

# ניסוי שנאי

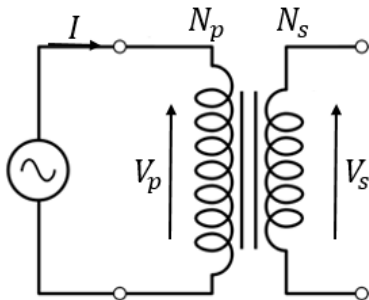
## לפני קריאת התדריך יש לוודא הבנה של המונחים הבאים

חוק פאראדי, חוק לנץ, עומס, עכבה שקולה, השראות, היגב חשמלי, פאזור.

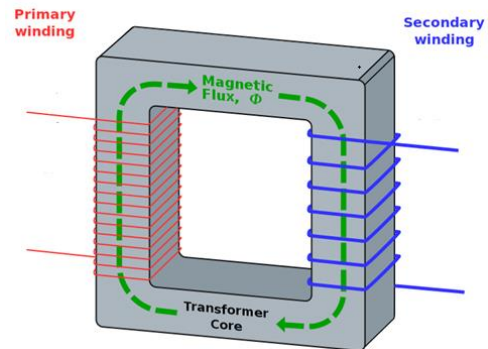
### מבוא

לפי חוק פאראדי, השתנות בזמן של שטף המגנטי דרך סליל תגרום להיווצרות מתח חשמלי על הסליל הנקרא כא"מ מושרה:  $\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$  כאשר  $N$  זהו מספר כריכות בסליל. נניח ששני סלילים מלופפים על אותה ליבת ברזל. הסלילים לא מחוברים ביניהם חשמלית אבל ממוקמים כך שהשטף המגנטי שמוצא בסליל אחד עובר גם בסליל השני דרך ליבת הברזל (איור 1). על מנת שהשטף המגנטי "יכלא" בתוך הליבה ולא יעבור באוויר, חומר הליבה צריך להיות בעל פרמביליות גבוהה מאוד (ובאופן אידיאלי, אינסופית). ברזל מתאים לשמש כליבה משום שהפרמביליות שלו היא כ-  $5,000 \frac{\mu N}{A^2}$ .

כשנחבר מקור מתח חילופין לסליל ראשון, יזרום דרכו זרם חילופין שיגרום להתפתחות שטף מגנטי משתנה בזמן. אם לשני הסלילים יש מספר כריכות שונה, השטף ישירה מתחים שונים על הסלילים. התקן כזה נקרא **שנאי** (ראה איור 2) כיוון שהוא משנה מתח במעגל חשמלי. לסליל המחובר למקור המתח קוראים **סליל ראשוני** (primary) ומסמנים את מספר הכריכות שלו כ- $N_p$ , ולסליל השני שמהווה את "מוצא" השנאי קוראים **סליל משני** (secondary) והוא בעל  $N_s$  כריכות.



איור 2: תרשים סכמתיים של שנאי. הקווים האנכיים בין הסלילים מציינים שישנו צימוד השראותי ביניהם (הם חולקים שטף).



איור 1: שני סלילים מלופפים על אותה ליבת ברזל

### שנאי אידיאלי ללא עומס

נניח שבשנאי אין איבודי אנרגיה. לשנאי הזה קוראים **שנאי אידיאלי**. נתבונן במעגל שבאיור 2 ונמצא את הקשר בין המתחים  $V_p$  ו- $V_s$  כאשר זרם חילופין  $I$  במעגל הראשוני. המתח המושרה בסליל הראשוני הוא:

$$V_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$\Phi$  הוא השטף המגנטי הנוצר בסליל הראשוני. בהנחה שאין איבודי שטף מגנטי במעבר מהסליל הראשוני למשני, אותו שטף מגנטי משולב בשני הסלילים, הראשוני והמשני, לפיכך ניתן גם לכתוב את משוואה (1) לגבי הסליל המשני:

$$V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

נחלק את משוואה (2) במשוואה (1) ונקבל את הקשר:

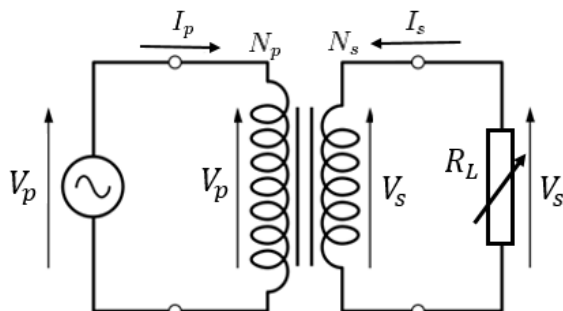
$$\boxed{\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}} \quad (3)$$

נשים לב שאם מספר הכריכות בסליל המשני קטן יותר ממספר הכריכות בסליל הראשוני ( $N_s < N_p$ ), המתח המושרה על הסליל המשני גם כן קטן יותר מהמתח המושרה על הסליל הראשוני. זהו **שנאי מוריד מתח**. באופן דומה, אם  $N_s > N_p$  נקבל **שנאי מעלה מתח**.

נהוג להגדיר את הגודל  $a = \frac{N_p}{N_s}$ . גודל זה נקרא "**יחס ההשנאה**" של השנאי ולכן ניתן לכתוב את נוסחה 3 כ- $\frac{V_s}{V_p} = \frac{1}{a}$ .

שנאי אידיאלי עם עומס

נתבונן עתה בשנאי אידיאלי אשר עומס  $R_L$  (אוהמי בלבד) מחובר לסליל המשני שלו, כמתואר באיור 3.



