

תוכן העניינים:

2	פרק 8
2	מעגלים מגנטים
2	סרטון – המעגל המגנטי :
2	חזרה על מושגים יסודיים :
3	סוגי חומרים :
3	המעגל המגנטי :
6	עקום B-H :
6	ממסרים :
7	תרגילים :
14	תשובות סופיות :
15	סרטון – צימוד ומעגלים מגנטים בזרם חילופין :
15	השראה עצמית והשראה הדדית :
16	השראות שקולה מסלילים מצומדים המחוברים בטור :
16	השראות שקולה מסלילים מצומדים המחוברים במקביל :
16	סימון סכמתי :
17	תרגילים :
22	תשובות סופיות :

פרק 8

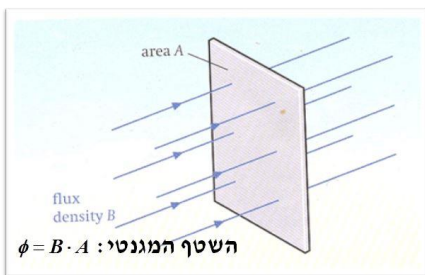
מעגלים מגנטיים

סרטון – המעגל המגנטי:

חזרה על מושגים יסודיים:

שטף מגנטי:

כמות קווי שדה מגנטי העוברים מבעד לשטח חתך A .
סימון: ϕ . יחידות: וובר [Wb].



צפיפות קווי השטף:

כמות קווי השטף המגנטי המורגשים ליחידת שטח.
סימון: B . יחידות: טסלה [T].
קשר מרכזי: $\phi = BA$.

עוצמת השדה המגנטי:

גודל השדה הנוצר כתוצאה מזרם במרחב.
סימון: H . יחידות: אמפר למטר [A/m].

קשר בין צפיפות שטף מגנטי לעוצמת השדה המגנטי:

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

כאשר: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{m \cdot T}{A} \right]$ ו- μ_r מקדם פרמאביליות יחסי.

שדה מגנטי מסליל:

צפיפות השטף המגנטי הנוצר בתוך סליל כתוצאה מזרם I המלוּפף N פעמים על

ליבה בעלת מקדם פרמאביליות יחסית μ_r באורך L הוא: $B = \mu n I = \mu \frac{N}{L} I$.

כאשר: $n = \frac{N}{l}$ - מספר הליפופים ליחידת אורך.

סוגי חומרים:

חומר פרומגנטי (ferromagnetic material):

חומר ההופך למגנט כשהוא נמצא בתווך בו שורר שדה מגנטי, ונשאר מגנטי כשהוא יוצא מתחום זה. לחומרים אלו μ_r טיפוסי בסדרי גודל של מאות ואלפים.

חומר פארמגנטי (paramagnetic material):

חומר אשר מתמגנט כשהוא נמצא בתווך בו שורר שדה מגנטי, אך אינו שומר על תכונותיו המגנטיות בהיעדר השדה. לחומרים אלו μ_r טיפוסי גדול.

חומר שאינו מגנטי:

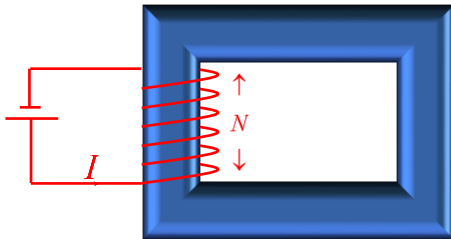
חומר שאינו מושפע כלל מנוכחות (או היעדר) שדה מגנטי.

הערה:

אנו נעסוק רק בחומרים פרומגנטיים.

המעגל המגנטי:

תיאור כללי:



מעגל מגנטי מכיל תיל המלופף N פעמים על גבי חומר פרומגנטי μ_r כלשהו ובו זורם זרם I . לחומר הפרומגנטי קוראים **ליבה** ולשטף המגנטי אשר נוצר בליבה קוראים **השטף המועיל**, או פשוט **השטף המגנטי**.

השטף שבורח אל מחוץ לליבה נקרא **שטף הזליגה** והוא יוזנח בהתייחסות שלנו.

חוק אמפר:

סכום הזרמים הכלואים בלולאה סגורה שווה לסך קווי השטף המגנטי העוברים

$$\sum_k N_k I_k = \sum_p H_p l_p : \text{נשתמש בחוק אמפר באופן הבא}$$

חוק אוהם המגנטי (חוק הופקינסון):

נתייחס לשטף המגנטי העובר בליבה כאשר "זרם" ונסמן:

$$F_m = NI \text{ - כוח מגנטו-מניע (Megnetomotive Force - mmf).}$$

יחידות: אמפרים סיבוביים [At].

$$R_m = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \text{ - מִיאון מגנטי (reluctance).}$$

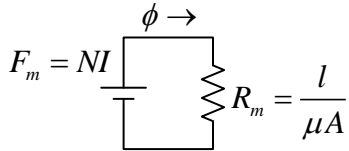
יחידות: אמפרים סיבוביים לזרם $[At/Wb] = [H^{-1}]$.

A – שטח החתך של הליבה, l – האורך הממוצע של מסלול השטף.

מתקיים כי סך השטף המגנטי שווה ליחס שבין הכוח המגנטו-מניע למיאון המגנטי:

$$\phi = \frac{F_m}{R_m}$$

אנלוג חשמלי:

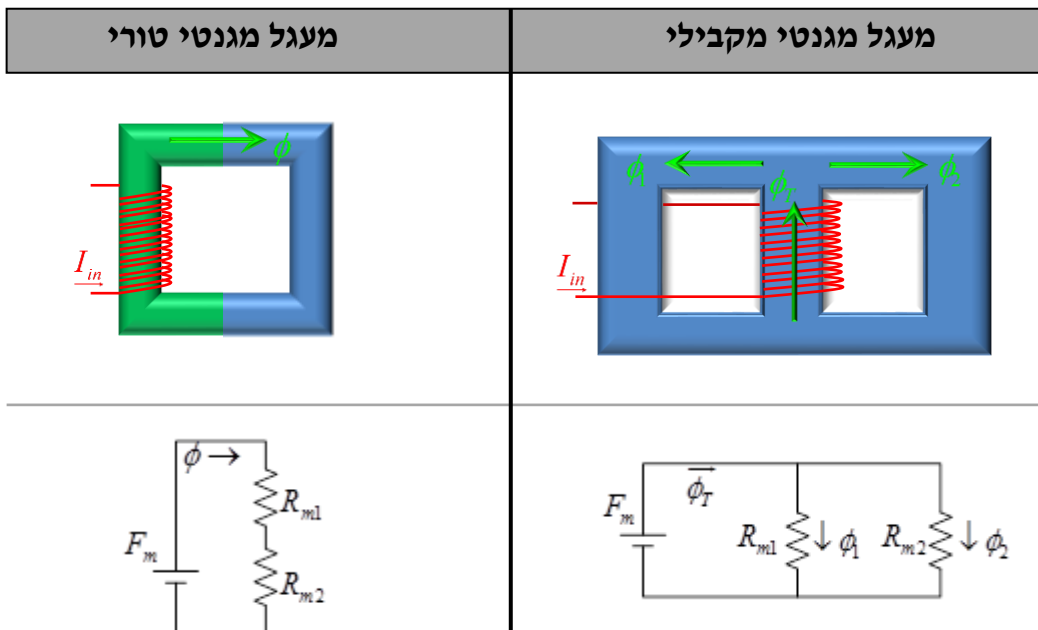


נוכל לסרטט תרשים חיבורים למעגל מגנטי באופן הבא:
כאשר הזרם הוא השטף, מקור המתח הוא הכוח המגנטו-מניע וההתנגדות היא המיאון המגנטי.

