה יפול ממתח קדמי אשר יגרום לה להוליך.

אפשר להסתכל על פעולת המתג – כשהוא סגור טוענים את הסליל והקבל פורק דרך התנגדות המוצא, וכשהמתג נפתח מעבירים אנרגיה מהסליל לקבל ולמוצא.

שימו לב, כשהמתג נפתח (Off-State) המעגל הוא מסנן מעביר נמוכים אשר מסנן את כל ההרמוניות הגבוהות אשר נוצרו מהמיתוגים.

1.2.1 ניתוח הממיר BOOST במצב פעולה מתמשך – Continuous Conduction Mode (CCM)
 יש איזון אנרגטי במעגל כלומר האנרגיה הנטענת הכוללת שווה לאנרגיה הנפרקת במוצא במשך מחזור (כי אחרת כל הזמן נזריק אנרגיה למעגל...), מסיבה זאת במצב יציב – ממוצע המתח על הסליל מתאפס לאורך מחזור וממוצע הזרם דרך הקבל מתאפס לאורך מחזור.

בניתוח ממירים ממותגים מסמנים את יחס זמני העבודה (Duty Cycle)

$$\bullet \quad D_{on} \leftarrow \text{את היחס בין זמן שבו המתג סגור לבין זמן מחזור המיתוגים כלומר } D_{on} = t_{on} / T_s$$

$$\bullet \quad D_{off} \leftarrow \text{את היחס בין זמן שבו המתג פתוח לבין זמן מחזור המיתוגים } D_{off} = t_{off} / T_s$$

$$\text{מתקיים } T_s = t_{on} + t_{off} \leftrightarrow D_{on} + D_{off} = 1$$

ננתח את המעגל בהנחה שהכל אידיאלי:

ממוצע המתח על סליל שווה לאפס לאורך מחזור:

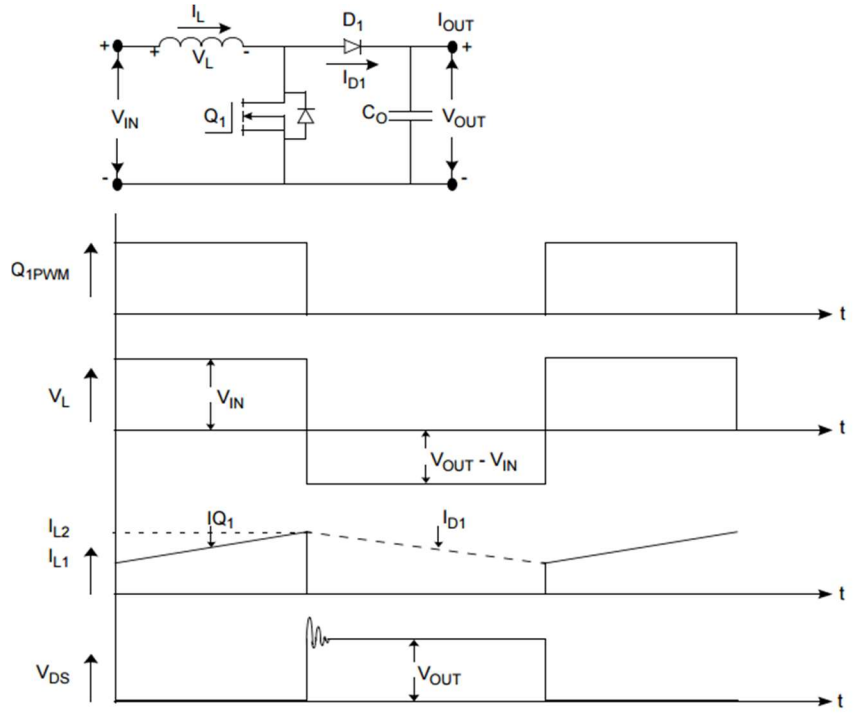
$$\langle v_L \rangle = 0 \rightarrow D_{on} (V_{in}) + D_{off} (V_{in} - V_{out}) = 0 \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{D_{off}} = \frac{1}{1 - D_{on}}$$

ממוצע הזרם דרך קבל שווה לאפס לאורך מחזור:

$$\langle i_C \rangle = 0 \rightarrow D_{on} (-I_{out}) + D_{off} (I_L - I_{out}) = 0 \rightarrow I_L = \frac{I_{out}}{D_{off}} = \frac{I_{out}}{(1 - D_{on})}$$

קיבלנו יחסים המראים את התלות בין מתחי וזרמים הכניסה והמוצא ביחס זמני המיתוגים.

אם נשרטט את דיגרמת האותות של המעגל.



איור 3 ממיר BOOST ודיגרמת האותות של המעגל

כמובן שכולם זוכרים שקצב השתנות הזרם בסליל תלוי במתח שנופל עליו $\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L}$, אז בגלל שהשתתחים קבועים בשני מצבי הפעולה נצפה שהזרם דרך הסליל יהיה משולש והוא מוראה למעלה ב איור 3 (גרף מס 3) בחלק המחזור הראשון הזרם של הסליל זורם דרך Q_1 ובחצי המחזור השני הזרם עובר דרך הדיודה D אפשר לראות מהגרף השתוצאה שקיבלנו עבור הזרם היא היגיונית שכן ממוצע זרם המוצא שווה לממוצע זרם הסליל כפול יחס זמן המחזור בקיטעון $D_{off} * I_L = I_{out}$.

נגדיר את הגליות – ripple כערך ההשתנות של האות סביב ממוצעו ונסמנו ב

$$\Delta i = \frac{1}{2} \Delta i_{pk} \Leftrightarrow \Delta i_{pk} = \Delta i (\text{peak to peak})$$

אם נחשב הַשְתַּנּוּת הזרם דרך הסליל בחלק הראשון של המחזור (ON-STATE)

$$\int_0^{D_{on}T_s} \frac{di_L}{dt} dt = \int_0^{D_{on}T_s} \frac{V_{in}}{L} dt = \frac{V_{in}}{L} D_{on}T_s$$

אם נחשב הַשְתַּנּוּת הזרם דרך הסליל בחלק השני של המחזור (OFF-STATE)

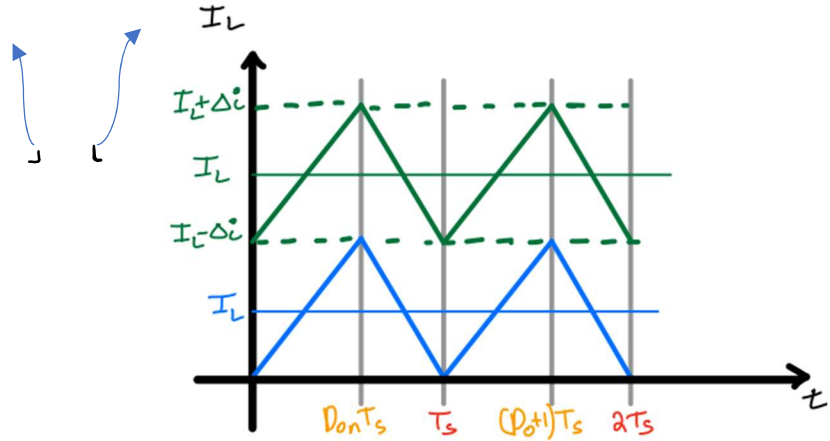
$$\int_{D_{on}T_s}^{T_s} \frac{V_{in} - V_{out}}{L} dt = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} D_{off}T_s$$

שני ביוטיים אלה שווים בערך המוחלט מההנחה שיש איזון אנרגטי, מקדם הגליות מוגדר

$$\Delta i_L = \frac{V_{in}}{2L} D_{on}T_s = \left| \frac{V_{in} - V_{out}}{2L} D_{off}T_s \right|$$

באיור 4 מצייר זרם דרך הסליל בצורה מקורבת לאורך של שני מחזורים, מסומנים ערכי השיפועים.

$$\frac{V_{in} - V_{out}}{L}$$



איור 4 התנהגות הזרם דרך הסליל בממיר מסוג BOOST

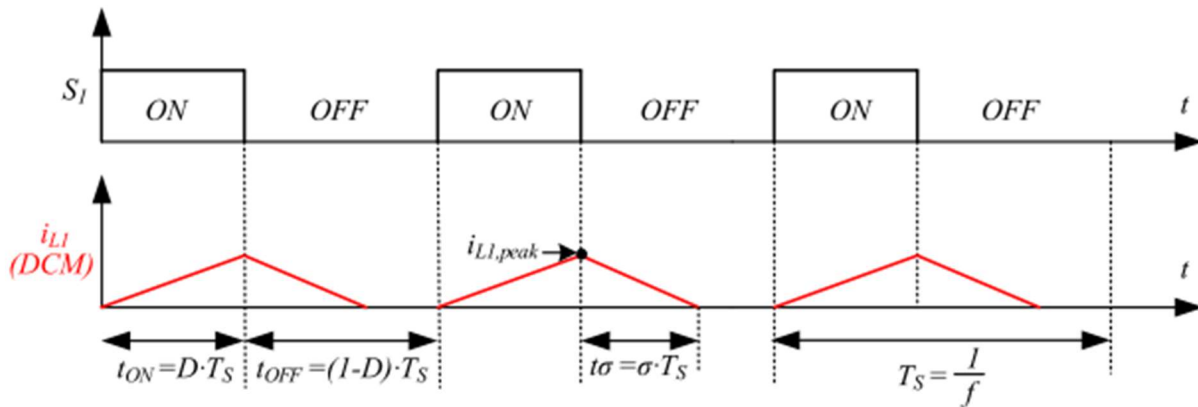
בכחול מסומן זרם שמייצג מצב קריטי – בו הממיר עובד על גבול בין מצב הולכה מתמשך (CCM) לבין מצב מקוטע/קיטעון (DCM), אם נחשב את הממוצע הזרם הכחול נקבל שערך הגבול שאם ערך הזרם הממוצע יהיה יותר קטן ממנו נעבוד בקיטעון.

$$I_L = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_L(t) dt = \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{L} D_{on} T_s = i_{ripple} \square \Delta i$$

1.2.2 ניתוח הממיר במצב פעולה קיטעון – Discontinuous Conduction Mode (CCM) במצב פעולה זה הזרם הממוצע שעובר דרך הסליל הוא קטן מהגליות

$$I_L < \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{L} D_{on} T_s = i_{ripple} \square \Delta i$$

הדבר גורם להתאפסות הזרם דרך הסליל



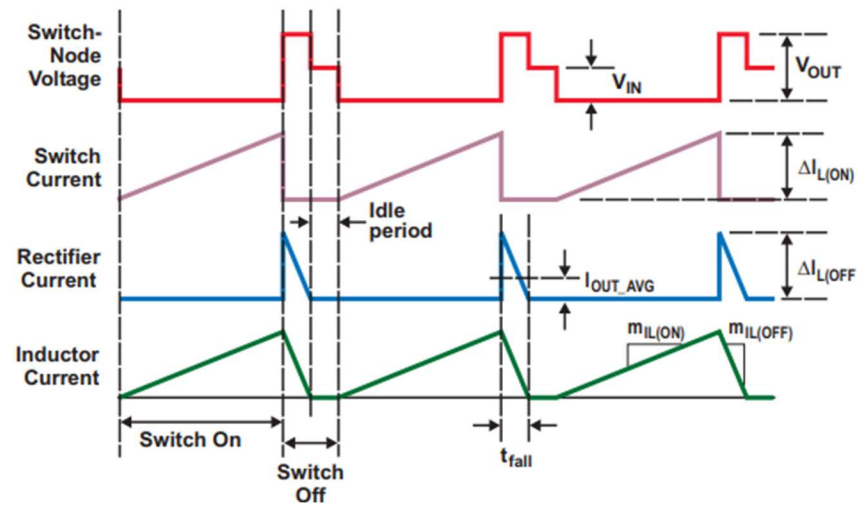
איור 5 הזרם בסליל בממיר BOOST במצב קיטעון DCM

מהתנאי להתאפסות המתח על הסליל במשך מחזור שלם מקבים

$$D_{on}(V_{in}) + \sigma(V_{in} - V_{out}) + (D_{off} - \sigma) \cdot 0 = 0 \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D_{on} + \sigma}{\sigma} = 1 + \frac{D_{on}}{\sigma}$$