איור 3: שנאי אידיאלי עם עומס.

יחס המתחים על סלילי השנאי יינתן על ידי נוסחה (3), אלא שבמקרה זה זורם זרם גם בסליל המשני. נסמן זרם זה ב- $I_s$  ואת הזרם בסליל הראשוני נסמן ב- $I_p$ . מאחר שזהו שנאי אידיאלי, אין בו הפסדי אנרגיה לכן לפי חוק שימור אנרגיה ההספק שנכנס שווה להספק שיוצא:

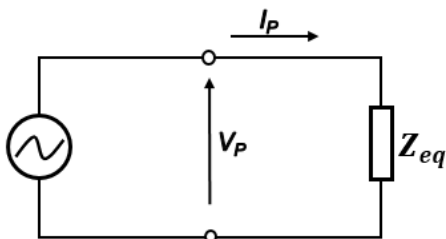
$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s \quad (4)$$

מכאן:  $\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$ . נציב את נוסחה (3) ונקבל:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (5)$$

שיקוף עכבות בשנאי אידיאלי

כמו בכל מעגל חשמלי אנו נרצה למצוא את העכבה השקולה של המעגל. שאיפתנו היא לבטא את השנאי ואת העומס המחובר אליו כרכיב בודד בעל עכבה  $Z$  ואז נוכל לפתור את המעגל המכיל שנאי בשיטות הסטנדרטיות שאנו מכירים. לכן נבנה מעגל שקול למעגל באיור 3 על ידי כך שנסמן את השנאי ביחד עם העומס המחובר אליו כעכבה  $Z_{eq}$  (איור 4).



איור 4: מעגל שקול למעגל שנאי אידיאלי עם עומס

נמצא את  $Z_{eq}$ :  $Z_{eq} = \frac{V_p}{I_p} = \frac{V_s \frac{N_p}{N_s}}{I_s \frac{N_p}{N_s}} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{V_s}{I_s}\right) = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 R_L$ . כלומר העכבה  $Z_{eq}$  תלויה במספר הכריכות בשני

הסלילים של שנאי והעומס המחובר אליו. במקרה שלנו העכבה  $Z_{eq}$  מהווה נגד כי העומס שחיברנו אל שנאי הוא נגד  $R_L$ .

(האות L מסמנת "Load"). נשים לב שהשנאי לא משנה את אופי העכבה אלא רק את ערכו (עומס השראתי נשאר השראתי, עומס קיבולי נשאר קיבולי).  
בסך הכל קיבלנו:

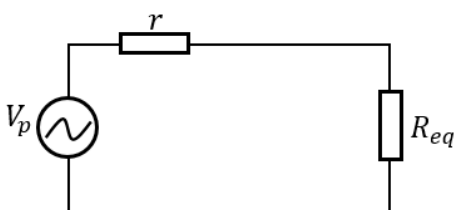
$$|Z_{eq}| = R_{eq} = a^2 R_L \quad (6)$$

הפאזה של העכבה השקולה:

$$\varphi = 0^\circ$$

שנאי כמתאם אימפדנסים

אחד השימושים הכי נפוצים של השנאי הוא הגדלת היעילות של העברת הספק ממקור מתח לעומס. נניח שאנו רוצים לקבל את מקסימום ההספק האפשרי שמגבר עם התנגדות פנימית  $r$  יכול לספק לרמקול עם התנגדות  $R_L$ . נחבר את הרמקול למגבר דרך שנאי, נחשב את ההתנגדות השקולה לשנאי והרמקול יחד:  $R_{eq} = a^2 R_L$ . קיבלנו מעגל שקול כמתואר באיור 5. במעגל כזה נקבל מקסימום הספק על  $R_{eq}$  כאשר  $r = R_{eq}$ . כדי שהתנאי הזה יתקיים נבחר שנאי עם יחס הכריכות ( $a$ ) מתאים ונקבל הספק מקסימלי על הנגד השקול  $R_{eq}$  ולכן גם על הרמקול. שיטת העברת הספק באופן הזה נקראת **תיאום אימפדנסים**.

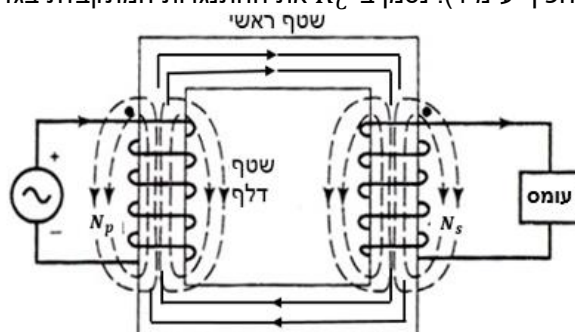


איור 5: מעגל תאום עכבות לבעיית מגבר עם רמקול

שנאי מעשי (לא אידיאלי)

