

הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמים
אישית ברוחב 0.5 בכל צד.

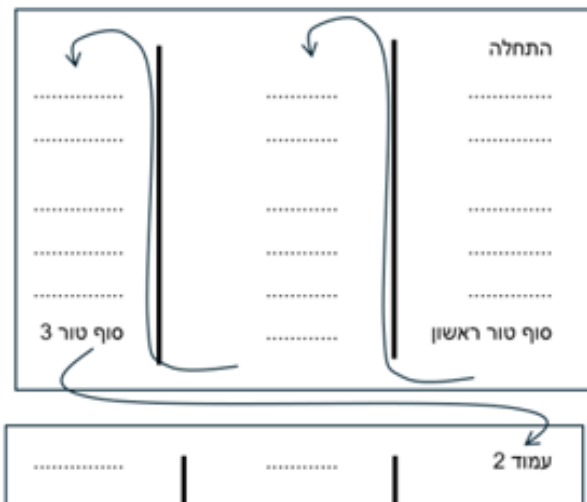
ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את
חלון השוליים, לבחור שוליים מותאמים אישית
ולשנות ל 0.5 בכל הכיוונים

עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר
העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים,
תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.
בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.

אין להוריד את הסמל של GOOL או כל סימן מסחרי אחר!!

מבנה הדף:



הדף בנוי משלושה טורים.

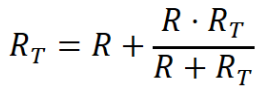
ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.

בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו
עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון
עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.

ניתן לשנות את כיוון הפריסה לרוחב, זה יוצר
מראה יותר מרווח על חשבון מספר עמודים.

כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאתר GOOL

הדף מיועד לכל שימוש שאינו מסחרי ובפרט לשימוש מרצים, מורים, סטודנטים ותלמידים
בקורסים שונים, ניתן לערוך את הדף אך יש להשאיר סימונים של אתר גול.



הזרם כחולות בזמן:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

בהתחלה ($t = 0$) הקבל מתנהג כמו קצר, המתח והמטען על הקבל הם אפס והזרם הוא $\frac{V_0}{R}$.

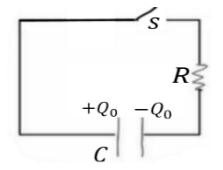
לאחר זמן רב ($t > 5\tau$) הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמתח קבועים והזרם מתאפס.

מעגל פריקה:

משוואת המתחים:

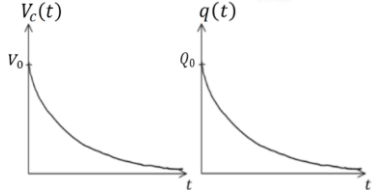
$$\frac{q}{C} - IR = 0$$

$$I = -\frac{dq}{dt}$$



המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בפריקה):

$$q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; V_c(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; Q_0 = CV_0$$



הזרם כתלות בזמן בפריקה זהה לטעינה: $I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$
מעגלים אינסופיים בקבלים: ראו מעגלים אינסופיים במעגלי זרם ישר.

מבנה הנגד וצפיפות זרם

התלות של ההתנגדות במבנה הנגד: $R = \rho \frac{L}{S}$

ρ - התנגדות סגולית, תלויה בחומר (לא להתבלבל עם צפיפות מטען נפחית).

L - אורך הנגד, הדרך שהמטענים עושים בנגד.

S (או A) - שטח החתך, משטח שמאונך לכיוון הזרם.

הערה: שטח החתך וההתנגדות הסגולית צריכים להיות אחידים לאורך הנגד. במדידה והם לא אחידים צריך לחלק את הנגד לחתיכות, לחשב התנגדות של כל חתיכה ולסכום לפי סוג החיבור (במקביל/ בטור).

מוליכות (לא לבלבל עם צפיפות מטען משטחית): $\sigma = \frac{1}{\rho}$

צפיפות הזרם ליחידת שטח: $I = \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$

כאשר האינטגרל הוא על שטח החתך, שטח שמאונך ל- $\vec{J}$.