מהתנאי להתאפסות הזרם דרך קבל במשך מחזור שלם מקבלים, כאשר I_D הוא הזרם דרך הדיודה

$$D_{on}(I_D - I_{out}) + D_{off}(I_D - I_{out}) = 0 \rightarrow I_D = I_{out}$$



איור 6 דיגרמת אותות של ממיר מסוג BOOST ב DCM

כדי לקבל את התמרת המתח במצב זה ננתח את הגדלים בצורה שונה, נחשב את ממוצע הזרם דרך הסליל ונניח שימור הספק (זרם הכניסה שווה לזרם הסליל)

$$I_L = \frac{1}{T} \frac{i_{pk} \cdot (D_{on} + \sigma) T}{2} = \frac{1}{2L} \frac{V_{in}}{f} D_{on} (D_{on} + \sigma) T = \frac{V_{in}}{2L \cdot f} D_{on} (D_{on} + \sigma)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{D_{on}}{\sigma} \rightarrow \sigma = D_{on} \frac{V_{in}}{V_{out} - V_{in}} < D_{off}$$

$$P_{in} = P_{out} \leftrightarrow V_{in} I_L = \frac{V_{out}^2}{R_{out}}$$

$$\frac{V_{out}^2}{R_{out}} = V_{in} \frac{V_{in}}{2L \cdot f} D_{on} \left(D_{on} + D_{on} \frac{V_{in}}{V_{out} - V_{in}} \right) = \frac{V_{in}^2}{2L \cdot f} D_{on}^2 \left(\frac{V_{out}}{V_{out} - V_{in}} \right)$$

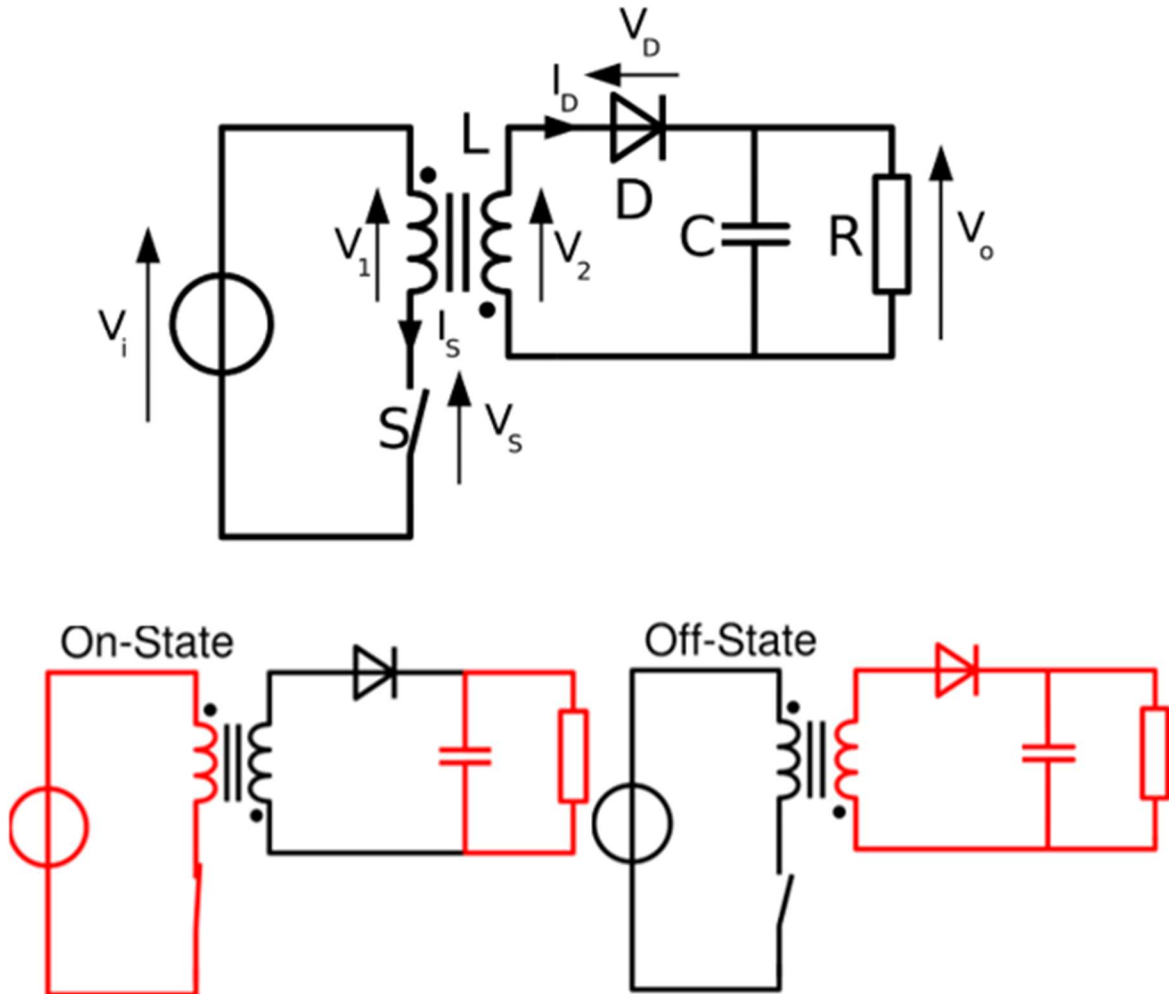
$$\frac{V_{out}}{R_{out}} = \frac{V_{in}^2}{2L \cdot f} D_{on}^2 \frac{1}{V_{out} - V_{in}} \rightarrow V_{out}^2 - V_{out} V_{in} - \frac{R_{out} V_{in}^2}{2L \cdot f} D_{on}^2 = 0$$

אפשר לבודד את יחס זמן העבודה ולקבל

$$D_{on}^2 = \frac{2L \cdot f \cdot V_{out}^2 V_{out} - V_{in}}{V_{in}^2 R_{out}} = \frac{2L \cdot f \cdot (V_{out} - V_{in})}{R_{out}} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)^2$$

1.3 ניתוח פעולת ממיר מטופולגיית FLYBACK

הערה לפני שקוראים חלק זה, ממולץ לקרוא נספח "שנאים"



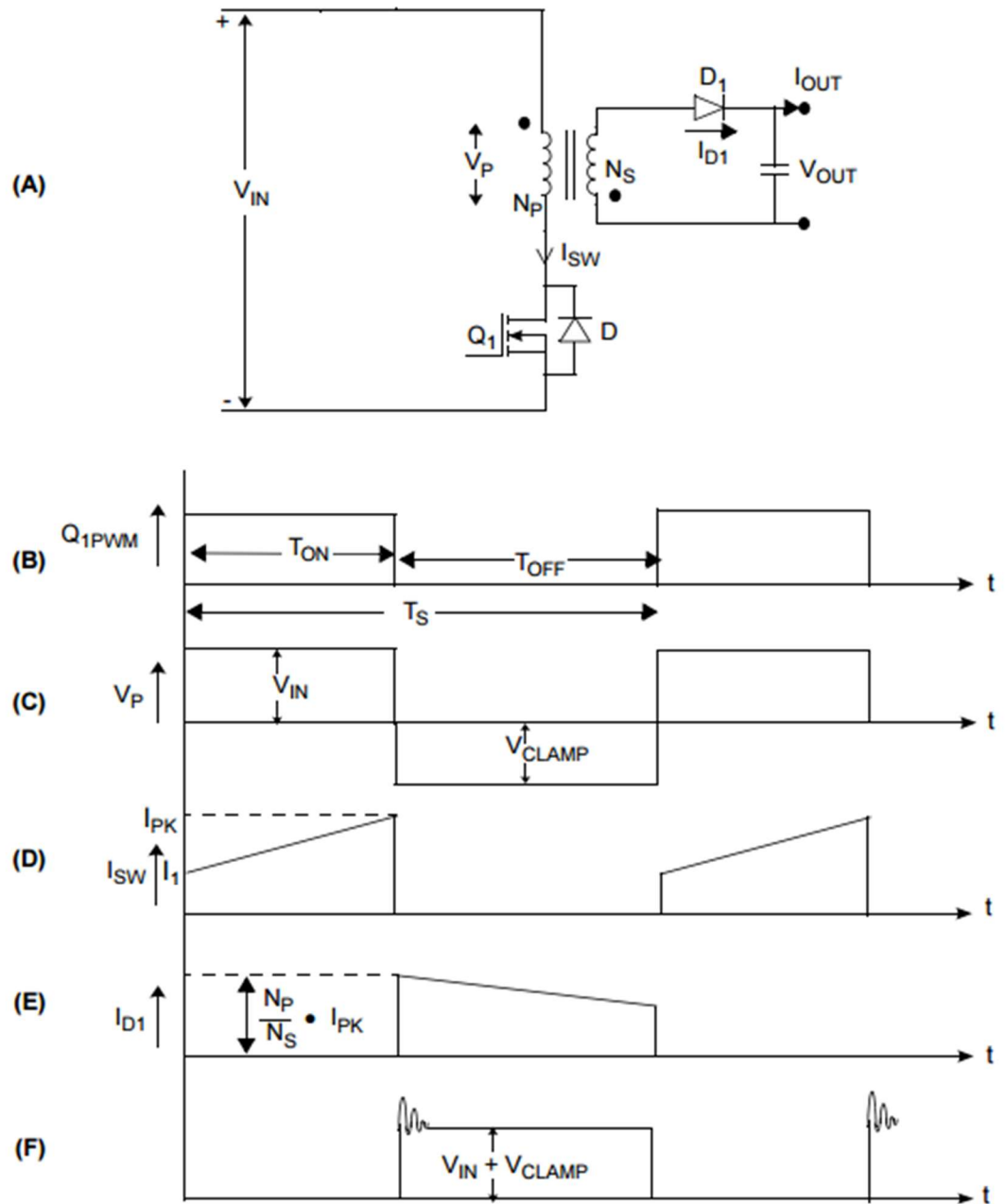
איור 7 טופולוגיה כללית של ממיר FLYBACK ומצב פעולת המתג

ממיר זה משמש להמרת $DC \rightarrow DC$ גם $AC \rightarrow DC$. אפשר לזהות שיש "שנאי" אשר "מפריד" בין דרגת הכניסה לדרגת המוצא ("בידוד גלואני") למעשה יש שני סלילים מצומדים ולא שנאי טיפוסי, ממיר זה דומה מאוד לממיר מסוג BOOST בפעולתו, ההבדל הוא ההתקן המגנטי ואופן חיבורו, אנו משתמשים בצימוד הסלילים כדי שנוכל להעביר אנרגיה שנטענה במחזור הראשון לדרגת היציאה בחלק השני של המחזור.

כאשר המתג סגור (ON-STATE) זרם מתחיל לזרום דרך החלק הראשוני של השנאי וטוען את השראות המגנט שלו, הדיודה בצד המשני סגורה להולכה עקב ההמתח האחרון שנופל עליה הקבל נפרק דרך המוצא, כאשר פותחים את המתג (OFF-STATE) האנרגיה שנטענה בשנאי נפרקת דרך הקבל והמוצא. צריכים לזכור שתפקיד השנאי בממיר מסוג FLYBACK הוא לאגור אנרגיה בחלק הראשון של המחזור ולפרוק אותה בחלק השני, למעשה ההתקן המגנטי הוא סלילים מצומדים באמצעות ליבה מגנטית ולא שנאי טיפוסי!

שימו לב, כשהמתג נפתח (Off-State) המעגל הוא מסנן מעביר נמוכים בדיוק כמו הממיר BOOST רק הפעם הסליל הוא השראות המגנט כאשר היא מיוחסת לצד המשני.