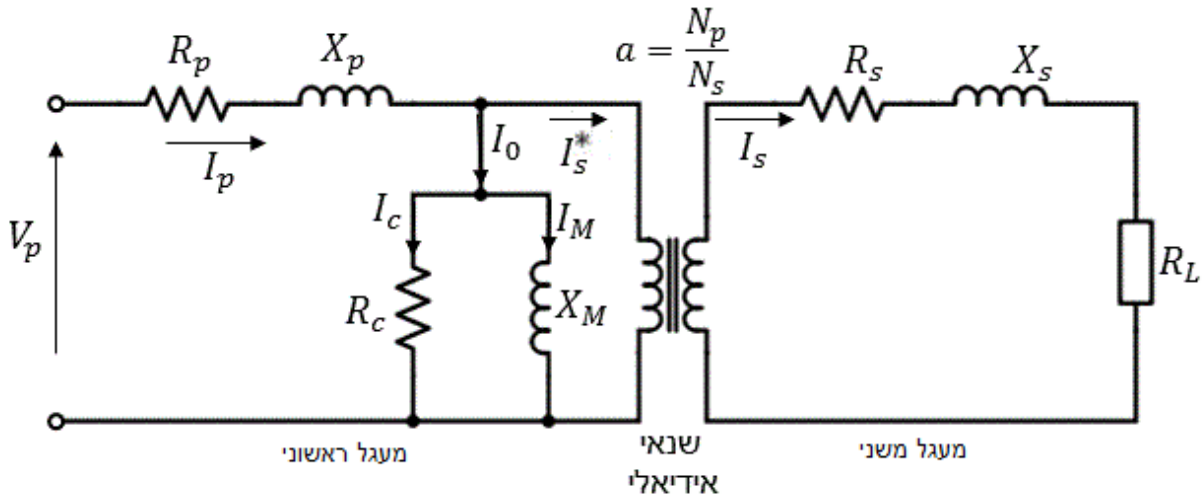
בשנאי מעשי ישנם איבודי אנרגיה, כלומר לא כל ההספק המסופק לסליל הראשוני עובר לסליל המשני. ננסה לבנות **מעגל תמורה** (מעגל שקול מבחינה חשמלית) המכיל רכיבים שיישקפו את התהליכים הפיסיקליים המתרחשים בשנאי המעשי ונסביר בעזרתם למה יש הפסדים בהספק:

- לסלילים מהם מורכב השנאי ישנה גם התנגדות האוהמית (ראו תדריך "זרם חילופין" ע"מ 4-5) שגורמת להתחממות הסליל ובריחת אנרגיה. נסמן את התנגדויות אלה ב- $R_p$  עבור הסליל הראשוני ו- $R_s$  עבור הסליל המשני.
- קיימת זליגת שטף מגנטי בסלילים של השנאי, כלומר חלק קטן מהשטף עובר באוויר ולא בליבת הסלילים (ראה איור 6). השתנות של שטף דלף זה יוצרת השראות מגנטית. נסמן ב- $X_p, X_s$  את ההיגבים הנוצרים עקב זליגת השטף בסלילים הראשוני והמשני בהתאמה.
- מכיוון שחומר הליבה הוא לא בעל פרמביליות אינסופית, נדרש זרם על מנת ליצור את השטף הראשי (איור 6). נסמן ב- $X_M$  את ההיגב שאחראי להיווצרות השטף הראשי בליבת השנאי כתוצאה מזרם בסליל הראשוני.
- קיימים הפסדים בחומר המגנטי של הליבה בגלל הפסדי החשל (Hysteresis) וזרמי מערבולת (Eddy currents). הפסדים אלו גורמים להתחממות של הליבה ובריחת אנרגיה [1]. כידוע, רכיב שהזרם החשמלי בו הופך לחום הוא נגד (ראו תדריך "זרם חילופין" ע"מ 4). נסמן ב- $R_C$  את ההתנגדות המתקבלת בגלל האיבודים בליבת השנאי.



איור 6: שטף דלף בסלילים של שנאי מעשי

כעת נבנה את מעגל התמורה של שנאי לא אידיאלי עם עומס  $R_L$  המחובר אליו (ראו איור 7). הסבר על איך בחרנו את מיקומו של כל רכיב במעגל התמורה אפשר למצוא ב-[2].

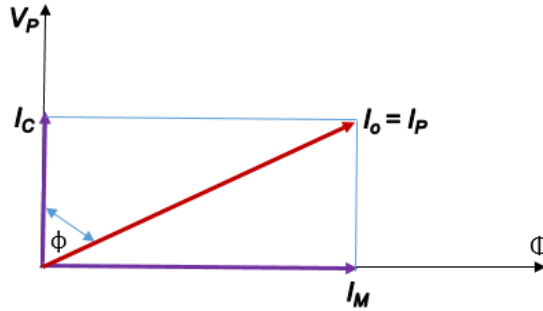


איור 7: מעגל תמורה של שנאי אמיתי עם עומס ( $R_L$ ). הזרם המושרה במעגל הראשוני על ידי המעגל המשני מסומן ב- $I_s^*$  והקשר בינו לבין הזרם במעגל המשני ( $I_s$ ) נתון על ידי נוסחה 5, התקפה עבור שנאי אידיאלי.

בניסוי נמצא את ערכי הרכיבים במעגל תמורה של שנאי אמיתי. נעשה זאת על ידי ביצוע שני ניסויים: ניסוי **שנאי ללא עומס** (נתק/ריקים) וניסוי **קצר**.

שנאי מעשי ללא עומס

בשנאי ללא עומס,  $R_L$  מנותק ולכן  $I_s^* = 0$  (ראה איור 7). האיבודים העיקריים הם בחומר של הליבה ואפשר להזניח את האיבודים בתיל של הסליל וזליגת שטף, כלומר להזניח את הרכיבים  $R_p, X_p$  לעומת  $R_c, X_M$ . כמו כן לזרם  $I_0$  (ראה ציור 7) בסליל הראשוני (בשנאי ללא עומס) קיימים שני רכיבים: הזרם  $I_M$  שמייצר את השטף המגנטי בליבת השנאי ונמצא באותו מופע עם השטף המגנטי  $\Phi$ , והזרם  $I_c$  שגורם לאיבודים בליבת השנאי ולא מייצר שטף מגנטי. הרכיב הזה בדרך כלל קטן אבל יכול להגיע ל-10% מהזרם ואף יותר אם ישנם ליקויים בבניית השנאי. דיאגרמת פאזורים (הסבר על פאזורים ניתן למצוא בתדריך "זרם חילופין" ע"מ 3) של הזרמים מוצגת באיור 8.