אם $\vec{J}$ אחידה אז: $I = JS$

חוק אוהם הדיפרנציאלי: $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

כאשר σ היא המוליכות ו- E השדה החשמלי.

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען נפחית בתנועה:

$$\vec{J} = \rho \vec{v}$$

כאשר ρ היא צפיפות נושאי המטען ליחידת נפח ו- $\vec{v}$ היא מהירות נושאי המטען. במוליך, $\rho = nq$ כאשר n הוא מספר נושאי המטען ליחיד נפח ו- q הוא המטען של נושא מטען יחיד, בד"כ אלקטרון. מהירות המטענים נקראת מהירות הסחיפה $\vec{v}_{drift}$.

צפיפות הזרם ליחידת אורך: $I = \int \vec{k} \cdot d\vec{l}$

כאשר האינטגרל הוא על אורך שמאונך ל- $\vec{k}$

אם $\vec{k}$ אחידה אז: $I = kl$

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען משטחית בתנועה:

$$\vec{k} = \sigma \vec{v}$$

עבור צפיפות מטען ליחידת אורך λ בתנועה נקבל: $I = \lambda v$

משוואת הרציפות

משוואת הרציפות: $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{d\rho}{dt}$

צפיפות הזרם ליחידת שטח.

ρ - צפיפות המטען הנפחית

$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}$ זה כמות המטען שיוצאת ביחידת זמן מכל הכיוונים של קובייה בנפח dv ושווה לשינוי המטען בקובייה $\frac{d\rho}{dt}$

משוואת הרציפות בדי מימד: $\frac{d\sigma}{dt} = -\vec{\nabla}_{2D} \cdot \vec{k}$

$\vec{k}$ - צפיפות הזרם ליחידת אורך.

σ - צפיפות המטען המשטחית.

$\vec{\nabla}_{2D}$ הוא גרדיאנט דו מימדי (נגזרות רק במישור של צפיפות המטען)

משוואת הרציפות במימד אחד: $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{dI}{dx}$

I - הזרם בתל, λ - צפיפות המטען ליחיד אורך בתל.

הכוח המגנטי - חוק לורנץ

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

חוק לורנץ - הכוח המגנטי:

ניתן לחשב את הכוח בשתי דרכים.

דרך טרמיננטה (ראו מכפלה וקטורית בוקטורים).

דרך גודל וכיוון בנפרד, הגודל הוא: $F_B = qvB \sin \alpha$

כאשר α היא הזווית בין המהירות לשדה. וכיוון לפי כלל יד ימין:

שימו לב שאתם עם יד ימין!
כיוון הכוח הוא עבור מטען חיובי (עבור מטען שלילי הכוח בכיוון הפוך).

לא להפוך את הסדר של האצבע והאמה (עדיף לעשות קודם אקדח).

תנועה בשדה אחיד: מטען q בעל מסה m הנע במהירות v בשדה מגנטי אחיד (המאונך למהירות) עושה תנועה מעגלית, רדיוס המעגל הוא:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

אם v לא מאונך למהירות אז התנועה תהיה בורגית כאשר המעגל יהיה מסביב לשדה, רדיוס המעגל יהיה:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

$v \cos \alpha$ היא מהירות ההתקדמות לאורך ציר השדה. עובדת הכוח המגנטי: תמיד מתאפסת (כי הוא מאונך לתנועה).

הכוח המגנטי על תיל נושא זרם

הכוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך dl עם זרם I

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

הנמצאת בשדה מגנטי B הוא:

אם התיל ישר בשדה אחיד אז גודל הכוח הוא:

$$F = BIL \sin \alpha$$

את כיוון הכוח יש למצא לפי כלל יד ימין כמו בחוק לורנץ על מטען בודד כאשר כיוון הזרם (או כיוון ה- dl) מחליף את המהירות.

הכוח על תיל לאורך סגורה בשדה אחיד מתאפס.