1.3.1 ניתוח הממיר FLYBACK במצב פעולה מתמשך – Continuous Conduction Mode (CCM)



- (A) = Flyback converter power circuit
 (B) = Gate pulse for the MOSFET Q_1
 (C) = Voltage across the primary winding
 (D) = Current through MOSFET Q_1
 (E) = Current through the diode D_1
 (F) = Voltage across the MOSFET Q_1

איור 8 ממיר FLYBACK ודיגרמט האותות במשטר עבודה CCM

ממוצע המתח על השראות המגנט שווה לאפס לאורך מחזור:

לצורך הניתוח נניח שהשראות המגנט מיוחסת לצד הראשוני.

$$\langle v_{Lm} \rangle = D_{on} V_{in} + D_{off} \left(-\frac{N_p}{N_s} V_{out} \right) = 0 \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D_{on} N_s}{D_{off} N_p}$$

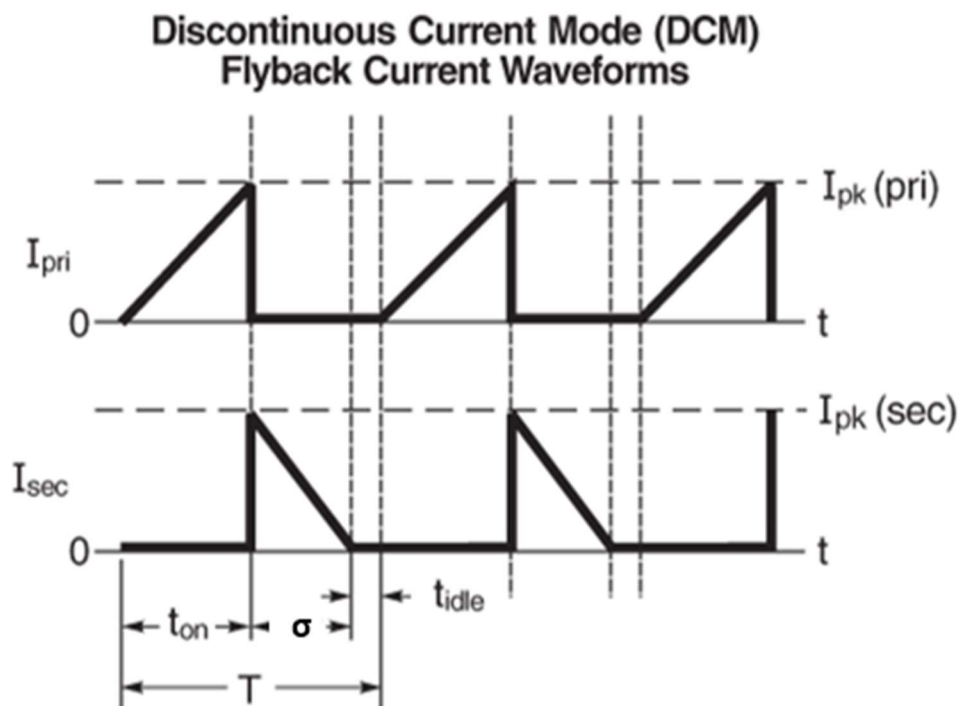
ממוצע הזרם דרך קבל שווה לאפס לאורך מחזור:

$$\langle i_C \rangle = 0 \rightarrow D_{on} (-I_{out}) + D_{off} \left(\frac{N_p}{N_s} I_{in} - I_{out} \right) = 0 \rightarrow I_{out} = D_{off} \frac{N_p}{N_s} I_{in}$$

בשאלות ההכנה שלכם אתם תנתחו טופולוגיה זו לעומק, תחשבו את הגליות של הזרם דרך ההתקן המגנטי.

1.3.2 ניתוח הממיר FLYBACK במצב פעולה קיטעון – Discontinuous Conduction Mode (DCM)

במצב פעולה זה הזרם דרך הסליל יתאפס כאשר מפל המתח על הדיודה יהפוך לממתח אחורי.



איור 9 זרמים דרך הסליל הראשוני והמשני של השנאי ב DCM

ממוצע המתח על השראות המגנט שווה לאפס לאורך מחזור:

לצורך הניתוח נניח שהשראות המגנט מיוחסת לצד הראשוני.

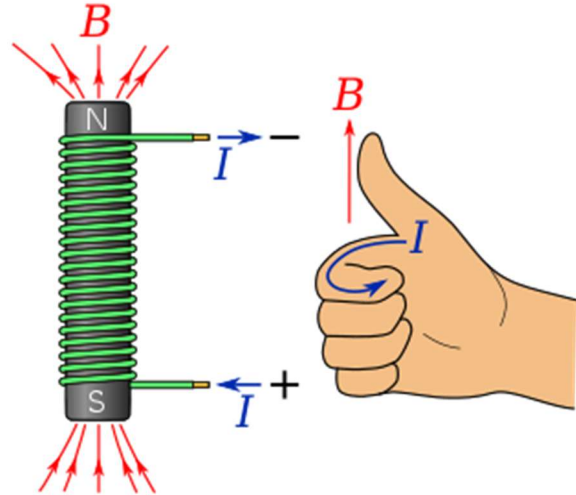
$$\langle v_{Lm} \rangle = D_{on} V_{in} + \sigma \left(-\frac{N_p}{N_s} V_{out} \right) = 0 \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D_{on} N_s}{\sigma N_p}$$

ממוצע הזרם דרך קבל שווה לאפס לאורך מחזור:

$$\langle i_C \rangle = 0 \rightarrow D_{on} (I_D - I_{out}) + D_{off} (I_D - I_{out}) = 0 \rightarrow I_{out} = I_D$$

2 מגנטיות והתקינים מגנטיים

בקורסים קודמים נלמד התיאוריה המלאה של התורה המגנטית בפרק זה נביא תמצית והסברים לצרכים של הניסוי. כולם יודעים שכאשר זרם חשמלי עובר דרך מוליך כלשהוא נוצר סביב המוליך שדה מגנטי ניתן לקבוע את כיוון קווי השדה לפי חוק יד ימין.



איור 10 חוק יד ימין, כיווני השדה המגנטי בסליל פשוט

2.1 גדלים, יחידות וחוקי המגנטיות של החומר

לאורך השנים מדענים אימצו סטנדרטים שונים, אנו נשתמש ביחידות הבינלאומיות המקובלות כיום (SI)

Quality	Symbol	Unit of Measurement and Abbreviation		
		CGS	SI	English
Field Force	mmf	Gilbert (Gb)	Amp-turn	Amp-turn
Field Flux	Φ	Maxwell (Mx)	Weber (Wb)	Line
Field Intensity	H	Oersted (Oe)	Amp-turns per meter	Amp-turns per inch
Field Density	B	Gauss (G)	Tesla (T)	Lines per square inch
Reluctance	\mathfrak{R}	Gilberts per Maxwell	Amp-turns per Weber	Amp-turns per Line
Permeability	μ	Gauss per Oersted	Tesla-meters per Amp-turn	Lines per inch-Amp-turn

איור 11 גדלים ויחידות מגנטיות לפי הסטנדרטים השונים

צפיפות השטף B המגנטי והיחידות שמתארות אותה הם

$$B = \frac{\Phi}{A} [T] \quad T = [Tesla] = \frac{[Volt] \cdot [sec]}{[meter]^2} = \frac{[Henry] \cdot [Ampere]}{[meter]^2} = \frac{[Weber]}{[meter]^2}$$

חוק אמפר : אינטגרל של השדה המגנטי לאורך מסלול סגור שווה לזרם העובר העובר דרך המשטח הכלוא בתוך המסלול

$$F = mmf = \oint H \cdot dl = i(t)$$

חוק פאראדיי : שינוי בשטף המגנטי דרך לולאה משרה מתח חשמלי

$$v(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint B \cdot da$$

חוק גאוס : אין מקורות מגנטיים $\nabla \cdot B = 0$

מסיקים מחוק גאוס שהשטף המגנטי הנכנס למשטי שווה לשטף המגנטי היוצא ממנו.

כוח מגנטו מנעי (mmf) מתאר את היכולת של חומר להכיל שטף מגנטי בהפעלת שדה מגנטי עליו, גודל זה חשוב ונובע ישירות מחוק אמפר. ומתקיים $mmf = NI [A \cdot turn]$

צפיפות האנרגיה המגנטית:

$$\frac{W}{m^3} = \int H dB = \frac{1}{2} BH$$

הפרימאביליות (Permeability) : הוא גודל או מדד המכמת את תגובת המגנט של חומר בהפעלת שדה מגנטי

עליו, הגודל נמדד יחסית לריק ומסומן ב אות μ , גודל זה נמדד יחסית לריק $\mu = \mu_0 \mu_r$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

בחומרים מגנטיים לינאריים מתקיים הקשר $B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$

רלוקטנס (Reluctance) : מגדירים אל הרלוקטנס בצורה הזו, נוח להתעסק עם ביטוי זה כאשר מנתחים מעגלים מגנטיים פשוטים

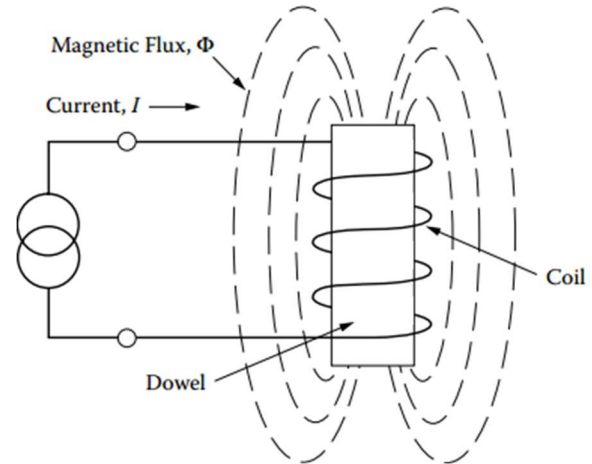
$$F = \Re \Phi \rightarrow \Re = \frac{F}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{B \cdot A}$$

2.2 ה גרעין/ליבה המגנטית סוגים והשימוש בהם

מנתחים התקנים מגנטיים בעזרת חישוב או הערכת **השטף המגנטי** הנוצר במעבר זרם זה, החומר שעליו מלופף החוט המוליך ליצירת התקן מגנטי (סליל או שנאי) נקרא **ליבה או גרעין** תפקידו **לספק מסלול "נוח" למעבר וניתוב השטף האלקטרומגנטי בצפיפות גבוהה דרכו ומאפשר קישור וצימוד יעיל בין רכיבים אלקטרומגנטיים.**

בשנאי הליבה מקשרת בין הליפופים השונים וגורמת לצימוד וגם מספקת גם בידוד חשמלי ביניהם, בסליל הליבה מאפשרת קישור בין השטף העובר דרכה לבין השטף העובר בחריץ האוויר בצורה יעילה.

הליבה בנויה בדרך כלל מחומרים מתכתיים ותערובות שלהם עם חומרים מסוימים.



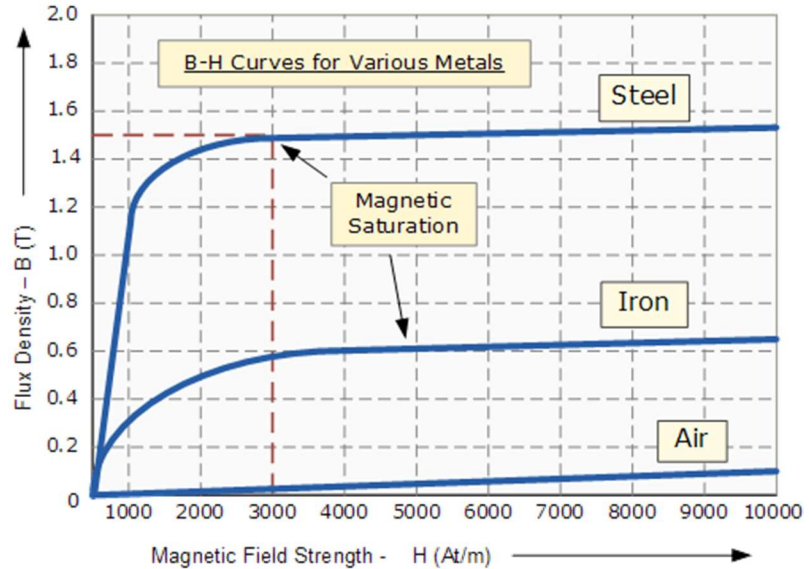
איור 12 מעגל עם סליל (חוט מלופף) מלופף על גרעין אוויר וקווי השטף המגנטי

הסליל או ההשראות ממודלת ביחס המתמטי $L \frac{di_L(t)}{dt} = V_L(t)$ ויש הרבה סוגים של סלילים:

- גרעין אוויר (Air Core): האוויר משמש כחומר מגנטי רע עקב כך סליל כזה נקרא כריאקטנס והוא משמש במעגלים בתדרים גבוהים מאוד איפה שנדרשים סלילים מזעריים.
- גרעין ברזל (Iron Core): הברזל נחשב לחומר מגנטי מצויין בתדרים נמוכים
- גרעין פיריטי (Ferrite Core): שהוא תערובת מתכות מעבר עם חמצן

ישנם עוד סוגי גרעין או סלילים אשר משומשים בישומי תקשורת כמו (Thin-film, Multi-Layer Inductors) ויש שיטות לבניית גרעין מיוחדות כמו למינציה של מתכות (מוזמנים להסתכל ברשימת המקורות).