איור 8: דיאגרמת פאזורים של הזרמים בשנאי ללא עומס

מתקיים:

$$I_C = I_0 \cos \varphi \quad (7)$$

$$I_M = I_0 \sin \varphi \quad (8)$$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_M^2} \quad (9)$$

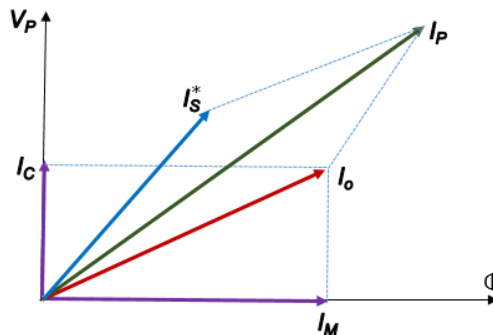
לפי ההנחות שלנו:  $I_p = I_0$ . אם נמדוד את הגודל של הזרם הזה ואת הזווית  $\varphi$  בין המתח והזרם בסליל הראשוני, נוכל לחשב את הזרמים  $I_C, I_M$  ואז גם את הרכיבים  $R_C, X_M$  לפי:

$$R_C = \frac{V_p}{I_C} \quad (10)$$

$$X_M = \frac{V_p}{I_M} \quad (11)$$

שנאי מעשי עם עומס

אם מעמיסים את השנאי (מחברים ריאוסטט להדקי הסליל המשני כמו בציור 3) אז דיאגרמת הזרמים תשתנה (ראה איור 9). בסליל המשני יזרום זרם  $I_s$  אשר ישנה את השטף בסליל המשני וכתוצאה מכך ישנה גם את השטף בסליל הראשוני. הזרם הזה ינסה לפי חוק לנץ (Lenz's law) להקטין את השטף בסליל הראשוני. מאחר והמתח בכניסה לסליל הראשוני קבוע (מתח המחולל) זה יגרום להגברת הזרם בסליל הראשוני, בהתאם ליחס הליפופים, כך שיגיע לערך  $I_s^*$  (ראה הסבר לאיור 7). הזרם בסליל הראשוני  $I_p$  יהיה הסכום של שני וקטורים: הזרם  $I_s^*$  והזרם  $I_0$  (זרם של שנאי ללא עומס).



איור 9: דיאגרמת פאזורים של הזרמים בשנאי מעשי עם עומס

ניסוי קצר

בניסוי קצר מקצרים את הסליל המשני, כלומר  $R_E = 0$ . במצב כזה נקבל זרמי  $I_p$  ו- $I_s^*$  גדולים לעומת הזרם  $I_0$ , נוכל להניח כי  $I_0 \ll I_s^* = I_p$  (ראה איור 7). לכן נזניח את הרכיבים  $R_C, X_M$  ונמצא עכבה השקולה למעגל:

$$Z = (R_p + iX_p) + (a^2 R_s + ia^2 X_s) = R + iX \quad (12)$$

מכאן:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{V_p}{I_p}$$

ולכן:

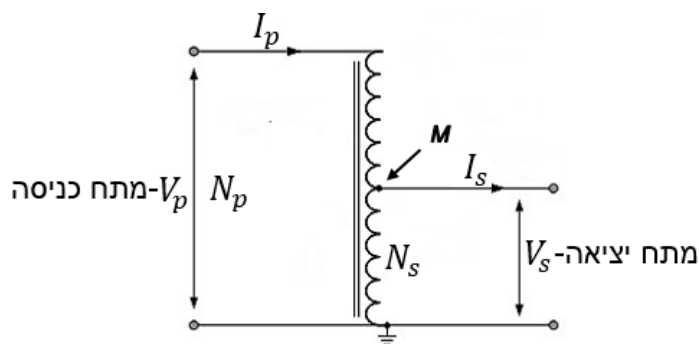
$$X = \sqrt{|Z|^2 - R^2}, \quad R = \frac{P}{I_p^2}$$

כאשר  $P$  הוא הספק של מקור המתח. הסלילים של השנאי בניסוי זהים לכן:

$$X_p = X_s, R_p = R_s \quad (13)$$

שנאי עצמי (Autotransformer)

ניתן למקם מספר סלילים על אותה ליבה, לחבר את הסלילים ביחד ולקבל מתחים שונים. צריכים רק להקפיד שהמתח של מספר הסלילים מתחבר ולא מתחסר. כשיש סליל אחד על הליבה (או סלילים המחוברים ביניהם כך שיש בין הראשוני והמשני מגע חשמלי) אז המערכת נקראת שנאי עצמי (ראה איור 10).  $M$  היא נקודת החיבור בין שני הסלילים.



איור 10: שנאי עצמי

נשים לב שהמשוואות המקשרות מתח וזרם בסלילים הראשוני והמשני לא משתנות:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}, \quad \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

היתרון הגדול של שנאי עצמי שהוא זול יותר בהשוואה לשנאי רגיל כי הוא דורש פחות חוטי נחושת לסלילים והמבנה שלו פשוט יותר. גם האיבודים בשנאי עצמי קטנים יותר מאשר בשנאי רגיל, לאותו הספק.