הכוח על תיל בשדה אחיד אינו תלוי בצורת התיל, הכוח יהיה זהה לכוח הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

חוק ביו-סבר

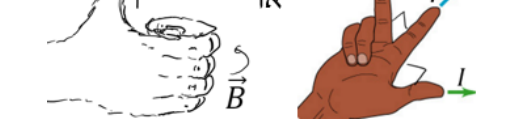
השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

$\vec{r}$ הוא הוקטור מהחתיכה לנקודה בה מחפשים את השדה.

$d\vec{l}$ הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.

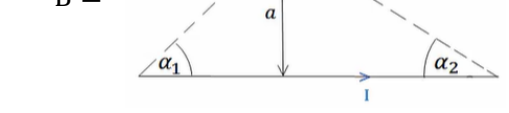
חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

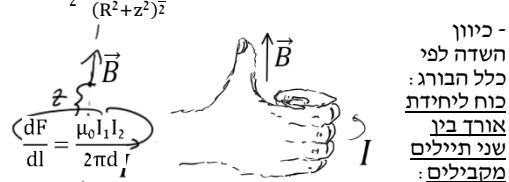
השדה של תיל סופי:

במרכז התיל:



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(\left(\frac{L}{2}\right)^2 + a^2 \right)^{-\frac{3}{2}}$$

שדה של טבעת לאורך ציר הסימטריה:



כיוון השדה לפי כלל הבורג:

כוח ליחידת אורך בין שני תילים מקבילים:

אם כיוון הזרמים הפוך.

חוק אמפר

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{in}; I_{in} = \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיק של B לאורך מסלול סגור. בדרי"כ נבחר מקרים בהם B אחיד לאורך המסלול והאינטגרל יהיה B כפול אורך המסלול.

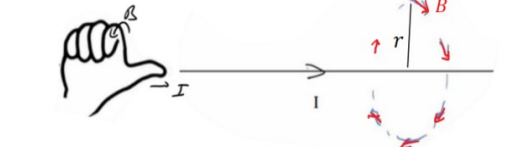
הזרם הוא סך הזרם שעובר דרך השטח הסגור במסלול. המקרים הנפוצים של חוק אמפר:

1. תיל / גליל / מעטפת גלילית אינסופיים.
2. מישור אינסופי. 3. סליל אינסופי / טורואיד.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

שדה של תיל אינסופי:

כאשר r הוא המרחק מהתיל.

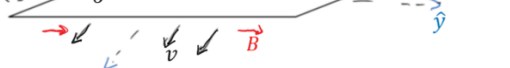


כאשר הזרם בכיוון $\hat{z}$ השדה בכיוון $\hat{\theta}$

שדה של מישור אינסופי:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \sigma v}{2} \begin{cases} -\hat{y}, & z > 0 \\ \hat{y}, & z < 0 \end{cases}$$

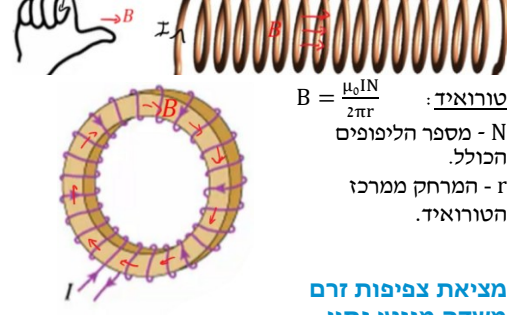
עבור מישור דק הטעון בצפיפות משטחית σ ונע בכיוון $\hat{x}$ במהירות v .



שדה של סליל אינסופי/סולנואיד:

כאשר n הוא מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל.

כיוון: לפי כלל הבורג, האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.