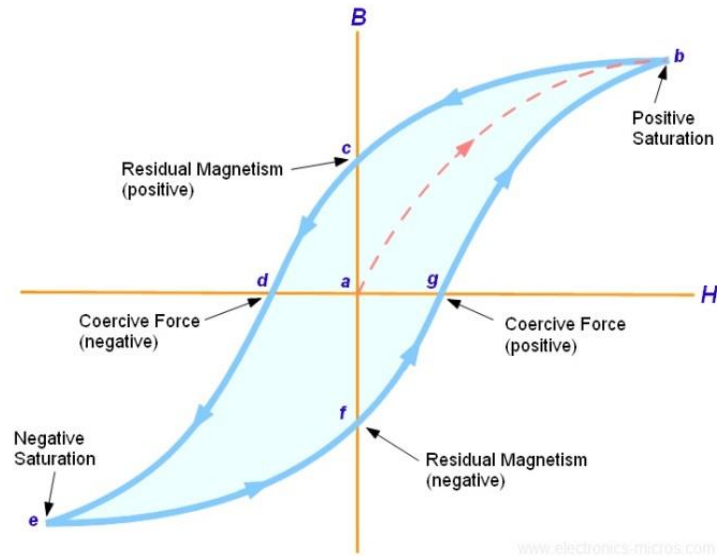
להלן טבלה המקשרת בין האנלוגים החשמליים והמגנטיים:

אנלוג חשמלי		אנלוג מגנטי	
יחידות	גודל	יחידות	גודל
v	U	At	F
A	I	Wb	phi
Omega	$\frac{U}{I} = R = \frac{l}{\sigma A}$	1/H	$\frac{F_m}{\phi} = R_m = \frac{l}{\mu A}$
A / m ²	$J = \frac{I}{A}$	Wb / m ² = T	$B = \frac{\phi}{A}$
1 / Omega	sigma	H / m	mu
v / m	E	A / m	H

מעגלים טוריים ומקבילים:

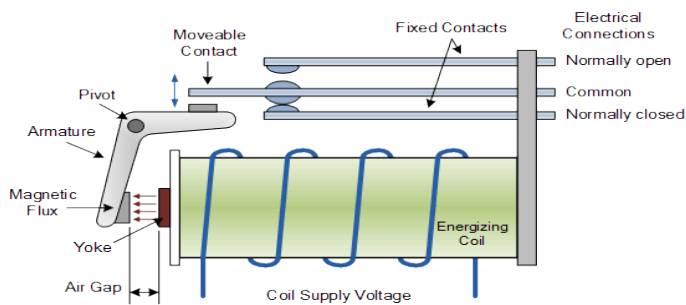


עקום B-H:



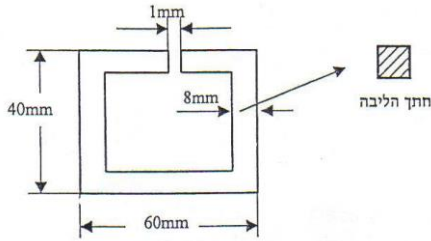
ממסרים:

ממסר הוא התקן המגיל מפסק וסליל. כאשר זורם זרם בסליל נוצר שדה מגנטי הגורם לתנועה מכנית שמועברת מפסק. מספק זה יכול לעובר ממצב 'רגיל' למצב 'מופעל'. ישנו בידוד מושלם בין חיבורים הסליל לחיבורי המפסק כך שהתקן זה יכול לשמש לחיבור וניתוק לש מעגלי מתח רשת ע"י מעגלי מתח נמוך.



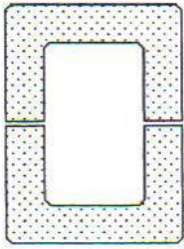
הכוח המכני שמתפתח בחריץ האוויר של ממסר הוא: $F = \frac{B_g^2 A_g}{2\mu_0}$

תרגילים:



- (1) באיור מתוארת ליבה מגנטית בעלת חריץ אוויר. חתך הליבה אחיד בכל האזורים והוא בצורת ריבוע עם אורך צלע של 8mm . הליבה עשויה פרומגנטי בעל $\mu_r = 1400$.

- א. חשב את המיאון של המעגל הנתון.
 ב. על הליבה מלופפות 500 כריכות ודרכן זורם זרם של 1.5A . מהי ההשראה המגנטית (צפיפות השטף) שמתקבלת במעגל?
 ג. חשב את האנרגיה האגורה בסליל המתואר בסעיף ב'.



- (2) באיור מתואר מבנה ליבה של סליל. בין שני חצאי הליבה מותקן מפריד היוצר שני חריצי אוויר. הליבה עשויה מחומר פרומגנטי בעל פרמאביליות יחסית 2100. האורך הממוצע של הליבה ללא חריצי האוויר הוא 154mm ושטח החתך שלה הוא 38mm^2 . אורך כל אחד מחריצי האוויר הוא 0.14mm . על הליבה מותקן סליל בעל 90 כריכות שאינו נראה באיור.

- הסליל עשוי מנחושת $\left(\rho = 0.0175 \frac{\Omega\text{mm}^2}{m}\right)$, באורך של 67m ובעל שטח חתך 0.2mm^2 . הסליל מחובר למקור מתח ישר של 5V .
 א. מהי עוצמת הזרם בסליל?
 ב. מהו הגודל של השדה המגנטי בליבת הברזל?

- (3) משרן (Inductor) בנוי מטבעת סגורה של חומר פרומגנטי שעליה מלופפות 30 כריכות של מוליך נחושת מבוזבז. אורך מסלול השטף המגנטי שבטבעת הוא 90mm ושטח החתך שלו הוא 65mm^2 . החדירות היחסית (Permeability) של החומר שממנו עשויה הטבעת היא $\mu_r = 2000$. אורך מוליך הנחושת שבמשרן הוא 1.1m ושטח החתך שלו הוא 0.75mm^2 . ההתנגדות הסגולית של נחושת היא $0.018 \frac{\Omega\text{mm}^2}{m}$. במוליך המשרן זורם זרם שגודלו 2A .
 א. חשב את הספק איבודי האנרגיה במוליך המשרן.
 ב. כמה אנרגיה אגורה בשדה המגנטי שבמשרן?
 ג. כמה שטף מגנטי שוטף בטבעת החומר הפרומגנטי?

4) בשאלה זו נלמד כיצד לחשב השראות של התקן פרומגנטי באמצעות המיאון

המגנטי ומספר הכריכות של התיל ע"י הנוסחה: $L = N^2 / R_m$
 א. ההשראות מוגדרת בתור היחס שבין השטף המגנטי לזרם.

בפרט עבור סליל עם N כריכות אנו מגדירים: $L = N \frac{\phi}{i}$
 היעזר בחוק אוהם המגנטי והוכח כי מתקיים: $L = N^2 / R_m$
 ב. נתון סולנואיד בעל 500 כריכות.

הכריכות מלופפות על ליבה פרומגנטית בעלת שטח חתך 5cm^2 ואורך 20cm .
 חומר הליבה בעל חלחלות יחסית של 1000. חשב את השראות הסולנואיד.