החסרונות של שנאי עצמי הם:

1. הסליל הראשוני נושא את הזרמים של הסליל הראשוני והמשני ולכן חוטי הנחושת צריכים להיות עבים יותר עבור הספק נתון.

2. המעגלים לא מבודדים חשמלית.

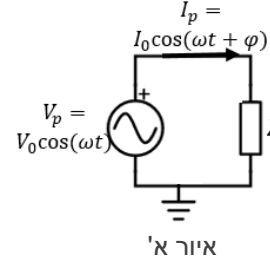
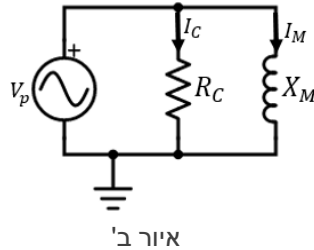
רכיב שימושי הנקרא Variac הוא שנאי עצמי אשר מגע  $M$  (איור 10) בו מחליק לאורך הסליל ומאפשר לבחור מתח יציאה רצוי בין 0 ל- $V_p$ .

הערה: צריך להקפיד שהחיבור המשותף בין הכניסה ויציאה יהיה ב- "0" של הרשת ולא בצד ה"חם" (220V) כי זה מסוכן!

## שאלות ההכנה

1. לשנאי יש בסליל הראשוני 1000 כריכות ובמשני 2000 כריכות. מתח של  $50\text{Hz}, 100\text{V}$  נופל על הסליל הראשוני (הכניסה). מה יהיה המתח על הסליל המשני (המוצא)? מהו מתח היציאה אם נהפוך את החיבורים (כניסה ויציאה)?
2. עבור המעגל שבאיור 3 נתון:  $N_p = 140, N_s = 42, V_p = 10\text{V}, R_L = 10\Omega$ . מצאו את הזרם  $I_s$  הזורם דרך העומס  $R_L$ . רמז: השתמשו בחוק אוהם עבור העומס ובנוסחה (3).
3. הוכיחו שעבור המעגל שבאיור 5 נקבל מקסימום הספק על הנגד  $R_{eq}$  כאשר  $r = R_{eq}$ . דרך לפתרון: יש למצוא ביטוי להספק המתפתח על הנגד  $R_{eq}$  בעזרת הפרמטרים  $V_p, r, R_{eq}$ , לגזור את הביטוי לפי  $R_{eq}$  ולהשוות ל-0.

4. א. הוכיחו שההספק הממוצע המתפתח על  $Z$  במעגל שבאיור א' שווה ל- $P_{avg} = \frac{1}{2} V_0 I_0 \cos \varphi$ . שימו לב ש- $\varphi$  היא הזווית בין המתח לזרם של המקור והיא גם מינוס הפאזה של העכבה (ראו הסבר בתדריך מבוא לזרם חילופין ע"מ 3). השתמשו בנוסחה:  $P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T V_p I_p dt$ . מהי הנוסחה להספק אם נתונים ערכי ה-RMS של המתח והזרם במקום האמפליטודות שלהם?
- ב. מהו ההספק המתפתח על הסליל  $X_M$  ועל הנגד  $R_C$  במעגל שבאיור ב'.



5. רוצים לחבר בעזרת שנאי מגבר המיוצג ע"י מקור מתח סינוס והתנגדות פנימית של  $500\Omega$  לרמקול בעל עכבת כניסה של  $4\Omega$ . מה צריך להיות יחס הכריכות של השנאי שיתאם בין העכבות של המגבר והרמקול (ייתן מקסימום הספק ברמקול). האם הסליל בעל המספר הגבוה של הכריכות צריך להתחבר למגבר או לרמקול?
6. המגבר שבשאלה 5 יכול לספק  $2W$  לרמקול כשיש תיאום עכבות. בהנחה שהשנאי אידיאלי (ללא הפסדים):
- א. מהו ההספק המתבזבז בהתנגדות היציאה של המגבר אם הרמקול מחובר כמו בשאלה 5?
- ב. אם הרמקול בעל העכבה של  $4\Omega$  מחובר ישירות ליציאת המגבר (ללא השנאי), מה יהיה הספק היציאה (ההספק של הרמקול)?
- ג. מכל החיבורים איזהו בעל הנצילות  $\eta$  הגבוהה ביותר כאשר נצילות מוגדרת כ- $\eta = \frac{\text{הספק היציאה}}{\text{הפסדים+הספק היציאה}}$ .
7. בניסוי שנאי ללא עומס נתון:  $\varphi = 70^\circ, V_p = 2V, I_p = 0.1A$ . יש למצוא את הרכיבים:  $X_M, R_C$ .
8. בניסוי קצר  $R_E = 0$ , הזרם במעגל גדול לכן:  $I_p = I_s \gg I_0$ . יש למצוא את הרכיבים  $X_p, R_p$  במעגל התמורה שבאיור 7 אם ידוע כי-  $V_p = 2V, I_p = 0.5A$  והפרש המופע ביניהם הוא  $\varphi = 35^\circ$ . הסלילים של השנאי בניסוי זהים.
9. שנאי בנוי ע"י סליל ראשוני יחיד ושני סלילים משניים המולבשים על הליבה. כיצד צריך לחבר את ההדקים של הסלילים המשניים על מנת לקבל את סכום המתחים שלהם כ"מוצא" השנאי (חיבור בטור)?
10. האם השנאי יכול לעבוד בזרם ישר? הסבר.
11. מהו זרם מערבולת? כיצד הוא משפיע על השנאי וכיצד ניתן להקטין אותו?
12. מהו הביטוי לנצילות אם ידועים הספק הכניסה וההפסדים בשנאי? השתמש בנוסחה בשאלה 6.g. ובשימור אנרגיה.