מציאת צפיפות זרם משה מגנטי נתון

מציאת צפיפות זרם משטחית $\vec{J}$ משה מגנטי נתון (חוק אמפר הדיפרנציאלי):

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

מציאת צפיפות זרם קווית $\vec{k}$ משה מגנטי נתון (כאשר יש אי רציפות בשדה):

$$\hat{n}_{1 \rightarrow 2} \times \Delta \vec{B} = \mu_0 \vec{k}$$

כאשר $\hat{n}_{1 \rightarrow 2}$ הוא וקטור יחידה בכיוון הקפיצה מתחום 1 לתחום 2 ו- $\Delta \vec{B} = \vec{B}_2 - \vec{B}_1$

בשביל למצא זרם של תיל נחפש שדה מהצורה $\vec{B} = \frac{C}{r} \hat{\theta}$

בקואורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הראשית ו- C קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי ($\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$) ונקבל

$$I = \frac{C 2\pi}{\mu_0}$$

חוק פאראדי

$$\epsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}; \phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

חוק פאראדי: הכא"מ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.

בד"כ נמצא באמצעות החוק את גודל הכא"מ ואת הכיוון נמצא לפי חוק לץ.

חוק לץ: הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.



הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

כאשר $\vec{v}$ היא מהירות הגוף (שימו לב למכפלה הסקלרית)

כא"מ הנוצר במוט הנע בשדה מגנטי: $\epsilon = BLv \sin \alpha$

כאשר v היא מהירות המוט, L האורך שלו ו- α היא הזווית בין המהירות לשדה.

כיוון הכא"מ הוא בכיוון של הכוח המגנטי הפועל על מטען חיובי בתוך המוט.

אפקט הול

בפועל רק אלקטרונים זזים במוליך כשיש זרם. כתוצאה מהתנועה הזו הם מרגישים כוח (אם יש שדה מגנטי) שדוחף אותם לדופן המוליך ונוצרת הפרדת מטענים הגורמת

לשדה חשמלי לרוחב המוליך. בשיווי משקל הכוח החשמלי שווה למגנטי. מהשוויון ניתן לחשב את השדה החשמלי ו- המתח הנוצר לרוחב המוליך:

$V = \frac{IdB_{\perp}}{nqA} = \frac{2IB_{\perp}}{nq\pi R}$ - המתח בין הקצוות של המוליך שמאונכות לכיוון הזרם וכיוון השדה המגנטי. I - הזרם במוליך. $B_{\perp}$ - הרכיב של השדה המגנטי שמאונך לזרם. n - מספר האלקטרונים ליחידת נפח במוליך. q - מטען האלקטרון. d - הרוחב של המוליך שמצדדיו נמדד המתח. A - שטח החתך של המוליך(מאונך לזרם) השוויון השני למקרה של מוליך גלילי, R רדיוס הגליל.

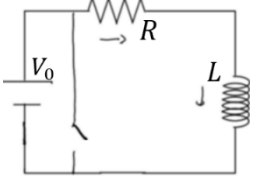
מומנט דיפול מגנטי
דיפול מגנטי הוא לולאת זרם סגורה.
מומנט הדיפול המגנטי($\vec{\mu}$ לפעמים מסומן ב- $\vec{m}$): $\vec{\mu} = I\vec{A}$ - הזרם בלולאה. $\vec{A}$ - השטח הסגור על-ידי הלולאה. כיוונו במאונך למשטח ובהתאם לכלל יד ימין של הזרם. השדה שיוצר דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדי הדיפול:
 $\vec{B} = \frac{\mu_0[3(\vec{\mu}\cdot\hat{r})\hat{r}-\vec{\mu}]}{4\pi r^3}$
מומנט כוח שפועל על דיפול מגנטי הנמצא בשדה מגנטי חיצוני:
 $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$
האנרגיה הפוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי
חיצוני: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$
השראות

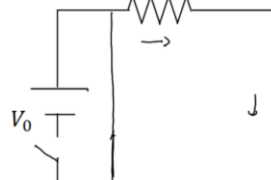
ההשראות ברכיב:
 $L = \frac{\Phi_B}{I}$ Φ_B הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב. - ההשראות היא **תכונה שתלויה רק במבנה** ולכן היא בד"כ קבועה.
חישוב השראות לפי הגדרה:
1. נניח שזורם זרם I ברכיב.
2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם בתוך הרכיב.
3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב.
4. נציב בנוסחה של ההשראות והזרם יצטמצם.