5) על מנת לבנות סליל שהשראותו $60\mu\text{H}$, עומדים לכרוך 35 כריכות של מוליך

מבודד על טבעת העשויה חומר פרומגנטי. שטח החתך של הטבעת 18mm^2 ,
 האורך הממוצע של מסלול השטף המגנטי שבטבעת 115mm , החדירות
 היחסית של החומר הפרומגנטי שממנו עשויה הטבעת $\mu_r = 1500$ וכשצפיפות
 השטף המגנטי בטבעת גדולה מ- 0.8T החומר נכנס לרוויה מגנטית. המוליך
 המבודד עשוי מנחושת בעלת התנגדות סגולית של $\rho = 0.0175 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$, שטח
 החתך של המוליך 0.5mm^2 ואורכו 1m .

א. מה המיאון של הטבעת?

ב. מה אורך חריץ האוויר שיש לעשות בטבעת על מנת שהשראות הסליל
 תהיה כנדרש? אין חריץ האוויר משנה את האורך הממוצע של השטף
 המגנטי שבטבעת.

חיברו את הסליל אל תא מתח-ישר בעל כוח אלקטרו-מניע שעוצמתו 1.45V
 והתנגדותו הפנימית היא 0.35Ω .

ג. מה התנגדות מוליך הנחושת?

ד. האם החומר הפרומגנטי שממנו עשויה הטבעת שחרצו בה את חריץ
 האוויר הנדרש יהיה ברוויה מגנטית?

6) סליל בנוי מ-180 כריכות של מוליך מבודד. הכריכות מלופפות על מסגרת מלבנית

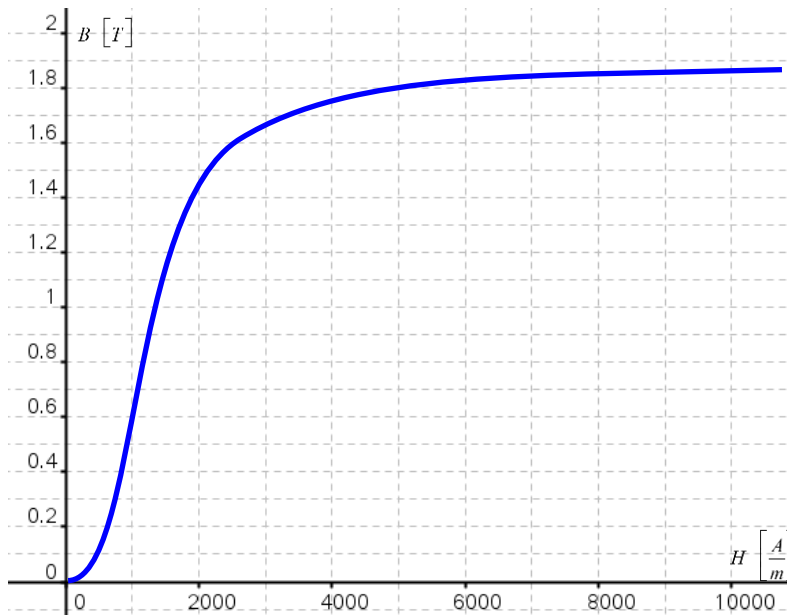
העשויה חומר פרומגנטי. אורך מסלול השטף המגנטי שבחומר הפרומגנטי
 הוא 0.12m ושטח החתך של המסלול הוא $3 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$.

במסגרת המלבנית, בניצב למסלול השטף המגנטי, יש חריץ אוויר שאורכו 0.2mm .
 א. סרטט תרשים המתאר את הסליל לפי הפרטים שלעיל.

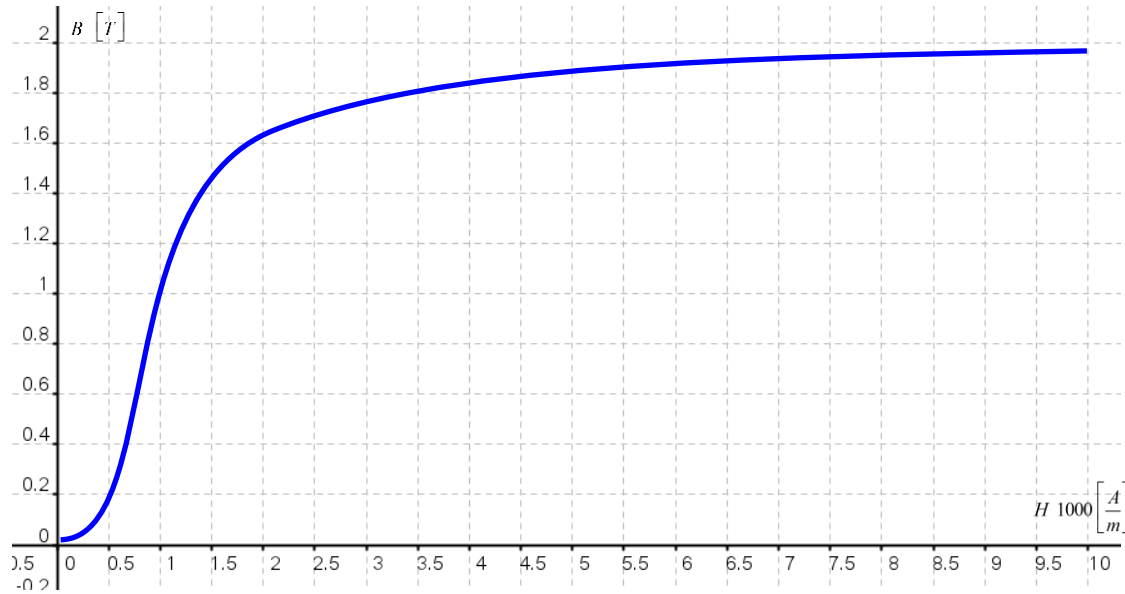
ציין על התרשים שסרטטת איזה חלק של הסליל תורם למיאון ואיזה
 חלק תורם להתנגדות.

כשזרם בסליל זרם ישר שעוצמתו $3A$ מדדו את השראות הסליל ומצאו שהגודל שלה $27.6mH$.

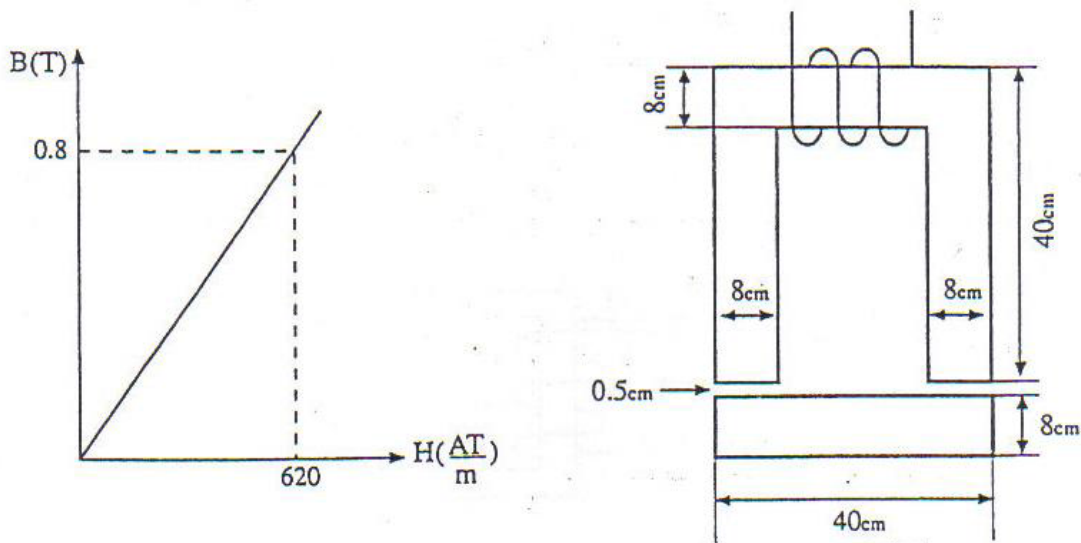
- ב. היכן על עקום המגנט שבאיור הייתה נקודת העבודה (H_{WP}, B_{WP}) של המעגל המגנטי בזמן המדידה?
- ג. מה היה הגודל של החלחלות היחסית μ_r של החומר הפרומגנטי בזמן מדידת השראות הסליל?
- ד. האם בזמן המדידה של השראות הסליל, החומר הפרומגנטי היה ברוויה מגנטית?