## מהלך הניסוי

### חייבים לעבור הדרכה על הסקופ הדיגיטלי לפני שממשיכים בניסוי.

#### כללי בטיחות בעבודה על עמדת ניסוי "שנאי":

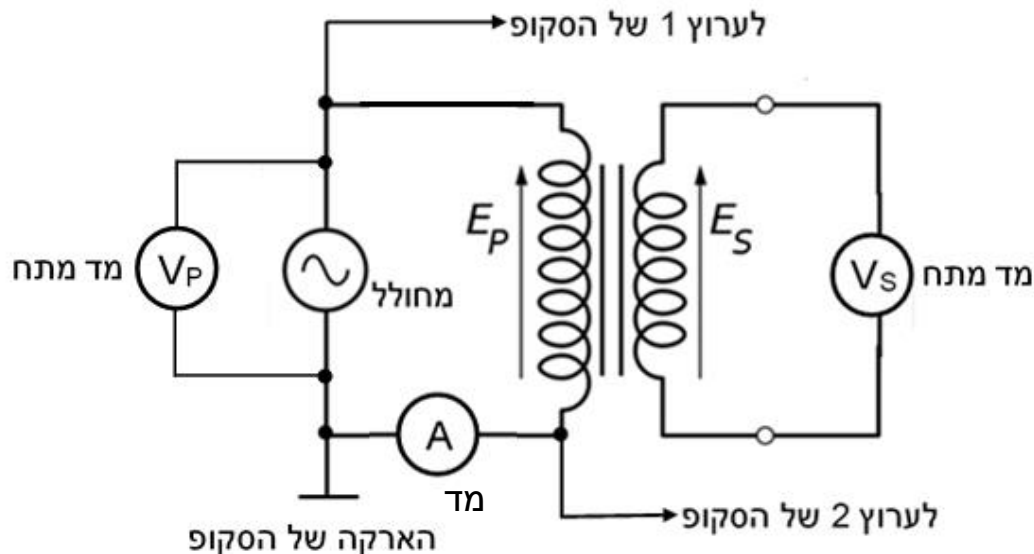
1. יש לקרוא למדריך לבדיקת המעגל לפני הדלקת מתח הספק.
2. אם בעת הדלקת הספק מכשירי המדידה לא מגיבים (מראים 0) או מצפצפים יש לכבות מיד את הספק.
3. כשעושים שינויים בהרכב המעגל יש לכבות את הספק, לבצע את השינוי ורק אז להדליק שוב את הספק.
4. מספר הכריכות בסליל הראשוני חייב להיות 140 בכל המעגלים (פרט לסעיף הנוגע להמרת אימפדנסים). נא לא להקטין את המספר כי זה גורם להגברת הזרם במעגל וזרם הגדול מ-  $5A$  יכול לגרום נזק לציוד.

לפני תחילת הניסוי יש לרשום את ערך ההשראות וההתנגדות שמופיעים על הסלילים, ולמדוד את ההשראות של הסלילים כאשר הם מולבשים על הליבה בעזרת מד-LCR. מה יוצר את ההבדל בין הערכים?

### מדידות בשנאי ללא עומס

למידת זרם יש לחבר תחילה את החוטים למולטימטר רק בין השקעים COM ו- 10A או 20 A (בהתאם לסוג המכשיר). רק לאחר שמוודאים שהזרם הנמדד אינו מעל התחום המדידה התחתון, העבר את החוט משקע 10A/20A לשקע 100mA (בהתאם לסוג המכשיר).

1. חבר את המעגל והמולטימטרים למדידת מתח וזרם בסליל הראשוני ובסליל המשני לפי איור 11. תחשבו מראש היכן למקם כל מולטימטר בהתאם למדידות הנדרשות (היכן דרוש מדידה בו זמנית של זרם ומתח? איזה מולטימטר מאפשר זאת? -- ראה "שימוש במולטימטר דיגיטלי" להסבר על מדידת זרם ומתח בו זמנית).  
2. חבר את הסקופ למעגל בעזרת שני כבלים קואקסיאליים (ראה איור 12).
- \*הסבר למדידת ערוץ 2 של הסקופ:** במהלך הניסוי, נרצה למדוד את הפרש הפאזה בין המתח לזרם בסליל הראשוני, אך הסקופ הדיגיטלי מסוגל למדוד רק מתחים בשני הערוצים ולא זרמים. על מנת למדוד את הפאזה של הזרם מחברים את ערוץ 2 של הסקופ במקביל למד הזרם שמוודד את  $I_p$  (ראה איור 11). למד הזרם ישנה התנגדות פנימית קטנה:  $\sim 0.1\Omega$  ואם מוודדים את המתח על מד הזרם אז המתח הזה יהיה פרופורציונאלי לזרם, כלומר בעל אותה פאזה. באופן זה ניתן למדוד את הפאזה של הזרם.



איור 11: המעגל החשמלי למדידות בשנאי ללא עומס, ראה הסבר בסעיף 1.



איור 12: כבלים קואקסיאליים

2. מדוד את המתחים  $V_p$ ,  $V_s$  והזרם  $I_p$  עבור כל המתחים של המחולל בין 2V עד 14V עבור מספר כריכות בסליל הראשוני 140 ובסליל המשני 140 כריכות.  
חשוב:

- יש לחכות 5 ~ שניות או יותר עד שהקריאה של המולטימטר תתייצב.
- המולטימטר מודד מתח וזרם אפקטיביים (RMS) ולא את האמפליטודה. ראה הקדמה לזרם חילופין בהסבר על הסקופ הדיגיטלי.