השראות של סליל:
 $L = \frac{\mu_0\pi a^2 N^2}{l}$ מספר הליפופים הכולל, l אורך הסליל ו- a רדיוס טבעת כא"מ ברכיב עם השראות L :
 $\varepsilon = -L\dot{I}$ - האנרגיה האגורה בסליל (או בכל רכיב בעל השראות):

האנרגיה האגורה בשדה המגנטי:
 $U = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV$ - את האינטגרל עושים על **כל המרחב**.
- זו אותה האנרגיה שמחשבים באמצעות ההשראות (פשוט צורת חישוב אחרת).
- ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).
המתח על סליל (משך) במעגל:
 $V_L = LI\dot{}$ הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

מעגלי RL
טעינה:


$$V_0 - IR - L\dot{I} = 0$$
$$I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$
$$\tau = \frac{L}{R}$$
 - סליל (או משרן) מתנהג בהתחלה כמו נתק ולאחר זמן רב כמו קצר.
פריקה:


$$-IR - L\dot{I} = 0$$
$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$


חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:
בטור:
 $L_T = L_1 + L_2 + \dots$
כאשר $V_T = V_1 + V_2 + \dots \rightarrow I_T = I_1 = I_2 = \dots$

במקביל:

$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$
כאשר $V_T = V_1 = V_2 = \dots \rightarrow I_T = I_1 + I_2 + \dots$
השראות הדדית

השראות הדדית:
חישוב השראות הדדית:
1. נניח שזורם זרם I_2 ברכיב 2.
2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם ברכיב 1.
3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב 1.
4. נציב בנוסחה של ההשראות ו- I_2 יצטמצם.
- השראות הדדית תמיד סימטרית $M_{1,2} = M_{2,1} = M$ ולכן ניתן תמיד לחשב $M_{1,2}$ ולהסיק על $M_{2,1}$ (או להפך).
יחס המתחים בשנאי:
 $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_1}{N_2}$

הפוטנציאל הקוטורי
חומרים פאראמגנטיים: חומרים המחזקים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים בעלי אטומים עם מס אלק' לא זוגי, לאטומים אלו דיפול מגנטי כתוצאה מסיבוב האלקטרון ה"נוסף". הדיפולים מתיישרים לכיוון השדה החיצוני ומגבירים אותו.
חומרים דיאמגנטיים: חומרים המקטינים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים ללא מומנט דיפול טבעי של האטומים. נוכחות השדה החיצוני גורמת ליצירת מומנט דיפול הפוך לשדה הקיים (על ידי שינוי מהירות הסיבוב של האלקטרון) ובכך להחלשת השדה החיצוני.
חומרים פרומגנטיים: חומרים בהם הקיטוב המגנטי נשמר גם כאשר השדה החיצוני נפסק. הקיטוב תלוי "בהיסטוריה" של החומר.
אפקט פרומגנטי<< דיאמגנטי>>פאראמגנטי.

וקטור המגנטיזציה $\vec{M}$: מומנט דיפול ליחידת נפח בחומר (יחידת של מומנט דיפול מגנטי חלקי נפח): $\vec{M} = N\vec{m}_1$ N הוא מספר הדיפולים ליחידת נפח בחומר. $\vec{m}_1$ הוא מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.
מומנט הדיפול הכולל של החומר:
 $\vec{m} = \int \vec{M} dV$ **צפיפות זרם קשורה**: ניתן לחשב את השדה המגנטי שיוצרים הדיפולים באמצעות חישוב השדה של צפיפות זרם קשורה.
 $\vec{j}_b = \vec{\nabla} \times \vec{M}$; $\vec{k}_b = \vec{M} \times \hat{n}$ וקטור המאונך לשפת החומר וכלפי חוץ.
צפיפות זרם כוללת וחופשית: ניתן להפריד את צפיפות הזרם הכוללת לשני חלקים
כאשר $\vec{j}_{free}$ היא צפיפות הזרם הנובעת ממטענים החופשיים לווז בחומר ו- $\vec{j}_b$ נובעת מהמגנטיזציה.