- 7) ליבת אלקטרומגנט עשויה חומר פרומגנטי שעקום המגנט שלו $B(H)$ נתון באיור להלן. לליבה צורת טבעת ובה חריץ אוויר שאורכו $l_g = 2 \cdot 10^{-3} m$. אורך המסלול של השטף המגנטי של החומר הפרומגנטי הוא $l_1 = 0.15 m$ ושטח החתך של מסלול השטף בחומר ובחריץ אוויר הוא $1.6 \cdot 10^{-4} m^2$. כשבמוליכי הסליל של האלקטרומגנט זרם ישר שעוצמתו $6A$, בליבה ובחריץ האוויר שוטף שטף מגנטי שגודלו $0.288 mWb$ - נקודת העבודה של המעגל המגנטי של האלקטרומגנט.
- א. מה החלחלות המגנטית היחסית μ_r של החומר הפרומגנטי בנקודת העבודה המוגדרת לעיל?
 - ב. מה המיאון של המעגל המגנטי של האלקטרומגנט?
 - ג. כמה כריכות יש בסליל האלקטרומגנט?
 - ד. כמה אנרגיה אגורה בסליל בנקודת העבודה המוגדרת לעיל?

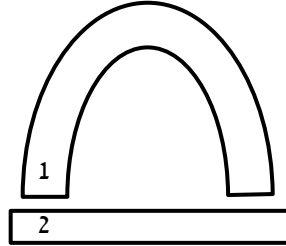
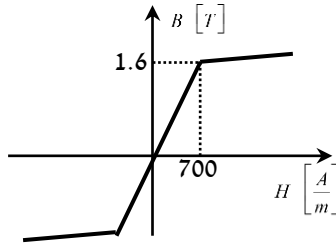


- 8 באיור מתואר מעגל מגנטי ועקומת המגנט של החומר הפרומגנטי ממנו עשויה הליבה. על הליבה מלופף סליל בעל 500 ליפופים וזורם דרכו זרם של 3A. אורך חריץ האוויר הינו קבוע ואינו מושפע מכוח המשיכה בין חלקי הליבה. כמו כן, ניתן להזניח את אורך החריץ בהשוואה לאורך הממוצע בליבה.

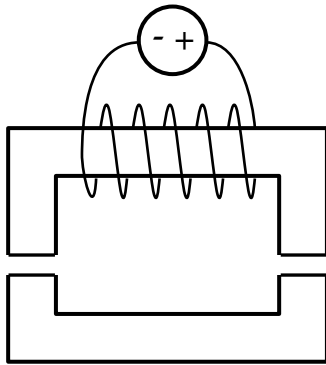


- חשב את ההתנגדות המגנטית של המעגל.
- חשב את צפיפות השטף המגנטי.
- חשב את ההשראות העצמית של הסליל.

- 9 באיור 1 מתואר החתך של אלקטרומגנט הבנוי משני חלקים פרומגנטיים. על החלק בעל צורת הפרסה כרוכות 400 כריכות, אין הן נראות באיור. האורך הממוצע של מסלול השטף המגנטי בחלק 1: $l_1 = 0.15m$, ובחלק 2: $l_2 = 0.03m$. שטח החתך של מסלול השטף בשני חלקי האלקטרומגנט ובחריץ האוויר הוא $A = 1.5 \cdot 10^{-4} m^2$. האורך של כל אחד משני חריצי האוויר: $l_g = 0.1mm$. באיור 2 נתון עקום המגנטי המקורב של החומר ממנו עשוי האלקטרומגנט.

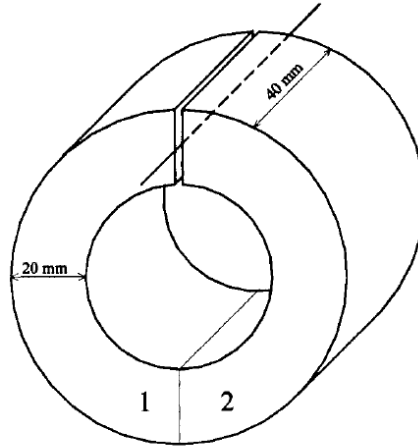


- איור 1 – החתך של האלקטרומגנט איור 2 – עקום המגנט של החומר הפרומגנטי
- א. מה החלחלות המגנטית היחסית של החומר ממנו עשוי האלקטרומגנט?
 ב. כמה זרם יש להעביר בכריכות כדי שהחומר הפרומגנטי ממנו הוא עשוי ימצא ברוויה מגנטית?
 ג. מדוע כשהחומר הפרומגנטי ממנו עשוי האלקטרומגנט נמצא ברוויה מגנטית, ההשראות של האלקטרומגנט קטנה מההשראות שלו כשאינו ברוויה?



- 10 אלקטרומגנט בנוי משני חלקים העשויים מחומר פרומגנטי שהחדירות היחסית שלו היא $\mu_r = 2100$. האורך של מסלול השטף המגנטי בשני החלקים הפרומגנטיים יחד הוא $0.154m$. שטח החתך של כל אחד משני החלקים הפרומגנטיים הוא $38 \cdot 10^{-6} m^2$ והוא אחיד לכל אורך מסלול השטף המגנטי. האורך של כל אחד משני חריצי האוויר הוא $0.14 \cdot 10^{-3} m$. בסליל של האלקטרומגנט יש 90 כריכות והוא עשוי מוליך נחושת. אורך המוליך $67m$, שטח החתך שלו $0.2mm^2$ וההתנגדות הסגולית של הנחושת $\rho = 0.0175 \frac{\Omega mm^2}{m}$. הסליל מחובר למקור מתח ישר שהמתח שלו $5v$.
- א. מה עוצמת הזרם בסליל של האלקטרומגנט?
 ב. מה המיאון של המעגל המגנטי של האלקטרומגנט?
 ג. מה צפיפות השטף המגנטי שבחריצי האוויר?
 ד. כמה אנרגיה אגורה באלקטרומגנט?
 ה. מה ההספק של איבודי האנרגיה בסליל?