שרטט גרף של  $V_s$  כפונקציה של  $V_p$  ודון בשיפוע שהתקבל. האם הוא מתאים לתיאוריה?



3. מדוד את המתחים  $V_p, V_s$  והזרם  $I_p$  עבור מתח של המחולל של  $10V$ , מספר כריכות בסליל הראשוני 140 ומספר כריכות בסליל המשני: 14, 42, 84, 112, 140. שרטט גרף של  $\frac{V_s}{V_p}$  כפונקציה של  $\frac{N_s}{N_p}$ . מה ניתן להסיק מהגרף?

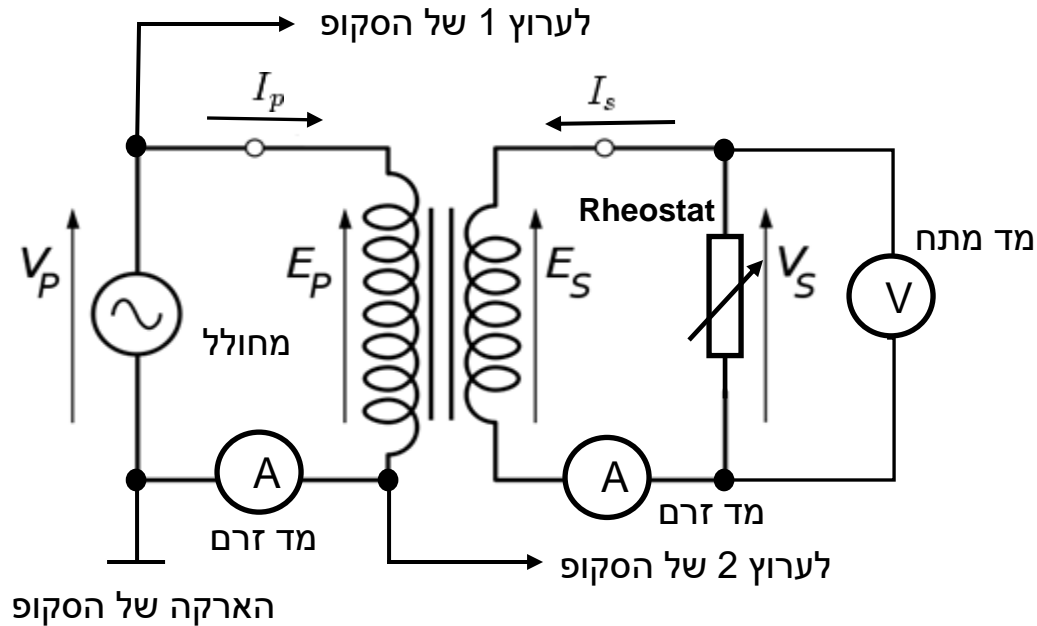
### מדירות הפרש פאזה במעגל הראשוני

4. **בצע מדידת הפרש פאזה ללא עומס (ניסוי ריקם):** כוון את המחולל ל- $8V$ . ודא שמספר הכריכות בסליל הראשוני וגם במשני שווה ל-140. כוון את המולטימטר למדידת זרם/מתח AC בסקלת זרם של לפחות  $1[A]$  (הסקלות משתנות לסוג המולטימטר). במידה וקיים, קבע מצב AUTO עבור סקלת המדידה. קבע את הצימוד של שני הערוצים של הסקופ ל-DC. מדוד את המתחים  $V_p, V_s$ , הזרם  $I_p$  ואת הפרש המופע בין הערוץ 1 והערוץ 2 של הסקופ (לחץ על כפתור meas ובחר בפונקציית phase). כדי להקטין את הרעש בערוץ 2 לוחצים על המקש Acquire ובוחרים AcqMode (Averaging). מתוך תוצאות המדידה, חשב את הרכיבים  $I_M, I_C, R_C, X_M$ . בהמשך נניח ש- $I_0$  אינו משתנה כתוצאה מחיבור עומס סופי.

5. **בצע מדידת הפרש פאזה בקצר (ניסוי קצר):** בחלק זה זורם זרם גבוה במעגל חבר את החוטים של המולטימטר למדידת זרם בין השקעים COM ו-10A או 20A (בהתאם לסוג המכשיר) וכוון את סקלת המדידה ל-20A או למצב Auto אם אפשרי. כוון את המחולל ל- $8V$ . ודא שמספר הכריכות בסליל הראשוני וגם במשני שווה ל-140. קצר את הסליל המשני של השנאי על ידי חיבור ההדקים. מדוד את הזרם  $I_p$ , המתח  $V_p$  ואת הפרש המופע ביניהם (בין הערוץ 1 והערוץ 2 של הסקופ). מתוך תוצאות המדידה, חשב את הרכיבים  $R_p, R_s, X_p, X_s$ . השווה להתנגדות הסלילים הרשומה עליהם.