הוקטור $\vec{H}$:
 $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ - הוקטור $\vec{H}$ מקיים את חוק אמפר עבור הזרמים החופשיים: $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{in,free}$; $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}_{free}$; $\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$ **דיברגנט של $\vec{H}$** :
חומרים לינארים:
 $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$; $\vec{B} = \mu \vec{H}$ כאשר χ_m היא הסוסטיביליות המגנטית, תכונה שתלויה בחומר ובדרי"כ קבועה. μ היא הפרמביליות המגנטית כך ש: $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$
תנאי שפה:

1. $H_{2\perp} - H_{1\perp} = -(M_{2\perp} - M_{1\perp})$
2. $\vec{H}_{2||} - \vec{H}_{1||} = \vec{k}_{free} \times \hat{n}_{1\rightarrow 2}$
3. $B_{2\perp} = B_{1\perp}$
4. $\vec{B}_{2||} - \vec{B}_{1||} = \vec{k}_T \times \hat{n}_{1\rightarrow 2}$

הכי נוח להשתמש בתנאים 2 ו-3 ואילו מספיקים בשביל למצא את כל הרכיבים של כל השדות בהנחת הלינאריות או בהינתן המגנטיזציה.
מודל המטען המגנטי:

אם $\vec{j}_{free} = 0$ שדה משמר וניתן להגדיר פונקציית פוטנציאל מגנטי: $\vec{H} = -\vec{\nabla}\phi_m$ את הפוטנציאל (או השדה) ניתן למצא כמו שמוצאים פוטנציאל באלקטרוסטטיקה ממטען (באמצעות חוק גאוס, חוק קולון, משוואת לפלאס או כל שיטה אחרת), כאשר "המטען" המגנטי הוא: $\rho_m = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$ - משוואת לאפלאס: $\vec{\nabla}^2 \phi_m = -\rho_m$ - המודל תקף גם אם יש $\vec{k}_{free}$ (זרם חופשי על השפה). - המודל תקף גם עבור חומרים לא לינאריים.

הפוטנציאל הקוטורי
הפוטנציאל הקוטורי $\vec{A}$ **מוגדר לפי**:
משוואת פואסון לפוטנציאל הקוטורי (מחוק אמפר):
 $\vec{\nabla}^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}$
עבור כיול של הפוטנציאל $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$
פתרון המשוואה:
 $\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dv'$

$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{k}(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|} ds'$; $\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l}}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$

ניתן למצא פוטנציאל וקטורי מתוך שדה מגנטי במקרים סימטריים באמצעות אינטגרל מסלולי:

$\oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$

תנאי שפה לפוטנציאל הקוטורי:
כל רכיבי הפוטנציאל הקוטורי רציפים.
פיתוח מולטיפולי עד לסדר שני: סדר ראשון תמיד מתאפס

והסדר השני הוא: $\vec{A}_{dip}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{\vec{m} \times \vec{r}}{r^2}$ כאשר $\vec{m}$ הוא מונט הדיפול המגנטי של המערכת.

משוואות מקסוול
הצורה הדיפרנציאלית ; **הצורה האינטגרלית**:
1. חוק גאוס $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$; $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$;
2. $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$; $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$;
השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי.
3. $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$; $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$;
מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פארדי $\varepsilon = -\dot{\phi}_B$
4. $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$; $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$;

$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$ חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)
שדות משתנים בזמן זרם העתקה **GOOL**
ממשואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשתנה בזמן יוצר שדה חשמלי ולהפך.
אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה החשמלי אזי נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו חוק פארדי ובמקום הכא"מ נחשב את האינטגרל כאשר בדרי"כ יש סימטריה גלילית והאינטגרל הופך ל $E2\pi r$

אם נתון שדה חשמלי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה המגנטי אזי: נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר רק שבמקום זרם יש $\int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$ (או במקום צפיפות זרם $\epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$) (שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

וקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות **GOOL**
אנרגיה אלקטרו מגנטית האגורה בשדות:
 $U = \int \left(\frac{\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0} \right) dv$
צפיפות האנרגיה (אנרגיה ליח' נפח):
 $u_{em} = \frac{\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0}$
וקטור פוינטינג:
 $\vec{s} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$

שטף האנרגיה ליחידת שטח וליחידת זמן.
הקשר בין האנרגיה לוקטור פוינטינג בריק:
 $\oint \vec{s} \cdot d\vec{s} = -\frac{dU}{dt}$

בצד שמאל עושים אינטגרל של הוקטור פוינטינג על משטח סגור (שטף) ובצד ימין גוזרים בזמן את האנרגיה האגורה בשדות הכולא במשטח.
הקשר הדיפרנציאלי בריק:
 $\vec{\nabla} \cdot \vec{s} = -\frac{du_{em}}{dt}$

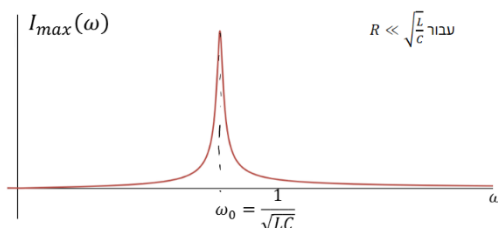
גלים אלקטרומגנטיים **GOOL**
משוואות הגלים בריק ($\rho = j = 0$):
 $\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$; $\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$
 c היא מהירות האור כאשר $\frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0$
- למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.
- המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow$
 z כנל: $\vec{\nabla}^2 E_x = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_x}{dt^2}$; $\vec{\nabla}^2 E_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}$;
- תזכורת ללאפליסאן: $\vec{\nabla}^2 E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$
פתרון המשוואה עבור רכיב כלשהו של $\vec{E}$ או של $\vec{B}$:

$E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$
 $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ הוא וקטור הגל, כיוונו הוא כיוון התקדמות הגל.

$\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$
 ω היא התדירות הזוויתית
כאשר f היא התדירות בהרץ ו- T הוא זמן המחזור.
- הקוסינוס בפתרון זהה לכל הרכיבים של השדה החשמלי והמגנטי, ההבדל בין הרכיבים הוא רק במקדם A_i .
איך למצא שדה מגנטי מחשמלי ולהפך:

תהודה: מצב שבו $I_{max}(\omega)$ מקסימאלי.
 - שימו לב, I_{max} הוא אמפליטודת הזרם במעגל עם מקור בעל תדירות ω מסוימת. תהודה מדברת על איזה תדירות צריך שתהיה למקור כך שהאמפליטודה הזו תהיה הכי גבוהה שאפשר.
 - בשביל למצוא את תדירות התהודה במקרה כללי צריך לגזור את I_{max} לפי ω ולהשוות לאפס. עבור $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$



מקבלים אמפליטודה מקסימאלית כאשר $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
פתרון עם מספרים מורכבים:

אם כל המשתנים הם פונקציות מהצורה $A \cos(\omega t + \phi)$ והמשוואות שלנו לינאריות. אז יותר נוח לעבוד עם מספרים מורכבים. כך ש:

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi) = \text{Re}\{\tilde{I}(t)\}$$

$$\tilde{I}(t) = I_0 e^{i(\omega t + \phi)}$$

(בדרי"כ לא רושמים את הגל) בעבודה עם מספרים מורכבים אפשר להוריד את התלות בזמן
פאזור: תיאור של המספר המורכב באמצעות וקטור במערכת דו מימדית. הפאזור מסתובב בזמן אבל בדרי"כ מסתכלים רק על הפאזור ב $t=0$

עכבה Impedance: תכונה שתלויה רק במבנה (קבועה כל עוד המבנה קבוע). הפאזה של העכבה היא הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב:

$$\varphi_z = \varphi_v - \varphi_I$$

$$|Z| = \frac{V_{max}}{I_{max}}$$

הרכיב	העכבה של הרכיב Z	הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב
נגד	R	המתח והזרם בנגד הם באותה הפאזה
סליל	$i\omega L$	בסליל המתח מקדים את הזרם ב $\frac{\pi}{2}$
קבל	$\frac{1}{i\omega C}$	בקבל המתח מפגר אחרי הזרם ב $\frac{\pi}{2}$