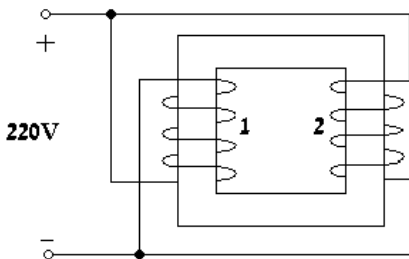
- 11) התרשים של ליבת אלקטרומגנט שבנויה בצורת טבעת נתון באיור. על הליבה מותקן סליל שאינו נראה באיור ובו 500 כריכות. אורך חריץ האוויר שבטבעת $l_g = 2\text{mm}$, העובי שלה 20mm ו- 40mm רוחבה. האורך הממוצע של מסלול השטף המגנטי בכל אחד משני החומרים הפרומגנטיים שמהם עשויה הטבעת: $l_{F1} = l_{F2} = 80 \cdot 10^{-3}\text{m}$.
החדירות היחסית של שני חומרים אלו: $\mu_{r1} = 1500$, $\mu_{r2} = 700$.



א. כמה זרם יש להעביר בסליל על מנת שהשדה המגנטי בחריץ האוויר

$$? B_g = 0.01\text{T} = 0.01 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

- באמצע חריץ האוויר התקינו מוליך ישר. המוליך ניצב לפני הטבעת ומקביל לרוחב הטבעת כמתואר באיור. דרך המוליך עובר זרם ישר של 5A ובסליל עובר זרם ישר שממלא את הדרישה לעיל.
ב. מה הכוח שיפעל על המוליך?



- 12) שני סלילים מלופפים על הליבה המגנטית שבתרשים.

הליבה עשויה חומר בעל חדירות מגנטית

יחסית 500 ומידותיו: 40cm אורך ו- 30cm גובה.

חתך הליבה הוא אחיד בצורת ריבוע עם צלע

של 2.5cm . לסליל הראשון יש 800 כריכות

והתנגדותו 400Ω ולסליל השני יש 1200 כריכות

והתנגדותו 250Ω . חשב את הגדלים הבאים:

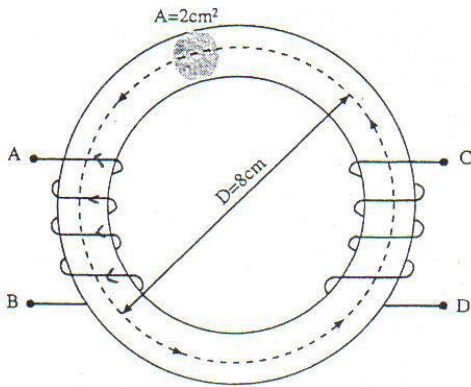
א. ההתנגדות המגנטית של המעגל הנתון.

ב. השטף המגנטי דרך הליבה וציין גם את כיוונו.

ג. ההתנגדות המגנטית של הליבה אם בליבה עושים חריץ אוויר באורך של 1mm .

ד. מהו מקור המתח הנדרש כדי לקבל בליבה עם חריץ האוויר את אותו

השטף כמו שהתקבל במתח של 220V בליבה ללא חריץ?



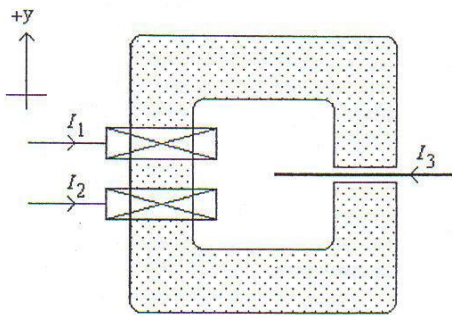
13) במעגל המגנטי הנתון, הגרעין עשוי מחומר בעל חדירות מגנטית יחסית של 930. על הגרעין מלופפים שני הסלילים הבאים: הסליל AB - בעל כריכות, 850 והסליל CD - בעל כריכות, 500. כאשר יש זרם בסליל AB, בסליל CD אין זרם. כיוון השטף המגנטי בגרעין הינו כמתואר באיור.

א. קבע מהו כיוון הזרם בסליל AB והסבר כיצד קבעת זאת.

ב. חשב את גודל השטף בליבה כאשר: $I_{AB} = 2A$, $I_{CD} = 0A$.

ג. מהו כיוון הזרם הדרוש בסליל CD ומהי עוצמתו כך שהשטף המגנטי בגרעין יתאפס?

14) באיור מתואר תרשים עקרוני של שני סלילים המותקנים על ליבת חומר פרומגנטי. לגרעין הנתונים הבאים:



אורך ממוצע לא כולל את חריץ האוויר 25cm, אורך חריץ האוויר הוא 2mm ושטח החתך הוא $4cm^2$. החלחלות היחסית היא 3250. הכיוון של הזרם בכל אחד מהסלילים הוא כמתואר באיור. בסליל 1 יש כריכות, התנגדותו 13.5Ω והוא מחובר למתח ישר של 9v.

בסליל 2 יש 180 כריכות, הוא בנוי ממוליך נחושת $\left(\rho = 0.0175 \frac{\Omega mm^2}{m}\right)$ באורך

של 30m, שטח החתך שלו הוא $0.15mm^2$ והוא מחובר למקור מתח ישר של 1.5v. השטף שמקורו בזרם I_1 שוטף בעמוד עליו מותקן הסליל בכיוון החיובי של ציר ה-y והשטף שמקורו בזרם I_2 שוטף בכיוון ההפוך לשטף שמקורו I_1 .

א. מהו שיעור הזרמים בכל אחד מהסלילים?

ב. מהו הגודל והכיוון של השטף המגנטי בחריץ האוויר?

ג. כמה השראות יש לסליל 1?

ד. לתוך חריץ האוויר הכניסו מוליך נושא זרם I_3 כמתואר באיור.

המוליך נמצא במישור ה-df. מה יהיה כיוון הכוח שיופעל על המוליך?

תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } R_m = 13.92M \frac{1}{H} \quad \text{ב. } B = 0.842 \frac{Wb}{m^2} \quad \text{ג. } E = 20.2mJ$$

$$(2) \quad \text{א. } I = 0.853A \quad \text{ב. } B = 0.273 \frac{Wb}{m^2}$$

$$(3) \quad \text{א. } P = 0.1056w \quad \text{ב. } W = 3.267mJ \quad \text{ג. } \phi = 0.108mWb$$

$$(4) \quad \text{ב. } L = 0.785H$$

$$(5) \quad \text{א. } R_m = 3.389M \frac{1}{H} \quad \text{ב. } l_g = 385\mu m \quad \text{ג. } R_L = 35m\Omega$$

ד. המעגל לא נכנס לרוויה. $B = 0.358T$

$$(6) \quad \text{ב. } (H_{wp}, B_{wp}) = \left(2250 \frac{A}{m}, 1.533T \right) \quad \text{ג. } \mu_r = 542.29$$

ד. המעגל לא ברוויה כי $B = 1.533T < 1.8T$ כאשר: $B_{sat} \approx 1.8T$

$$(7) \quad \text{א. } \mu_r = 409.255 \quad \text{ב. } R_m = 11.77M \frac{1}{H} \quad \text{ג. } N = 565 \quad \text{ד. } E = 488mJ$$

$$(8) \quad \text{א. } R_{mT} = 1.417M \frac{1}{H} \quad \text{ב. } B = 0.165 \frac{Wb}{m^2} \quad \text{ג. } L = 0.176H$$

$$(9) \quad \text{א. } \mu_r = 1818 \quad \text{ב. } I = 0.951A \quad \text{ג. מכיוון ש- } L = N \frac{\phi}{I} \text{ וברויה}$$

הזרם גדל אך השטף קבוע (עקב B קבוע ברוויה), לכן נקבל השראות קטנה יותר ברוויה מאשר במצב שאינו רוויה.