### מדירות בשנאי עם עומס בסליל המשני

6. פרק את המעגל ונתק את כל החוטים. תכנן מראש היכן למקם כל מולטימטר במעגל המצויר באיור 13 בהתאם למדידות הנדרשות (היכן דרוש מדידה בזמן זרם ומתח? איזה מולטימטר מאפשר זאת?)
7. כוון את הריאוסטט להתנגדות של  $10\Omega$ . מדוד את ההתנגדות  $R_L$  במדויק.
- חברו את המעגל, הסקופ והמולטימטרים למדידת זרם ומתח בסליל הראשוני ובסליל המשני לפי איור 13. (ראה "שימוש במולטימטר דיגיטלי" להסבר על מדידת זרם ומתח בזמן זרם)
8. מדוד את הזרמים  $I_p, I_s$  עבור כל המתחים של המחולל בין 2V עד 14V ועבור מספר כריכות בסליל הראשוני 140 ובסליל המשני 140 כריכות. שרטט גרף של  $I_s$  כפונקציה של  $I_p$ . מה ניתן להסיק מהגרף?
9. מדוד את הזרמים  $I_p, I_s$  עבור המתח בסליל הראשוני  $V_p = 10V$  (מדוד את הערך המדויק), מספר כריכות בסליל הראשוני 140 ומספר כריכות בסליל המשני: 14, 42, 84, 112, 140. שרטט גרף של  $I_s$  כפונקציה של  $N_s$ . מה פירוש השיפוע? האם הוא תואם לתיאוריה? (ראה שאלת הכנה 2)



איור 13: מעגל חשמלי לניסוי מדידת בשנאי עם עומס בסליל המשני

10. **בצע מדידת הפרש פאזה עבור עומס סופי:** כוון את המחולל ל- $8V$ , ודא שמספר הכריכות בסליל הראשוני וגם במשני שווה ל-140. כוון את המולטימטר למדידת זרם/מתח AC בסקלת זרם של לפחות  $1[A]$  (הסקלות משתנות לסוג המולטימטר). במידה וקיים, קבע מצב AUTO עבור סקלת המדידה. קבע את הצימוד של שני הערוצים של הסקופ ל-DC. מדוד את הפרמטרים  $I_p, I_s, V_p, V_s, R_L$  ואת הפרש המופע בין הערוץ 1 והערוץ 2 של הסקופ (את  $V_p$  ניתן למדוד באמצעות הסקופ).

מתוך המדידה ותוצאות סעיף 4, חשב את הרכיב  $I_s^*$  והשווה ל- $I_s$  שמדדת ישירות. חשב את ההספק בכניסה לשנאי (ראה שאלת הכנה 4). חשב את האיבודים בתיל של הסלילים ומהתחממות הליבה של השנאי וחשב מתוכם את הנצילות. חשב את הנצילות של השנאי במצב זה לפי ההספק של העומס והספק הכניסה והשווה (שאלות הכנה 6, 12).

#### מדידות בשנאי כממיר אימפדנסים

11. שים את מספר כריכות בסליל הראשוני ל-84 ובסליל המשני ל-140. כוון את המחולל ל- $2V$ . שנה את התנגדות הריאוסטט בין 0 ל- $10\Omega$  (לפחות 10 נקודות שונות מכל הטווח של  $R_L$ ) ומדוד את הזרם ואת המתח בסליל המשני.

12. שרטט גרף של ההספק  $I_s V_s$  כנגד  $R_L$ . את התנגדות הריאוסטט אפשר למצוא לפי  $R_L = \frac{V_s}{I_s}$ . קבע עבור איזה ערך של  $R_L$  מתקבל ההספק המקסימלי על  $R_L$ . הוסף נקודות לגרף על מנת למדוד את המקסימום במדויק. מהי ההתנגדות השקולה ( $R_E$  בציור 4) שמתאימה להספק המקסימלי? מהי ההתנגדות הפנימית של המחולל בו השתמשת בניסוי?

### מדידות בשנאי עצמי

13. נתק את כל החוטים וחבר את השנאי כשנאי עצמי. יש להשתמש רק בסליל אחד, ראה איור 10. חבר שני מולטימטרים למדידת המתחים  $V_P, V_S$ : מד מתח אחד חבר ישר למחולל האותות אשר מחובר לסליל הראשוני של 140 כריכות ומד מתח שני חבר לאותו הסליל בין הכריכות מס' 14. שים מתח של 8V במחולל ומדוד את המתחים. שנה את מספר הכריכות של הסליל המשני בשנאי ל- 42, 84, 112 ומדוד את המתחים בהתאם.

$$\frac{V_S}{V_P} \cdot \frac{N_S}{N_P} \text{ כפונקציה של } \frac{N_S}{N_P}$$

שרטט גרף של  $\frac{V_S}{V_P}$  כפונקציה של  $\frac{N_S}{N_P}$ .

השווה את התוצאה לערך התאורטי.

### מושגים, שיטות ומכשירים שסטודנט יכיר וידע להשתמש בהם אחרי הגשת הדו"ח בנושא:

חוק פארדי, חוק לנץ, עומס, עכבה שקולה, השראות, היגב חשמלי, שנאי, סליל משני, סליל ראשוני, שנאי אידיאלי, שנאי מוריד מתח, שנאי מעלה מתח, שיקוף עכבות, מעגל תמורה/שקול, תאום אימפדנסים, הפסדי החשל (Hysteresis), זרמי מערבולת (Eddy currents), פאזור, דיאגרמת פאזורים, שנאי עצמי, Variac.

### רשימת מקורות:

[1] הסבר על תופעות הפסדי החשל וזרמי מערבולת מופיע בספר:  
ד"ר דוד אלמקיס. המרת אנרגיה: שנאים ומכונות חשמל. משרד החינוך, מט"ח. ע"מ 63, 66-69.

[2] מקומם רכיבי מעגל תמורה של שנאי אמיתי:  
ד"ר דוד אלמקיס. המרת אנרגיה: שנאים ומכונות חשמל. משרד החינוך, מט"ח. ע"מ 50-48.