הקשר בין השטף המגנטי (B) לשדה המגנטי (H) מורכב ומסובך, לניתוח, וניתן למדל אותו כמו שהוזכר מקודם ב $B(t) = \mu H(t)$, החומרים השונים מגיבים בצורה שונה לשדה המגנטי המופעל עליהם, באיור הבא מוראים מדידות של עוצמת השטף המגנטי כפונקציה לעוצמת השדה המגנטי.

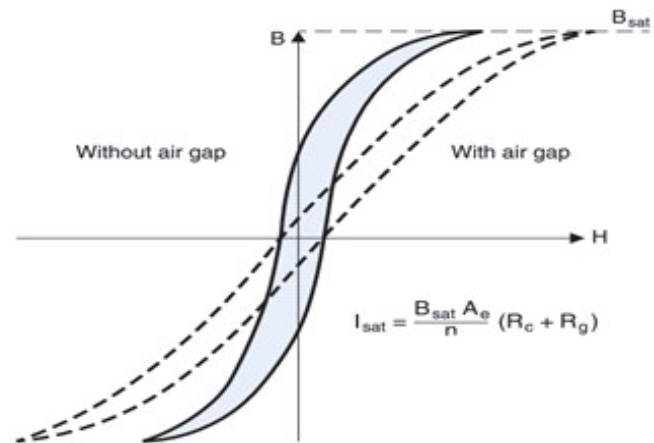


איור 13 אופיין B-H מנורמל

ניתן להבחין בתחום הרוויה שעבורו החומר מפסיק להגיב להפעלת שדה וזה קורה כאשר כל המולקולות של הגרעין הסתדרו באופן סימטרי ליצירת דיפולים מגנטיים בחומר ויצירת שטף מקסימלי דרכו, רווית החומר מהווה בעייה בתכנון סלילים עבור ממירים ממותגים (ושנאים המשומשים בממירי FLYBACK – שהם מתפקדים כמו סליל עם יחס ליפופים כלשהוא).

למה מוסיפים "חריץ אוויר"?

סוג הליבה וצורתה קובעות כמה אנרגיה מגנטית הרכיב המגנטי יכול לאגור, חומרים מגנטיים טובים אינם יכולים לאגור אנרגיה ואם נדרש מההתקן לאגור אנרגיה צריך לייצר חתך לא מגנטי (חריץ אוויר או כל חומר אחר לא מוליך ולא מגנטי), בנוסף הבדל בין שימוש בהתקנים מגנטיים בזרם ומתח חילופין (AC) מאשר מתח זרם ישר (DC), למעשה מספיק זרם/מתח ישר (DC) נמוך מאוד כדי לגרום לרווית החומר והפסקת התנהגותו כסליל, כדי למנוע רוויה בתחום העבודה מוסיפים "פתח אוויר" במסלול השטף וזה נותן לליבה לעבוד בעוצמות גבוהות שדות מגנטיים ללא רוויה למעשה מנטרלים את התלות של הסליל בפרימביליות של החומר כתוצאה מכך נוכל לעבוד בהספקים גבוהים ולאגור אנרגיה.



איור 14 לולאת היסטריזיס B-H של חומר מגנטי עם ובלי פתח אוויר

2.3 הפסדים בהתקנים מגנטיים

הפסדים בליבה המגנטית (Core Loss) : הפסדי הליבה מהווים גורם מגביל כמעט בכל הממירים הממותגים הם נובעים מההפסדים הנגרמים מהאנרגיה המבוזבזת לסידור הדיפולים המגנטיים בתוך החומר בהתאם לשדה המגנטי המופעל עליו. בתדרים נמוכים הפסדי הגרעין ברובם הם הפסדי היסטריזיס, בתדרים גבוהים ההפסדים הדומיננטיים בליבה מקורם מזרמי מערבולת (Eddy Currents). בממירים ממותגים במהלך המחזור ישתנה השטף והשדה המגנטי בליבה וזה יגרום להפסדים. אם נסתכל על השתנות (תנודות) בשטף (peak to peak) במהלך המחזור נוכל לחשב לפי חוק פאראדיי

$$\Delta B = \frac{1}{N \cdot A_e} \int V(t) dt$$

כמובן שההפסדים במהלך המחזור נגרמים מחצית מהתנודתיות של השטף ($\Delta B_{pk} = \frac{\Delta B}{2}$).

אם נחשב את עוצמות השדה המגנטי המקסימליים והמינימליים וניעזר בקשר בין השדה לשטף נקבל

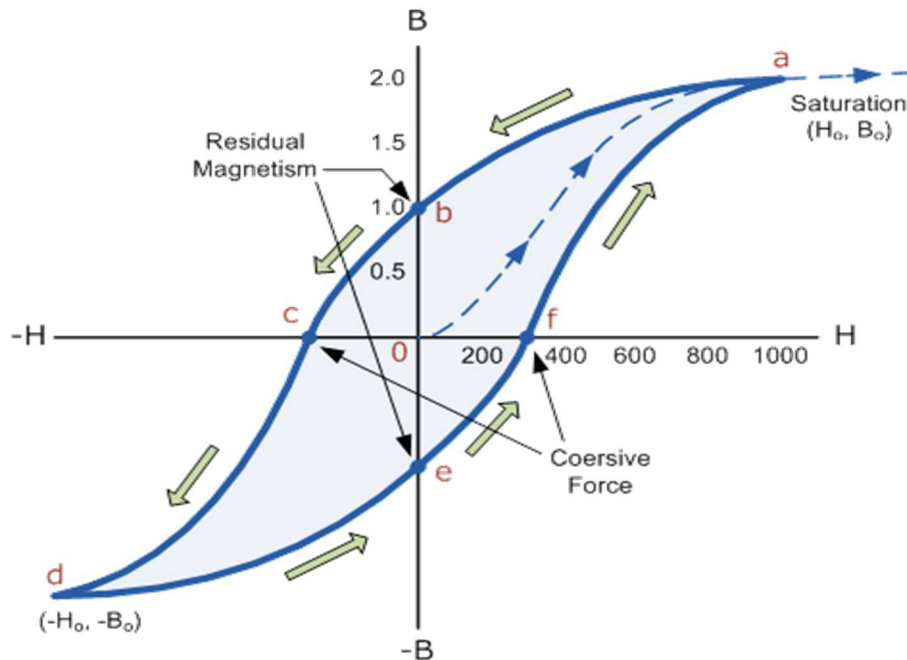
$$H_{AC \max} = \frac{N}{l_e} (I_{DC} + \Delta i_{ripple}) \quad H_{AC \min} = \frac{N}{l_e} (I_{DC} - \Delta i_{ripple}) \rightarrow \Delta B_{pk} = \frac{\Delta B}{2} = (const) \frac{N \Delta i_{ripple}}{l_e}$$

את הקבוע ניתן לקבל מטבלאות הרכיב עבור הפרימאבליות, אבל מה שחשוב הוא שזרמי DC אינם גורמים להפסדים בגרעין.

חישוב הפסדים בליבה בצורה מדויק יכולים להיות מסובכים מאוד, מהנדסים משתמשים בטבלאות רכיב והמידע שהיצרן מספק כדי להעריך את ההפסדים.

• הפסדי היסטריזיס:

אם נקח חומר כלשהוא ונתחיל לקחת מדידות של הפעלת השדה ונצייר גרף כדי ללמוד על הקשר בין השטף לשדה המגנטי, נקבל גרף (איור 15) מתחילים מ מ 0 מגיעים עד לרוויה a, מפעילים שדה הפוך מגיעים עד לרוויה "שלילית" d, ושוב מפעילים שדה בכיוון ההפוך עד שמגיעים לרוויה a, האופיין כולל שטח והשטח הוא האנרגיה שבזבזה כדי לסדר את הדיפולים בהתאם לשדה המופעל (בחומר אידיאלי האופיין מתכנס לקו והשטח הכלוא הוא 0)



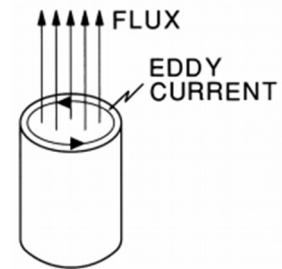
איור 15 לולאת היסטריזיס כללית של חומר מגנטי בהפעלת אות "סינוסי"

ברכיבים הפועלים במשטר ישר אנו עובדים בנקודה כלשהיא וישנם תנודות קטנות סביב נקודה העבודה, הלולאה שלנו תהיה ברביע הראשון של הגרף והיא תהיה קטנה ודומה ללואה הזו בצורתה (קראו פרק המגנטיות של הקורס ממירים ממותגים)

$$P = f_s \underbrace{\int_{nT}^{(n+1)T} \underbrace{\left(n A_c \frac{dB}{dt} \right)}_{v(t)} \cdot \underbrace{\left(\frac{H(t) l_m}{n} \right)}_{i(t)} dt}_{\text{energy lost per cycle}} = f_s \underbrace{A_c l_m}_{\text{core volume}} \underbrace{\int_{nT}^{(n+1)T} H(t) dB}_{\text{B-H loop area}}$$

• **זרמי מערבולת בליבה המגנטית (Eddy Currents):**

הפסדים אלה דומיננטיים בתדרים גבוהים (250 – 600kHz) והם אינם תלויי תדר, נובעים ממעבר שטף המשתנה בזמן בחומר עם מוליכות כלשהיא, זרמי המערבולת יגרמו להפסדים אוהמיים $I^2 R$, המקטינים את האנרגיה האגורה בליבה.



• **הפסדים אוהמיים בתדרים נמוכים:**

החוט שהסליל בנוי ממנו אינו מוליך מושלם ויש לו התנגדות ולכן כל מעבר זרם דרכו כרוך בהפסדים אוהמיים ויש לחשב אותם

$$I_{L_{RMS}}^2 R_L \rightarrow R_L = \rho \frac{\text{wire length}}{\text{cross area}} \quad \rho_{\text{copper}} = 17.1 \cdot 10^{-9} [\Omega m]$$

• **אפקט הקרום (SKIN EFFECT):**

כאשר השדה המגנטי לא יכול לחדור לליבה והתפשט בה באופן אחיד אשר מגביל את מעבר השטף המגנטי בחלק החיצן של הליבה, עוצמת החדירה מוגדרת כמרחק ממשטח החיצוני אשר צפיפות הזרם הוא e^{-1} מצפיפות הזרם במשטח החיצוני, תופעה זו מגדילה את ההפסדים הנובעים מזרמי מערבולת וניתן לחשבה.

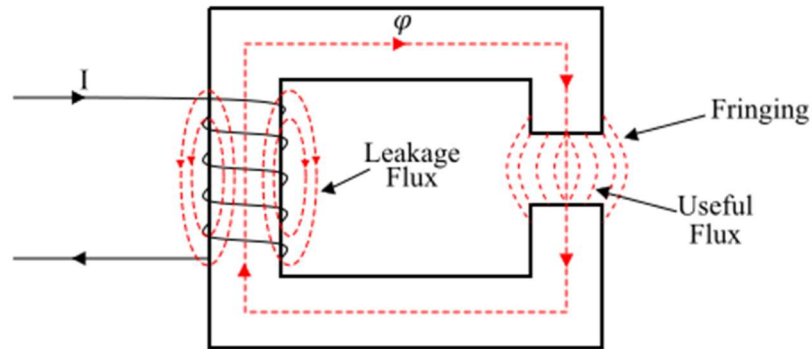
$$D_{PEN} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}}$$

כאשר ρ התנגדות למטר, f תדירות, $\mu_0 \mu_r$ הפרימביליות של החומר.