$$(10) \quad \text{א. } I = 0.852A \quad \text{ב. } R_m = 7.4M \frac{1}{H} \quad \text{ג. } B = 0.272T$$

$$\text{ד. } W = 0.397mJ \quad \text{ה. } P = 4.255w$$

$$(11) \quad \text{א. } I = 34.496mA \quad \text{ב. } F = 2mN$$

$$(12) \quad \text{א. } R_m = 3.3M \frac{1}{H} \quad \text{ב. } \phi = 1.87\mu Wb \text{ עם כיוון השעון.}$$

$$\text{ג. } R_m = 4.58M \frac{1}{H} \quad \text{ד. } U = 305.87v$$

$$(13) \quad \text{א. מ-B ל-A} \quad \text{ב. } \phi = 1.58mWb \quad \text{ג. } I_{CD} = 3.38A \text{ וכיוונו מ-C ל-D.}$$

$$(14) \quad \text{א. } I_1 = \frac{2}{3}A, I_2 = \frac{3}{7}A \quad \text{ב. } \phi = 18.44\mu Wb$$

$$\text{ג. } L = 12.8mH \quad \text{ד. כיוון הכוח יהיה מחוץ לדף.}$$

סרטון – צימוד ומעגלים מגנטיים בזרם חילופין:

השראה עצמית והשראה הדדית:

השראה עצמית:

ההשראה העצמית של סליל בעל N כריכות אשר מזרימים דרכו זרם I והוא יוצר שטף ϕ לאורכו היא: $L = N \frac{\phi}{I}$.

סימון שטפים עבור זוג סלילים מצומדים:

- ϕ_{11} - השטף העצמי של הסליל הראשון (השטף שהוא יוצר ותורם לו להשראות העצמית).
- ϕ_{22} - השטף העצמי של הסליל השני, (השטף שהוא יוצר ותורם לו להשראות העצמית).
- ϕ_{12} - החלק מהשטף של הסליל הראשון אשר שוטף את הסליל השני.
- ϕ_{21} - החלק מהשטף של הסליל השני אשר שוטף את הסליל הראשון.

$$\left. \begin{aligned} \phi_{1T} = \phi_1 = N_1 (\phi_{11} \pm \phi_{21}) \\ \phi_{2T} = \phi_2 = N_2 (\phi_{22} \pm \phi_{12}) \end{aligned} \right\} \text{ הקשר בין השטפים הוא:}$$

מקדם הצימוד:

$$\left. \begin{aligned} \phi_{12} = k \phi_{11} \\ \phi_{21} = k \phi_{22} \end{aligned} \right\} \text{ החלק היחסי של השטף שעובר מסליל אחד לרעהו הוא:}$$

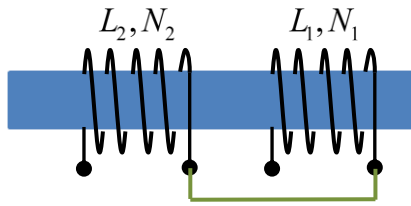
כאשר $0 \leq k < 1$, k הוא **מקדם הצימוד** של הסלילים.

השראה הדדית:

$$M = \frac{N_1 \phi_{12}}{I_2} = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} \text{ : ההשראה ההדדית בין שני סלילים מצומדים מוגדרת:}$$

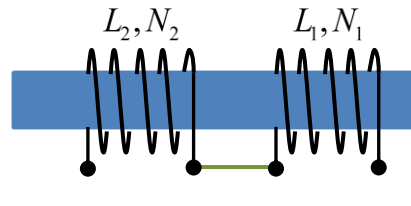
הקשר בין ההשראה ההדדית וההשראות העצמיות של זוג סלילים מצומדים ומקדם הצימוד הוא: $M = k \sqrt{L_1 L_2}$

השראות שקולה מסלילים מצומדים המחברים בטור:



צימוד שלילי / מקרה נגדי

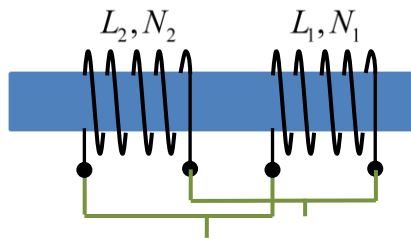
$$L_{eq} = L_1 + L_2 - 2M$$



צימוד חיובי / מקרה מסייע

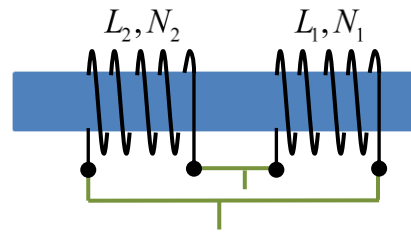
$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M$$

השראות שקולה מסלילים מצומדים המחברים במקביל:



צימוד שלילי / מקרה נגדי

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$



צימוד חיובי / מקרה מסייע

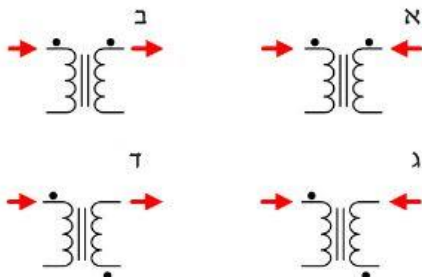
$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

סימון סכמתי:

הנקודות שמסומנות בכל איור מציינות את כלל הקיטוב של הסלילים. משמעות הנקודות באה לידי ביטוי עם ידיעת כיווני הזרמים באופן הבא:

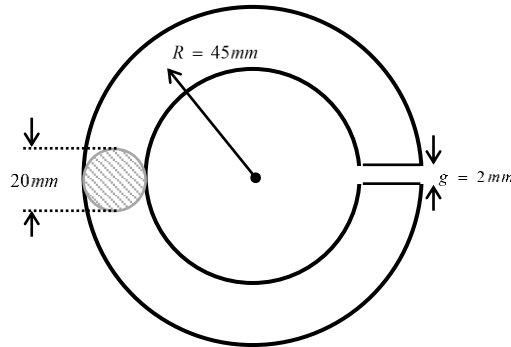
1. אם כיווני הזרמים בשני הסלילים המקוטבים נכנסים דרך הנקודות אז הצימוד הוא חיובי (מסייע).

2. אם זרם אחד נכנס לנקודה וזרם אחר יוצא ממנה אז הצימוד הוא שלילי (נגדי).

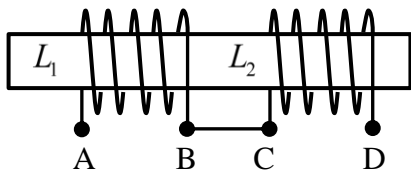


תרגילים:

- 1) על הליבה המתוארת באיור מלופף סליל שאינו מופיע באיור בעל 1200 כריכות. החומר הפרומגנטי ממנו עשויה הליבה הינו בעל חדירות מגנטית יחסית – 3000.

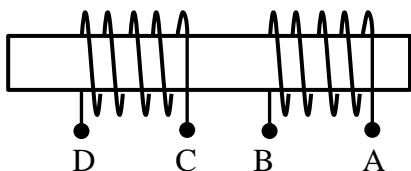


- א. מהו המיאון של המעגל המגנטי?
 ב. מהי ההשראות העצמית של הסליל?
 ג. מהו הערך המוחלט של עכבת סליל האלקטרומגנט אם ידוע כי הסליל עשוי מוליך נחושת $\left(\rho = 0.0175 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$ בעל שטח חתך של $A = 0.5 \text{mm}^2$ ואורכו 80m וחדירות המעגל היא 50Hz ?