ניתן לחבר עכבות בדיוק כמו חיבור של נגדים ולקבל את העכבה הכוללת של המעגל:
 $\tilde{V}_s = Z_T \tilde{I}_s$
 הם הזרם והמתח של המקור (בייצוג המורכב).
ערכי RMS (ממוצע של ריבוע הגודל בזמן):

$$I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} ; V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

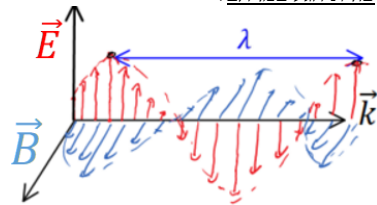
הספק רגעי: $P(t) = V(t)I(t)$
 לשים לב שההספק הרגעי הוא לא גודל לינארי ולכן אי אפשר לחשב אותו באמצעות הייצוג המורכב של המתח והזרם.

$$\bar{P} = \frac{V_{max} I_{max}}{2} \cos \phi = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi$$

כאשר ϕ היא הפאזה של המתח ביחס לזרם.
 $\cos \phi$ הוא מקדם/גורם ההספק. מצביע על ניצול האנרגיה במעגל.

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \hat{k} \times \vec{E} ; \vec{E} = c \vec{B} \times \hat{k}$$

צורת הגל במרחב:



השדה החשמלי תמיד מאונך לשדה המגנטי ושניהם תמיד מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

$$|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$\omega = c|k|$
יחס הדיספרסיה:

$$E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)$$

במקרה הזה הגל מתקדם בכיוון הפוך ל $\vec{k}$
מעגלי זרם חילופין

COOL

מעגל LC:

משוואת המעגל: $\frac{q}{C} + L\ddot{q} = 0$
 ו- $I = -\dot{q}$
 (ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)
 המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית פשוטה.

$$q(t) = A \cos(\omega t + \phi) ; \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

האנרגיה האגורה במעגל:
 (האנרגיה הכוללת נשמרת)

מעגל RLC: משוואת המעגל:

$I = -\dot{q}$ ו- $\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$
 (ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)
 המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מרוסנת. נגדיר $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$
 $\Gamma = \frac{R}{2L}$ ו-

הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:

מקרה 1 - ריסון חזק: $\Gamma > \omega_0$
 $q(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$

$$\lambda_{1,2} = \Gamma \pm \sqrt{\Gamma^2 - \omega_0^2}$$

מקרה 2 - ריסון קריטי: $\Gamma = \omega_0$
 $q(t) = Ae^{-\omega_0 t} + Bte^{-\omega_0 t}$

בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר משלושת המקרים.

מקרה 3 - ריסון חלש: $\Gamma < \omega_0$
 $q(t) = Ae^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \phi)$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}$$

בכל המקרים האנרגיה של המעגל (שאגורה בסליל ובקבל) דועכת בקצב כפול:

$$E \propto e^{-2\Gamma t}$$

(בריסון חזק קבוע הדעיכה הוא λ במקום Γ)

מעגלים עם מקור מתח חילופין:

משוואת המעגל:

$$\ddot{I} + \frac{R}{L}\dot{I} + \frac{1}{LC}I = -\omega V_0 \sin(\omega t)$$

ו- $I = \dot{q}$
 (ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת.

פתרון המשוואה:

$$I(t) = I_{max}(\omega) \cos(\omega t + \phi)$$

הפתרון ההומוגני הוא פתרון מעגל RLC והוא דועך בזמן.

הפתרון הפרטי נקרא הפתרון של המצב העמיד (לאחר זמן רב) בד"כ מתייחסים רק אליו.

$$I_{max}(\omega) = \frac{V_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2 + R^2}}$$

$$\tan \phi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$