• **אפקט הקרבה:**

אפקט נוסף שגורם להפסדי נחושת התדר גבוה הוא אפקט הקרבה (proximity effect). כתוצאה מאפשר זה השרם במוליכים שכנים נוטה להצטרף בשטח חתך קטן. תופעה זו מגדילה את ההתנגדות בתדר גבוה וגורמת להפסדים נוספים, מעבר לאפקט הקרום

- **שדה שוליים (Fringing Effect):** תופעה זו שכיחה כאשר יש חוסר אחידות בליבה במיוחד כאשר היא בנוייה מחומרים שונים למשל הימצאות חריץ אוויר, במלים אחרות כאשר יש שוני בצפיפות השטף המגנטי (השטף יישאר שווה במעבר – חוק גאוס), תופעה זו גורמת להגדלת "שטח החתך האפקטיבי" באיזור מעבר השטף.
- **זליגת השטף המגנטי (Leakage Flux):** לא כל השטף עובר דרך הליבה ויש חלק עובר דרך האוויר/תווך סביב הליבה וזה נקרא שטף הזליגה



איור 16 שטף הזליגה ושדה השוליים.

2.4 חישוב והערכת הפסדים בליבה המגנטית (נוסחת סטיינמץ')

כדי לחשב או לחזות את הפסדים בליבה המגנטית בצורה מגנטית אנו אנו נשתמש בנוסחה SE (Steinmetz's equation) שנקראת נוסחת ההספק.

$$P_v = k \cdot f^a \cdot B^b$$

הנוסחה מתארת את ההפסדים הממוצעים ליחידת נפח (צפיפות ההפסדים) כפונקציה של קבוע כלשהוא, התדירות וצפיפות השטף המגנטי בליבה, לכל יצרן יש נתונים עבור הניסוי שלנו היצרן סיפק את הנוסחה

$$P_v = C_m \cdot f^x \cdot B^y \cdot (C_{t2} \cdot T^2 - C_{t1} \cdot T + C_t) \cdot 10^3$$

$$P_v - \text{צפיפות ההפסדים ביחידות של } [mW / cm^3]$$

$$f - \text{התדירות ב } [Hz]$$

$$B - \text{צפיפות השטף המגנטי } [T]$$

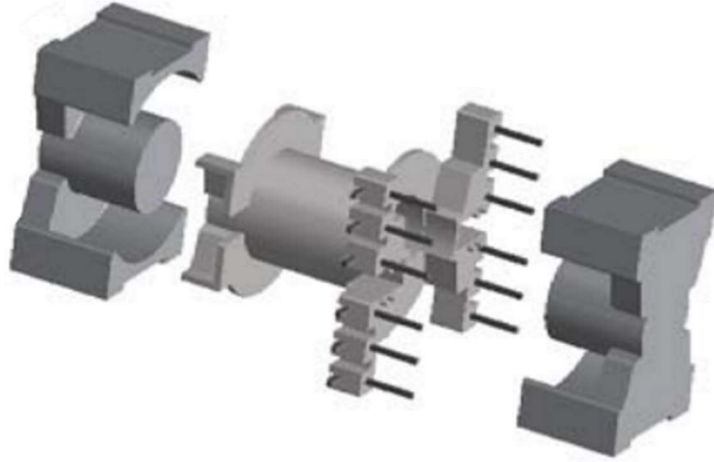
$$T - \text{טמפרטורה של הליבה } [^{\circ}C]$$

וניתן פשוט לחשב את הקבועים ולהשתמש במשוואה המקורית מהגרפים שהיצרן סיפק בטבלאות

Material	Freq min	Freq max	Cm	x	y	Ct2	Ct1	Ct
3C97	20000	100000	5.121	1.34	2.665	5.48E-04	0.1104	6.563
	100000	200000	8.27E-02	1.72	2.805	1.83E-04	0.0366	2.827
	200000	400001	9.17E-05	2.22	2.465	2.33E-04	0.0472	3.392

2.5 תכנון סליל/שנאי באופן מעשי

כדי לבנות שאני/סליל אנו משתמשים בליבה הבנויה מחומרים פיריטים (**Power PQ** **ion (Ferrite)** **Quality**) אשר יוצרו במיוחד עבור ממירים ממותגים, המבנה היחודי של הליבה הזו ממקסם את היחס בין נפח הליבה למספר ושטח חתך הליפופים, כתוצאה מכך הספק המוצא, ההשראות ושטח חתך הליפופים מקבלים ערכים מקסימליים ומאפשר שימוש בליבות קטנות מבחינת משקל נפח ומחיר.



איור 17 גרעין/ליבה מגנטית מסוג PQ, ליבה חצויה ותושבת סליל

הליבה מגיעה **בשני חלקים ותושבת סליל (נקרא גם מעצב סליל coil former או bobbin) מתאימה לסוג הליבה**, אנו משתמשים בתושבת סליל ([ND-1779-1389](#)) וליבה ([PQ32/20-3C97](#)), ומלפפים את החוט על החלק האמצעי של התושבת, אם רוצים לייצר "חריץ אוויר" שמים חומר חוצץ לא מגנטי כמו נייר, פלסטיק... (לא מגנטי, מתכתי או מוליך בין הליבות).

נתוני הליבה מהייצרן ([FerroXcube](#))

משוואות וחוקי בסיסיים בתכנון של סליל מעשי: תכנון סלילים בצורה מעשית מסתמך על משוואות בסיס שנובעות מהחוקים הבסיסיים של המגנטיות, בגלל סטיות התקן ותנאי עבודה לרוב לא מגיעים לתוצאות המדויקות שעוברים תכנון והרבה מקרים יש פרוצדורה של טעיה ותיקון כדי להשיג תוצאות רצויות.

(א) יש לנו את נתוני הממיר ועכשיו נקבע את הערכים שיאפשרו לנו קביעת ההשראות ובחירת הליבה המתאימה.

(1) אנו יודעים את הדרישות על ההשראות L , זרם ישר (DC) מקסימלי של הממיר, והגליות של הזרם דרך

$$\Delta i_L = 0.5 \Delta i_{P-P}$$

(2) בכל שלבי התכנון והחישובים צפיפות השטף המקסימלי $B_{sat} < B_{total}$ בתחום העבודה הרצוי

(3) מגבלות ההפסדים שאנו רוצים לעבודה בהם במיוחד הפסדים אומהיים של החוט והליבה (לטמפרטורה יש השפעה על ההפסדים) כדי שלא נסטה מהנצילות

(ב) בחירת הליבה המתאימה: לכל יצרן/ספק של רכיבים מגנטיים יש את הנתונים עבור הליבות וסוגיהם, על מתכנן הממיר לבחור את הליבה המתאימה ביותר מבחינת גודל פיזי ויכולת עבודה תחת התנאים אשר נקבעו.

כאשר התנאי הפיזי הראשון הוא ששטח חתך הליפופים יותר קטן משטח החלון האפקטיבי של הליבה

כאשר $nA_w \leq K_u W_A$ מקדם ניצול החלון, W_A גודל החלון האפקטיבי של הליבה, nA_w מספר הליפופים (כפול עובי החוט) אם נרשום ביטויים כלליים לסליל, זרם מקסימלי והתנגדות החוטים.

$$I_{MAX} = \frac{B_{MAX}}{n} \left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0} \right) \quad L = \frac{n^2 A_c}{\left(\frac{l_m}{\mu_c} + \frac{l_g}{\mu_0} \right)} \quad R = \rho \frac{n(MLT)}{A_w}$$

$MLT = \text{mean length per turn}$

אצל הרבה יצרנים ניתן לראות שהגדלים נתונים כגדלים אפקטיביים.

$$\frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} = K_g \geq \frac{\rho L_{max}^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u}$$

בחרים ליבה אשר תענה על התנאי הנ"ל (היצרן מספק טבלאות עם הגדלים הפיזיים)

(ג) קביעת אורך החרץ האוויר :

$$l_g = \frac{\mu_0 L_{max}^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 A_c}$$

במקרים מסויימים יש לקחת בחשבון התופעת כמו שטף שוליים ושטף זליגה בתכנון וזה קורה כאשר חריץ האוויר גדול יחסית לשטח החתך האפקטיבי של הליבה

(ד) קביעת מספר הליפופים

$$n = \frac{L_{max}}{B_{max} A_c}$$

(ה) בחירת עובי החוט וחישוב ההתנגדות

$$A_w \leq \frac{K_u W_A}{n} \rightarrow R = \rho \frac{n(MLT)}{A_w}$$

הערה:

בחלק מהמקרים היצרן גם מספק טבלאות וגרפים המסתמכים על בדיקות שלהם, אנרגיה כפונקציה למקדם גרעין, גודל חריץ אוויר כפונקציה לאנרגיה וכו'...

בהרבה פעמים נדרש תכנון, נסוי טעיה ותיקון כדי לקבל את התוצאות הרצויות, אבל צריך לדעת את הבסיס שהוזכר לע"ל כדי לדעת מה עושים.

הייצרנים של הליבות מספקים גודל הנקרא מקדם השראות (**inductance factor**) אשר מקל על המתכנן חישוב הליפופים הנדרשים בידיעת גודל ההשראות וחרץ האוויר המשומשים לבנייה.

$$A_{Lc} = \frac{1}{\Re_{core}} \quad (\text{הפכי של רילוקטנס} = \text{פרמיאנס})$$

כדי להבין איך הוספת פתח אוויר משפיעה על מקדם ההשראות נפתח לפי חוק פאראדי (בדיוק כמו קודם)

$$F = mmf = \oint H \cdot dl = \int_{core} H_{core} \cdot dl_{core} + \int_{gap} H_{gap} \cdot dl_{gap} = F_{core} + F_{gap} = N \cdot I$$

$$N \cdot I = \Phi \Re_{core} + \Phi \Re_{gap} = \Phi (\Re_{core} + \Re_{gap})$$

$$\Re_{core} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad \Re_{gap} = \frac{l_{gap}}{\mu_0 A_{gap}} \rightarrow A_L = \frac{1}{\Re_{core} + \Re_{gap}}$$

ואז ההשראות מחושבת כך $N^2 = \frac{L}{A_L}$ כאשר A_L מחושב עם התייחסות לפתח האוויר.

השפעת שדי שוליים על שטח חתך האפקטיבי במעבר השטף מהגרעין המגנטי לפתח האוויר: שטף השוליים משפיע על הרלוקטנס של פתח האוויר, כי אין ביכולת האוויר להכיל צפיפות שטף דומה לחומר הבונה את הגרעין, חלק קטן מהשטף עובר דרך השוליים ומגדיל את שטח החתך האפקטיבי של פתח האוויר, יש הרבה שיטות של פיצוי תופעה זו, היצרן מספק נתונים הכוללים את פיצוי זה.

במקרה שלנו לגרעין עם רגל אמצעית עגולה נשתמש בקירוב שבו האורך של פתח האוויר מתווסף קוטר של החתך האפקטיבי

$$\hat{A}_{gap} = \frac{\pi}{4} (D_{cp} + l_{gap})^2 = A_{gap} \cdot \left(1 + \frac{l_{gap}}{D_{cp}}\right)^2 \quad D_{cp} = 2\sqrt{\frac{A_{gap}}{\pi}}$$

שיטה זו מקלה על התכנון מאוד כי קשה לחשב צפיפות השטף בליבה ללא כלים מתקדמים, אבל חשוב מאוד לחשב ולבדוק אם היגענו לרוויה או לא.