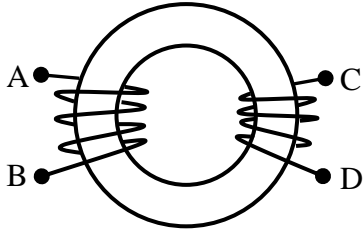
- 2) לשני הסלילים שבתרשים השראויות: $L_1 = 4 \text{mH}$, $L_2 = 16 \text{mH}$. מקדם הצימוד ביניהם הוא 0.9. חשב את ההשראות השקולה בין הנקודות A ו-D.

- 3) על ליבה גלילית בעלת רדיוס של 2cm ואורך של 25cm מלופפים שני סלילים בעלי 400 ו-600 כריכות בהתאמה. הליבה עשויה ברזל בעל חלחלות יחסית של 800. מקדם הצימוד בין הסלילים הוא 0.85. חשב את ההשראות השקולה כאשר:

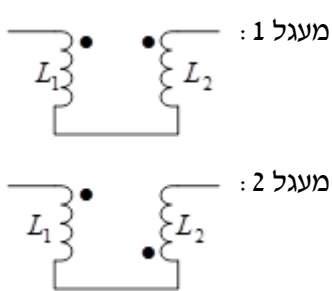


- א. הנקודה B מחוברת לנקודה C.
 ב. הנקודה B מחוברת לנקודה D.

4) על ליבה פרומגנטית בצורת טורואיד מלופפים שני סלילים בעלי 1000 ו-1500 כריכות בהתאמה. החלחלות היחסית של חומר הליבה היא 500. הקוטר הממוצע של הטורואיד הוא 40cm



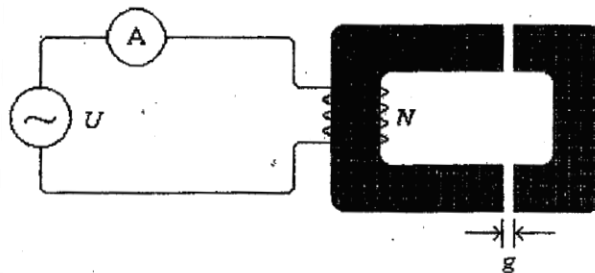
ושטח החתך הוא 8cm^2 . מקדם הצימוד הוא 0.9. חשב את ההשראות השקולה כאשר:
א. הנקודה A מחוברת לנקודה C.
ב. הנקודה A מחוברת לנקודה D.



5) שני סלילים בעלי השראויות: $L_1 = 2\text{mH}$, $L_2 = 8\text{mH}$ מחוברים ביניהם כך שמקדם הצימוד שלהם הוא 0.8. מצא את היחס בין ההשראות השקולה של מעגל 2 לבין ההשראות השקולה של מעגל 1.

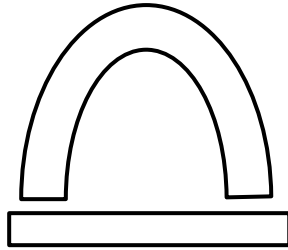
6) באיור שלפניך מתואר אלקטרומגנט המחובר למקור מתח בזרם חילופין 24V , 50Hz .

האורך הממוצע של מסלול השטף המגנטי בחומר הפרומגנטי הוא 250mm ושטח החתך הממוצע של החומר הוא 30mm^2 . הגודל של החדירות היחסית של החומר הפרומגנטי הוא 2000. גודל ההתנגדות של הסליל הוא 5.8Ω ויש בו 600 כריכות. לצורך השאלה, האלקטרומגנט נמצא באחד משני המצבים הבאים: מצב פתוח, שבו האורך של חריץ האוויר, g , הוא 2mm . מצב סגור, שבו שני חלקי האלקטרומגנט צמודים זה לזה, ובקירוב טוב, האורך של חריץ האוויר שווה לאפס.



- חשב את המיאון של האלקטרומגנט כאשר הוא נמצא במצב פתוח ובמצב סגור.
- חשב את השראות האלקטרומגנט בכל אחד משני המצבים.
- מה תהיה קריאת מד הזרם בכל אחד מהמצבים?

- 7) אלקטרומגנט מורכב משני חלקים פרומגנטיים: לחלק אחד צורת פרסה ולחלק השני צורת תיבה מלבנית. באיור מתואר מבט-פנים של האלקטרומגנט ללא הסליל המותקן עליו. האורך הממוצע של מסלול השטף המגנטי בפרסה הוא $l_1 = 0.2m$, שטח החתך שלה $A_1 = 40 \cdot 10^{-6} m^2$ וחלחלות (פרמאביליות) מגנטית יחסית בגודל 2700. האורך הממוצע של מסלול השטף המגנטי בתיבה הוא $l_2 = 0.05m$, שטח החתך שלה $A_2 = 25 \cdot 10^{-6} m^2$ וחלחלות (פרמאביליות) מגנטית יחסית בגודל 1200. האורך של כל אחד משני חריצי-אוויר המפרידים בין הפרסה לתיבה הוא $l_g = 0.2 \cdot 10^{-3} m$ ושטח החתך A_g שלהם שווה לשטח החתך של הפרסה. על הפרסה מותקן סליל בעל 430 כריכות, שאינו נראה באיור. הסליל עשוי מוליך נחושת מבודד בעל שטח-חתך של $A_{Cu} = 0.1mm^2$ ואורך של $15m$. גודל ההתנגדות הסגולית של הנחושת הוא $\rho_{Cu} = 0.0175 \frac{\Omega mm^2}{m}$.



- א. כמה השראות L יש לאלקטרומגנט?
 ב. כמה זרם I_{DC} יעבור בסליל האלקטרומגנט אם הוא יחובר למקור מתח ישר בעל מתח של $12v$?
 ג. כמה זרם I_{AC} יעבור בסליל האלקטרומגנט אם הוא יחובר למקור מתח חילופין בעל מתח של $18v$ ותדירות של $50Hz$?
- 8) בונים אלקטרומגנט שיפעל ממקור מתח חילופין $400Hz$ $108v$. ליבת האלקטרומגנט בנויה בצורת טבעת ועשויה מחומר פרומגנטי שהמאון שלו הוא $3.1 \cdot 10^6 \frac{1}{H}$. בטבעת האלקטרומגנט חריץ אוויר שאורכו $l_g = 1.8mm$ ושטח החתך שלו הוא $A_g = 2 \cdot 10^{-4} m^2$.
- א. מה המאון של חריץ האוויר ומה המאון השקול של האלקטרומגנט?
 ב. מה הכוח המגנטי מניע (כמ"מ) הדרוש כדי שהשדה המגנטי בחריץ האוויר כשזרם החילופין בשיאו יהיה $B_{max} = 1.35T$?

חישבו ומצאו שאפשר לעמוד בדרישה לעיל אם בסליל האלקטרומגנט יהיו 47 כריכות או 220 כריכות. כמו כן, כדי שהאלקטרומגנט יתאים גם לפעולה בזרם

ישר, יחברו אליו בטור נגד בגודל מתאים כך שההתנגדות השקולה של האלקטרומגנט בזרם ישר תהיה 3.5Ω .

ג. מה השראות האלקטרומגנט ומה הזרם דרכו בכל אחת משתי אפשרויות אלו כשהוא מחובר למקור זרם חילופין?