הערה אז איך מחשבים את B_{max} ?

$$B_{sat} > B_{MAX} = B_{total} = B_{DC} + B_{AC} \propto (I_{DC} + \Delta i_{PK-PK})$$

$$B_{DC} = \frac{I_{DC} \cdot N}{(\Re_{gap} + \Re_{core}) \cdot A_e} \quad B_{ac} = \frac{\Delta i_{PK-PK} \cdot N}{(\Re_{gap} + \Re_{core}) \cdot A_e}$$

$$B_{MAX} = B_{sat} \frac{I_{DC} + \Delta i_{PK-PK}}{I_{sat}}$$

כמובן שנוסחאות אלה אינן נוכחות בתחום הברך של עקום ההיסטריזיס, ברוב המקרים כאשר הרוויה מהווה מועקה לתכנון אנו מעדיפים לעבוד בתחום נמוך מהברך של עקום ההיסטריזיס (שימו לב שהעקום תלוי טמפר')

3 הפסדים בממיר ממותג

חישוב וניתוח ההפסדים מהווה חלק חשוב מתכנון ממיר ממותג ובחירת הרכיבים המתאימים לדרישות התכן, ניתן לחלק את ההפסדים לסוגים והם נובעים מאי-האידאליות של הרכיבים והשפעת גורמים חיצוניים (טמפרטורה, שדות אלקטרומגנטיים וכו'), כדי להבין את המקור להפסדים נראה איך מחושבים ההפסדים בדiodות ובטרנזיסטורים (**הפסדים בסליל ובליבה המגנטית בפרק המגנטיות**)

3.1 הפסדים בדiodה

הפסדים בדiodה הדומיננטים הינם הפסדי הולכה, ישנם עוד הפסדים, כמו הפסדי זליגה והפסדי מיתוג הנובעים מהמטענים המצטברים בדiodה במעבר בין הולכה לקיטעון (reverse charge recovery).

(1) הפסד הולכה :

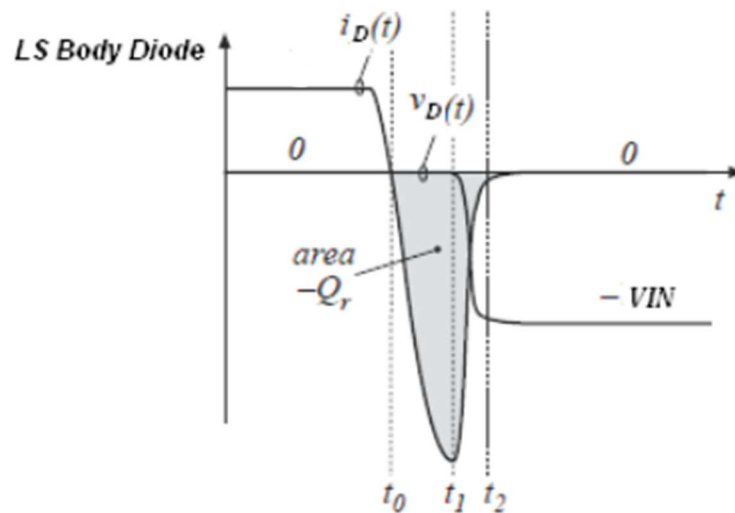
$$conduction\ loss = V_{th} I_F + r_{on} I_F^2 \approx V_F \cdot I_F = V_F \cdot I_{D_{RMS}}$$

(2) הפסדי זליגה :

$$P_{Leakage} = V_{reverse} \cdot \tilde{I}_{reverse}$$

(3) הפסדי מיתוג:

$$P_{RR} = V_{Reverse} \cdot Q_r \cdot f_S \approx V_{Reverse} \cdot f_S \cdot t_{rr} \cdot I_F$$



איור 18 המחשת זרם ההתאוששות של הדiodה, מראים הזרם והמתח דרכה

$$P_{D_{loss}} = P_{conduction} + P_{Leakage} + P_{RR}$$

הפסדי הזליגה זניחים ברוב המקרים

3.2 הפסדים בטרנזיסטור

הפסדים בטרנזיסטור זהים מאוד להפסדים בדיודה, ההפסדים הולכה, הפסדי מיתוגים שניתן לחלקם להפסדים של התעלה (חפיפה בין זרם הטרנזיסטור והמתח על הדקיו), הפסדי השער אשר נובעים מהצטברות המטען בו והפסדי הקיבולים הפרזיטיים בין הדקי הטרנזיסטור , גם פה ישנם הפסדי זליגה אבל זניחים ביותר.

(1) הפסדי הולכה:

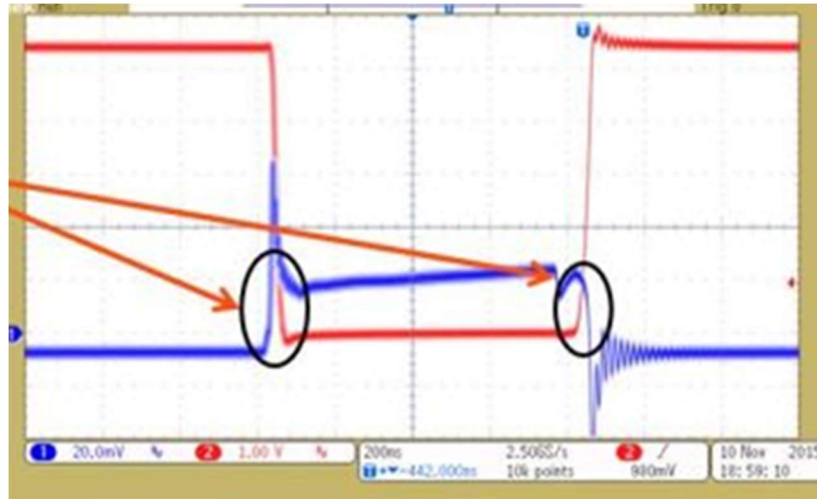
$$P_{conductions} = I_{on}^2 \cdot r_{DS(on)}$$

(2) הפסדי מיתוגים מחושבים כך:

הפסדי מיתוגים : אין דרך מדויקת לחשב את זה במדויק אבל מקרבים את איזורי החפיפה למשולשים ומחשבים לפי

$$P_{SW} = \frac{V_{max} \cdot I_{max} \cdot (t_R + t_F) \cdot f_s}{2}$$

V_{max} הוא מתח בין V_{DS} באיזור החפיפה והזרם הוא הזרם המקסימלי באיזור החפיפה



איור 19 אזורי החפיפה בין הזרם ומתח דרך הטרנזיסטור אשר גורמים להפסדים

(3) הפסדים הנובעים מהצטברות המטען בשער (מטען ההתאוששות של השער)

$$P_{gate} = Q_{Gate} \cdot V_{GS} \cdot f_s$$

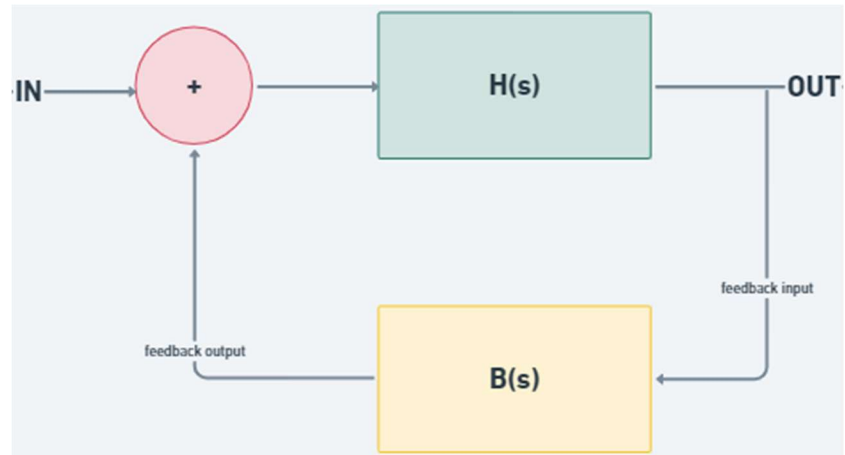
חשוב לציין שגם הקיבולים הפרזיטיים של הטרנזיסטורים והדיודות המחוברים למוצא גורמים להפסדי מיתוגים, לא נתייחס אליהם בניסוי.

4 משוב ובקרה של ממיר ממותג

החומר המלא ומפורט עבור בקרה של ממיר ממותג וניתוח לאות נלמד בקורס ממירים ממותגים, המטרה של חלק זה לרענן את הזיכרון במושגים הנלמדו בקורס עבר.

נניח מערכת לינארית כלשהיא $H(s)$ אשר חובר לה בין הכניסה והיציאה מערכת לינארית $B(s)$ וסוגרת חוג

כמוראה באיור



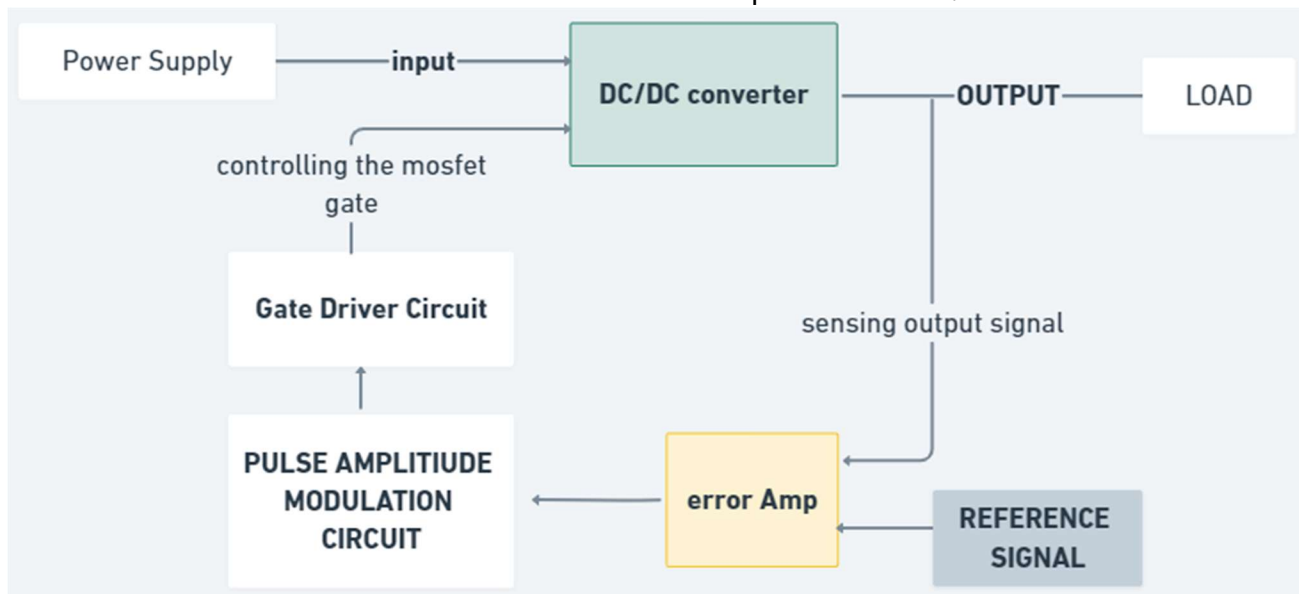
איור 20 משוב של מערכת לינארית

אם נחשב את פונקציית התמסורת עבור המערכת הכוללת נקבל

$$\bar{H}(s) = \frac{H(s)}{1 - H(s)B(s)}$$

למה משתמשים במשוב? כדי שהמערכת תתאימה סביב ערך מסויים התגובה שלה לאות קטן תיצטרך להיות יציבה, והמערכת תהיה יציבה כאשר יש לה קטבים ואפסים יציבים, פונקציית התמסורת של המערכת נקבעת בדרך כלל ע"י פרמטרי המערכת (במקרה שלנו רכיבי המעגל) ונקודות העבודה ("אות גדול"), יציבותה תיקבע ע"י התנהגותה לאות הקטן (התנהגות לאות קטן מסמלת איך המעגל יתנהג סביב נקודת העבודה).

כדי לפשט את ההסבר נסתכל על דיגרמת הבלוקים הבאה:



איור 21 תרשים זרימה של בקרת ממיר ממותג כללית

- אנו מודדים את סיגנל המוצא, מתח או זרם ומעבירים את זה למגבר שגיאה.
- מגבר השגיאה עושה השוואה בין הסיגנל המדוד לבין סיגנל הייחוס ולפי זה קובע מה מתח המוצא.
- המוצא של מגבר השגיאה מזין את מעגל המייצר גלים (מתנד רוחב סרט) אשר קובע מה רוחב הסיגנל בהתאם לאות שהוא מקבל ומעביר את הסיגנל שהוא ייצר למעגל דוחף השערים.
- מעגל דוחף השערים מגביר את האות לערך מתאים המאפשר שליטה על הטרנזיסטור

ההיגיון אומר שאם הסיגנל יותר גבוהה מערך הייחוס אנו נרצה להנחיתו ואם הוא יותר נמוך אנו נרצה להגבירו וזה מתבצע ע"י שליטה על המיתוגים כי הם שולטים על קצב העברת האנרגיה למוצא, אנו נקבל אות במוצא המתנדנד סביב ערך הייחוס (REFERENCE SIGNAL) אשר קובע את נקודת העבודה, ככה עובד המשוב השלילי. כדי לקבוע טיב העקיבה אחר אות הייחוס צריך לקבוע את הקטבים והאפסים של חוג המשוב בהתאם לקטבי ואפסי הממיר, ניתן לעשות ניתוח לאות קטן בצורה יסודית כדי לקבל תנאים על יציבות המערכת בהתאם לנקודת העבודה אבל לא נדרש בניסוי זה.

המשוב נקרא רשת פיצוי (compensation feedback) וישנם שלושה סוגים אשר נבדלים אחת מהשנייה במספר הקטבים של המשוב.

רשת פיצוי מסוג 1:

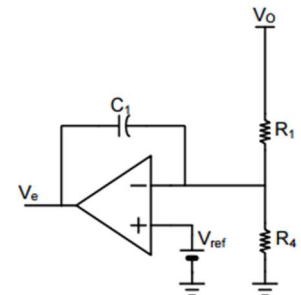
פונקציית התמסורת לאות קטן הינה (מקצרים מקורות מתח ומנתקים מקורות זרם):

$$H(s) = \frac{V_e}{V_o} = -\frac{1}{sC_1R_1}$$

כאשר באות גדול יש השוואה בין שני הדקי המגבר (יש התנגדות "אינסופית" בכניסה של מגבר השרת ולכן מתקיים עיקרון האדמה הוירטואלית)

$$V_{ref} = V_o \frac{R_4}{R_1 + R_4}$$

(שהיא בעצם נקודת העבודה או אות הייחוס) ובאות קטן ישנו מנגנון פיצוי ביניהם לפונקציית התמסורת, יש קוטב בראשית והקבל והנגד קובעים את נקודת ההגבר $0dB$



איור 22 רשת פיצוי מסוג 1

5 ציוד הניסוי

בכל עמדה יהיה הציוד המקצועי הדרוש לקחת מדידות, אוציליסקופ, קופסה שתכיל כרטיס אלקטרוני, קופסה שתכיל עומסים (נגדים) והתקן מגנטי.

5.1 הכרטיס האלקטרוני, הסכימה החשמלית והעומסים

הכרטיס האלקטרוני יכיל למעשה ממיר ממותג ללא התקן מגנטי ועומס במוצא, קונפיגורציה החיבור של ההתקן המגנטי תקבע אם הממיר יהיה מסוג BOOST או FLYBACK. נסביר תחילה על הכרטיס האלקטרוני שהבנת הסכימה שלו על מהלך העבודה.

5.1.1 הסכימה החשמלית והקופסה של הכרטיס

בעמוד הבא מופיע סכימה של הכרטיס ללא העומס במוצא, כל חלק סומן במלבן בצבע שונה כדי להסביר את תפקוד המעגל בצורה יעילה.

● במלבן הורוד מסומנות נקודות מדידה: על הכרטיס כ TP שזה (test point) – לולאה שמאפשרת חיבור של מכשירי מדידה לכרטיס

● במלבן כתום מסומנים מעגלים הנקראים snubber-ים שתפקידם לשכך הפרעות ולספוג אנרגיה בתדרים (ראה נספח)

● במלבן השחור מסומן מתג מכני (ידני) אשר מעביר בין מצבי הפעולה עם משוב בקרה וללא משוב בקרה

● במלבן האפור מסומנת רשת הפיצוי / משוב הבקרה למעגל (רשת פיצוי מסוג 1), תביתו בבקשה על טבלת הרכיב של 47739-296 atl431, המשמש לקביעת מתח הייחוס (נקודת העבודה)

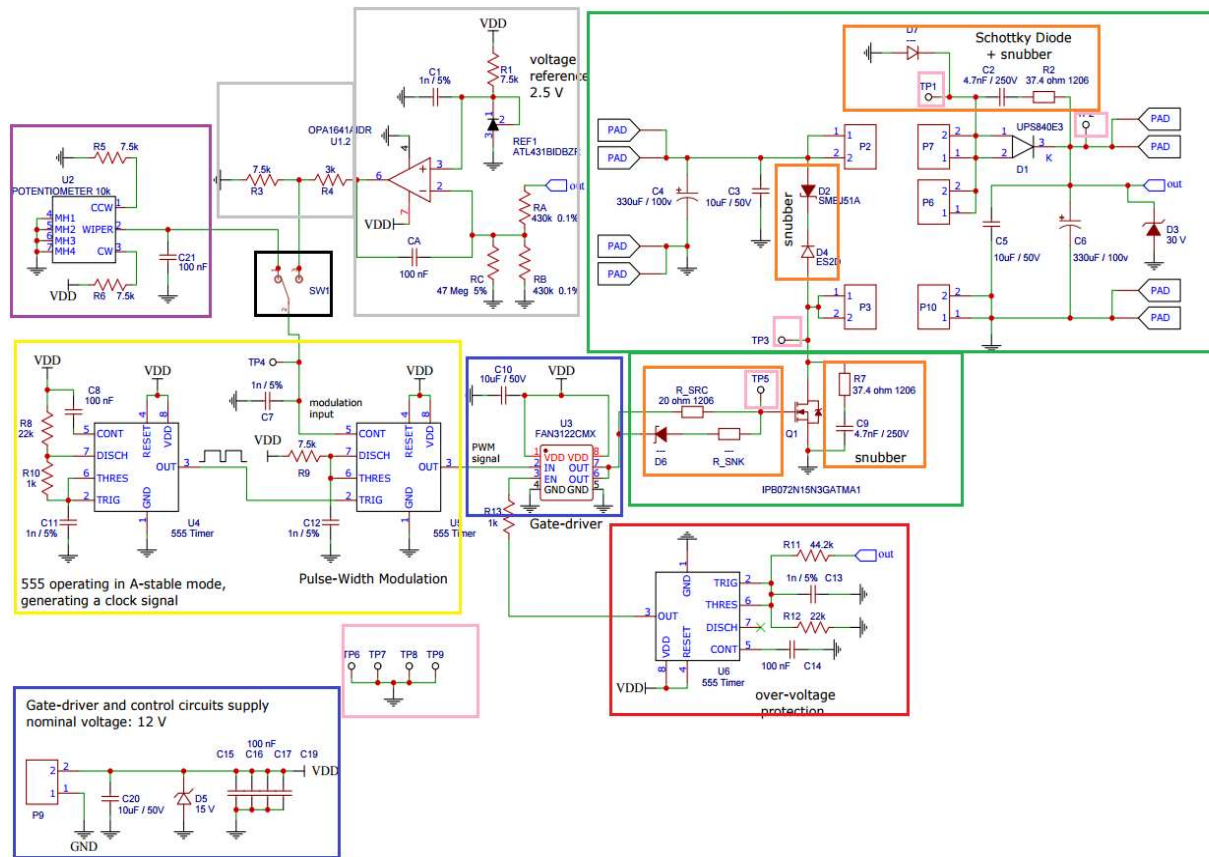
● במלבן הסגול מסומן פוטנצימטר אשר קובע את דרגת המתח אשר שולטת רכיב התזמן, ע"י סיובבה למעשה קובעים את יחס זמני העבודה של הפולס

● במלבן הצהוב מסומנים רכיבי ה PWM אשר ממושים בעזרת רכיבי תזמן LMC555 אשר מספק אות ל מזיני השערים (gate driver), הרכיב הראשון ממוש כדי לספק פולסים קבועים בתדר מסויים, הרכיב השני ממוש כדי שיספק מתנד רוחב דופק (PWM) – ראה טבלת רכיב ([LMC555CM/NOPB-ND](#))

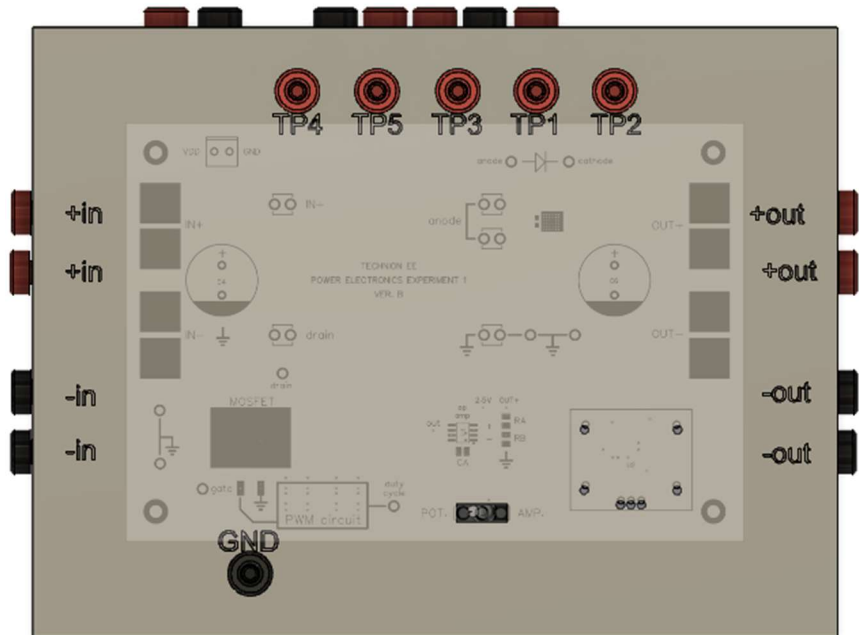
● במלבן הכחול מסומנים מעגל מזין השער (gate driver) שתפקידו להעביר את רמת המתח של הפולס לרמת מתח מתאימה לשליטה על המתג (שער הטרנזיסטור) והספק הכוח המשני שתפקידו לספק אנרגיה לרכיבי הכרטיס המשניים

● במלבן האדום מסומנים מעגל הגנה ממתח יתר אשר ממוש בעזרת רכיבי תזמן LMC555 אשר מספק אות שליטה על ה (gate driver) בעזרת הדק ה enable שלו

● במלבן הירוק מסומן הממיר הממותג שני הטופולוגיות ה BOOST ו ה FLYBACK חולקים אותן דרגת יציאה ולמעשה סוג הרכיב (שנאי או סליל) ואופן חיבורו להדקים המצויינים באיור ($P_2 P_3 P_6 P_7 P_{10}$) ההדקים המסומנים ב (PAD) ישמשו לחיבור ספקי כוח ומכשירי מדידה, ב OUT מחברים את העומסים למעגל



PAD: אלו נקודות חיבור ספקי האנרגיה, מכשירי המדידה בכניסה, במוצא וחיבור קופסת ההתנגדויות. מטעמי בטיחות ושמירה על הכרטיס כל נקודות ה PAD, TP (test point), פורטים (ports) המסומנים $P_2, P_3, P_6, P_7, P_{10}$, והספק האנרגיה המשני (auxiliary power supply) - מחוברים לרכיבים שיאפשרו מדידות מהקופסה החיצונית ("בנות"), כמובן שכל הפורטים יהיו מסומנים ונגישים לעבודה נוחה. הקופסה של הכרטיס תיראה כך (מבט על): שימו לב שגם על המכסה יהיה הפוטנציאומטר והמתג שמעביר בין חוג הבקרה לפוטנציאומטר.