ד. עפ"י הביטוי של ההספק בזרם חילופין, איזו מבין שתי האפשרויות עדיפה? (אין צורך בחישוב כלשהו. יש לנמק את התשובה במשפט אחד בלבד).

9 האורך הממוצע של הליבה הפרומגנטית שבאיור $l_F = 0.15m$, שטח החתך של

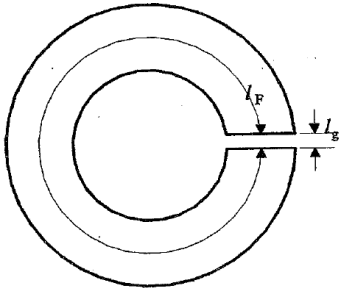
הליבה $A_F = 1.6 \cdot 10^{-4} m^2$ והחדירות היחסית שלה $\mu_r = 3000$.

אורך חריץ האוויר שבליבה $l_g = 2 \cdot 10^{-3} m$.

על הליבה מלופף סליל שאינו נראה באיור ובו 700 כריכות.

הסליל עשוי מוליך נחושת שאורכו $l_{Cu} = 30m$, שטח החתך $A_{Cu} = 0.15 mm^2$.

ההתנגדות הסגולית של נחושת $\rho_{Cu} = 0.0175 \frac{\Omega mm^2}{m}$.



א. מה המאון של הליבה הפרומגנטית?

ב. מה המאון של חריץ האוויר?

ג. מה המאון השקיל של המעגל המגנטי של ההתקן?

ד. מה השראות העצמית של ההתקן?

ה. מה התנגדות ההתקן?

ו. מה היגב ההתקן כשהוא מחובר למקור מתח חילופין שהתדירות שלו $f = 50Hz$?

ז. מה עכבת ההתקן?

10 מוליך נחושת מבודד שאורכו $135m$ ושטח החתך שלו $0.15 mm^2$ מלופף 240 כריכות על טבעת של חומר פרומגנטי.

ההתנגדות הסגולית של נחושת $\rho_{Cu} = 0.0175 \frac{\Omega mm^2}{m}$.

האורך של מסלול השטף המגנטי שבטבעת $90mm$, שטח החתך שלה $65 mm^2$

והמאון שלה: $8.77 \cdot 10^5 \frac{1}{H}$. החומר שממנו עשויה הטבעת נכנס לרוויה מגנטית

כשצפיפות השטף המגנטי B שבו גדול מ- $0.3T$.

א. מה ההתנגדות של המוליך מנחושת?

ב. מה השראות של הסליל שיוצרים המוליך והטבעת?

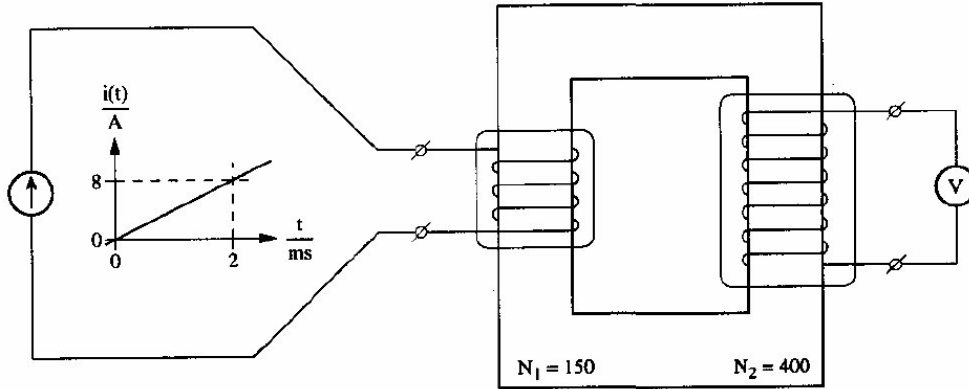
ג. מה הגודל של הזרם החשמלי במוליך הנחושת שיביא את החומר

הפרומגנטי של הטבעת לסף רוויה?

ד. מה הגודל של המתח היעיל של המקור שהתדירות שלו $400Hz$ שיביא

את הטבעת לסף רוויה?

11) באיור מתוארים שני סלילים המותקנים על טבעת העשויה חומר פרומגנטי. סליל 1 מחובר למחולל אות זרם – מקור זרם שאות הזרם שלו מתואר בגרף שבאיור. סליל 2 מחובר למד מתח.



האורך של מסלול השטף המגנטי שבחומר הפרומגנטי הוא $0.15m$, שטח החתך של המסלול הוא $0.3 \cdot 10^{-4} m^2$ והחדירות היחסית μ_r של החומר הפרומגנטי קבועה: 1400. מקדם צימוד השטף המגנטי הוא 0.95 (95% מהשטף המגנטי הנוצר בסליל 1 שוטף בסליל 2).

- א. מהי ההשראות העצמית של הסליל המחובר למחולל אות הזרם?
- ב. מהי ההשראות ההדדית שבין שני הסלילים?
- ג. מה תהיה הוריית מד המתח כאשר בסליל 1 זורם הזרם הנתון בגרף שבאיור?

תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } R_m = 5.3M \frac{1}{H} \quad \text{ב. } L = 0.271H \quad \text{ג. } |z| = 85.18\Omega$$

$$(2) \quad L_{eq} = 34.4mH$$

$$(3) \quad \text{א. } L_{eq} = 4.686H \quad \text{ב. } L_{eq} = 0.566H$$

$$(4) \quad \text{א. } L_{eq} = 0.22H \quad \text{ב. } L_{eq} = 2.38H$$

$$(5) \quad 4.55$$

$$(6) \quad \text{א. מצב סגור: } R_m = 3.31M \frac{1}{H}, \text{ מצב פתוח: } R_m = 109.4M \frac{1}{H}$$

$$\text{ב. מצב סגור: } L = 108.76mH, \text{ מצב פתוח: } L = 3.3mH$$

$$\text{ג. מצב סגור: } I = 0.69A, \text{ מצב פתוח: } I = 4.07A$$

$$(7) \quad \text{א. } L = 17.2mH \quad \text{ב. } I_{DC} = 4.571A \quad \text{ג. } I_{eff} = 3A$$

$$(8) \quad \text{א. } R_{m(0)} = 7.16M \frac{1}{H}, R_{m(T)} = 10.26M \frac{1}{H} \quad \text{ב. } F_m = 2770At$$

$$\text{ג. } L_1 = 0.215mH, I_1 = 30.5\angle -8.77^\circ A \text{ או } L_2 = 4.717mH, I_2 = 8.74\angle -73.545^\circ A$$

ד. האפשרות השנייה: זרם קטן יותר, הספק נמוך יותר.

$$(9) \quad \text{א. } R_m = 248.68k \frac{1}{H} \quad \text{ב. } R_{m(0)} = 9.94M \frac{1}{H} \quad \text{ג. } R_{m(T)} = 10.19M \frac{1}{H}$$

$$\text{ד. } L = 48.07mH \quad \text{ה. } R = 3.5\Omega \quad \text{ו. } X = 15.1\Omega$$

$$\text{ז. } z = (3.5 + 15.1j)\Omega$$

$$(10) \quad \text{א. } R = 15.75\Omega \quad \text{ב. } L = 65.678mH \quad \text{ג. } I = 71.256mA \quad \text{ד. } U_{eff} = 11.81v$$

$$(11) \quad \text{א. } L_1 = 7.916mH \quad \text{ב. } M = 20mH \quad \text{ג. } V_2 = 80v$$