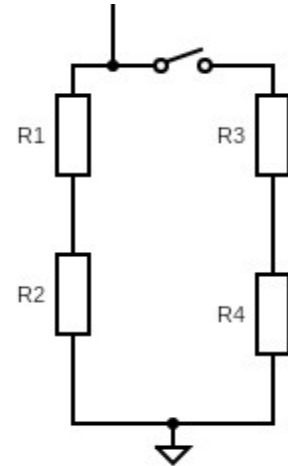


איור 24 הקופסה של הכרטיס החשמלי

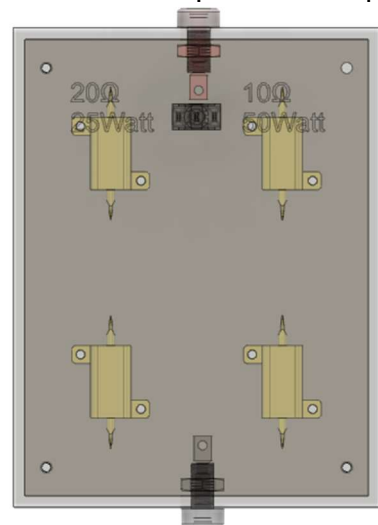
5.1.2 קופסת העומס (העומסים) :

עומס המוצא שלנו בנוי מרשת עומסים התנגדתיים המיועדים להספקים גבוהים ומשומשים בתעשיית הממירים, ההממותגים (Power Resistor), לכל נגד יש דיורג הספק המסמל את ההספק שהנגד יכול לעבוד בצורה אמינה, אנחנו משתמשים בהתנגדויות $10[\Omega]/12.5[Watt]$ ([KAL10FB10R0-ND](#)), שימו לב שיש מתג מכני שמעביר

בין המצבים ($10\Omega / 50Watt$ and $20\Omega / 25Watt$) ובכך אנחנו שולטים על התנגדות המוצא של הממיר. שימו לב שההספק המכסימלי רשום כדי להזכיר את ההספק המכסימלי שהרכיב יכול לספוג. הסכימה החשמלית של ההתנגדויות :

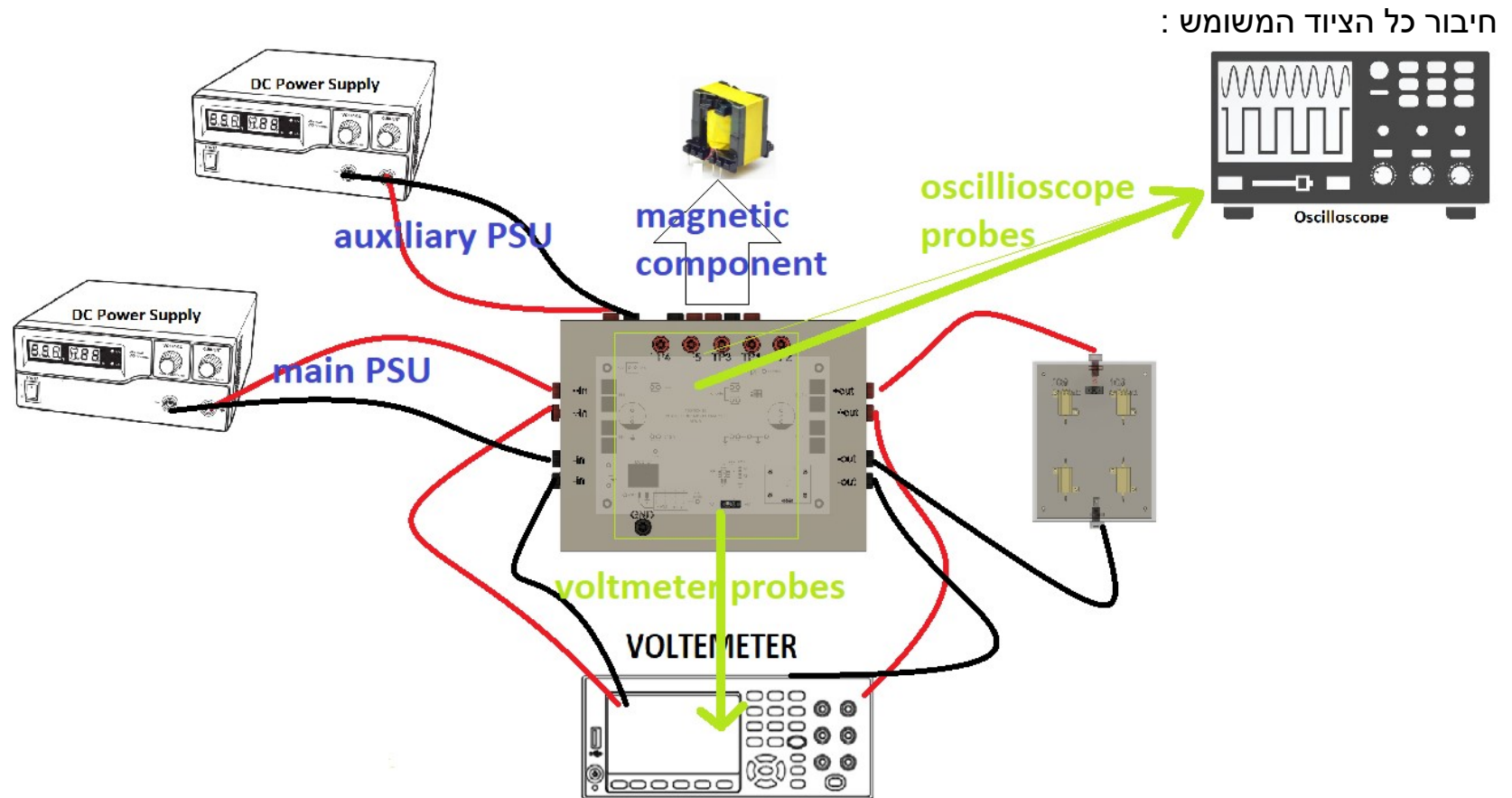


הקופסה תיראה כך



איור 25 קופסת העומסים

שימו לב שמצוין הערך המקסימלי שהנגדים יכולים לעבוד בו, כדי לזכור, בכל מקרה אנו לא נעבוד ב 50% מהערך המקסימלי הנקוב.

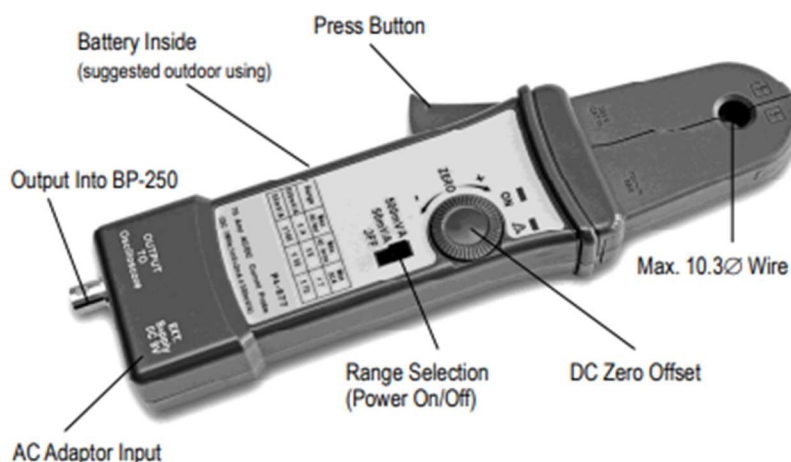


איור 26 חיבור "הקופסאות", בירוק מצויינים הדקי המדידה

5.1.3 שימוש בדוגמי מתח זרם

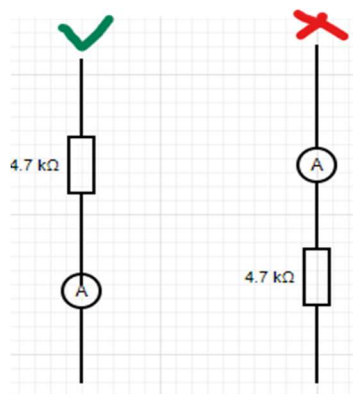
האוצילוסקופ מיועד לעבוד בטווח ערכים מוגבל והוא כלי רגיש מאוד, כדי לשמור על האוצילוסקופ משתמשים בדוגמים אשר מנחיתים את האות וממזערים את ההפסדים הנובעים מהדגימה (כדי למדוד מתח על נגד כלשהוא או מתחברים במקביל לנגד ומקטינים את הזרם דרכו וכנ"ל כאשר מודדים זרם)

5.1.3.1 דוגם זרם (לדוגמה PA-677 current probe)



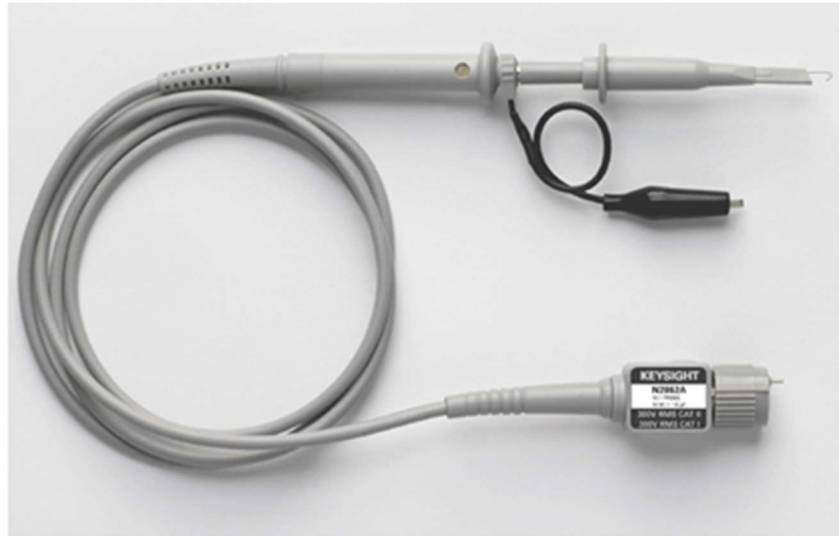
איור 27 דוגם זרם PA-677

- הכפתור הצדדי משמש לפתיחת "לסת" הדוגם ומאפשר הכנסת החוט שדרכו אנו רוצים למדוד את הזרם
 - הכפתור העגול משמש לכיול הדוגם, מכיוון שהדוגם מודד שדה מגנטי, הוא רגיש להפרעות קרובות והן מפריעות על הדגימה! כדי לקחת דגימה נכונה צריך לכליל את האפס של המדידה על האפס של האוצילוסקופ :
- (1 מאפסים את הזרם דרך החוט שאנו רוצים למדוד את הזרם דרכו (כבו ספק כוח אם צריך אבל אל תנתקו את החוט)
 - (2 מכניסים את החוט למודד ומפעילים את המודד
 - (3 בעזרת הכפתור העגול – מכילים את המדידה לאפס באוצילוסקופ
 - (4 שימו לב שלכל דוגם יש הנחתה והיא תשמש לחישוב נכון של הזרם
 - (5 עבור כל חוט שרוצים למדוד את הזרם דרכו מבצעים את הכיול, כי ההפרעה משתנה ממקום למקום
 - (6 אנו דוגמים את הזרם אחרי מעברו ברכיב ולא לפני! כדי לא להפריע למדידה!



איור 28 דגימת זרם נכונה

5.1.3.2 דוגם מתח טיפוס



איור 29 דוגם מתח לאוצילוסקופ טיפוס

- כדי למדוד את המתח אנו משתמשים בדוגם כמוראה בציר, לדוגם יש שני חלקים
- לדוגם יש ראש עם וו אשר מתחבר לדוגם הראשי ומאפשר לו להתחבר לנקודות מדידה
 - התנין צריך להיות מחובר לאדמה כל הזמן והחיבור צריך להיות יציב ולא רופף ("אדמה חזקה")

5.1.3.3 הגבלת הזרם בספק הכוח

מטעמי בטיחות נדרש להגביל את זרם הספק לערך המקסימלי שרוצים לעבוד איתו

- (1) קובעים את המתח בספק
- (2) מקצרים את הדקיו וקובעים את הזרם המקסימלי שהוא יתן

5.1.3.4 האוצילוסקופ

עבדתם במכשיר זה במעבדות יסוד, אם אתם לא מכירים שאלו את המדריך!
שימו לב שניתן לבצע פעולות מתמטיות ומדידות "חכמות" בשימוש הפונקציות המובנות שלו

