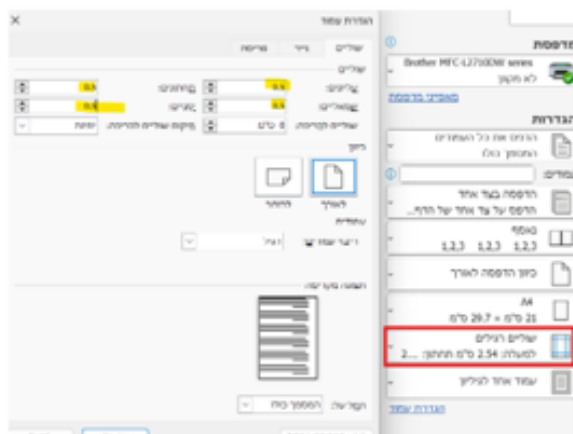


הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה:

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

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את חלון השולים, לבחור שולים 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!!

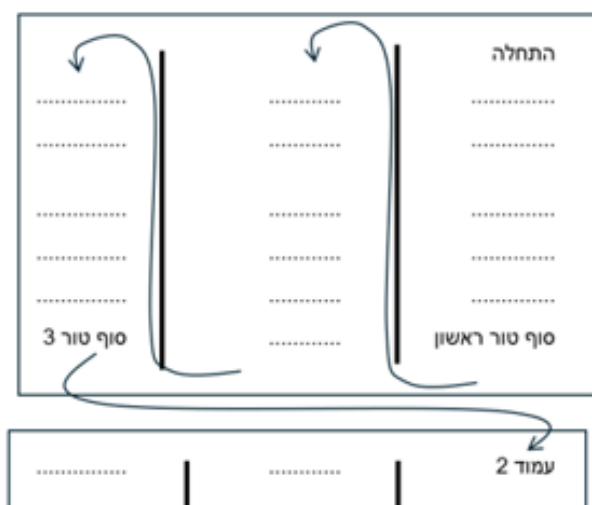
מבנה הדף:

הדף בנוי משלושה טורים.

ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.

בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באות
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 ולאטר 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.

צפיפות נפחית/משטחית/אורכית:

$$\rho = \frac{M}{V}; \sigma = \frac{M}{S}; \lambda = \frac{M}{l}$$

V, S, l הם נפח, שטח ואורך הגוף.

גרדיאנט בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

גרדיאנט בגליליות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$$

דיברגנט div בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

div בגליליות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

div בכדוריות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial(F_\varphi \sin \varphi)}{\partial \varphi}$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \frac{\partial}{\partial x} \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} =$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$= \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_z}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F_z}{\partial \theta} - \frac{\partial F_\theta}{\partial z} \right) \hat{r} + \left(\frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r F_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right) \hat{\varphi}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \frac{1}{r \sin \varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (F_\theta \sin \varphi) - \frac{\partial F_\varphi}{\partial \theta} \right) \hat{r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r F_\varphi) - \frac{\partial F_r}{\partial \varphi} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial F_r}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot F_\theta) \right) \hat{\varphi}$$

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x זהויות של אופרטורים:

וקטור יחידה:

$$\hat{A} = \frac{\vec{A}}{|\vec{A}|}$$

מכפלה סקלרית: שתי דרכים לביצוע המכפלה:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = A_x \cdot B_x + A_y \cdot B_y = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \alpha$$

האם וקטורים מאונכים:

$$0 \leq \varphi \leq \pi$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\cos \varphi = \frac{A_z}{|\vec{A}|} = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$A_{xy} = |\vec{A}| \sin \varphi; A_z = |\vec{A}| \cos \varphi$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$A_x = |\vec{A}| \sin \varphi \cos \theta; A_y = |\vec{A}| \sin \varphi \sin \theta$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{A} \cdot (\vec{B} + \vec{C}) = \vec{A} \cdot \vec{B} + \vec{A} \cdot \vec{C}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$(\vec{A} + \vec{B})^2 = |\vec{A}|^2 + 2\vec{A} \cdot \vec{B} + |\vec{B}|^2$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\cos \alpha = \frac{A_x B_x + A_y B_y}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} = \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{A} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| |\vec{B}| |\sin \alpha|$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וכיוון לפי כלל יד ימין



שימו לב שאתם עם יד ימין!! ובתמונה השמאלית, קודם לעשות אקדה ואחר כך לפתוח את האמה!

גרדיאנט בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \frac{\partial}{\partial x} \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} =$$

בגליליות:

$$= \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_z}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F_z}{\partial \theta} - \frac{\partial F_\theta}{\partial z} \right) \hat{r} + \left(\frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r F_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right) \hat{\varphi}$$

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x זהויות של אופרטורים:

וקטור יחידה:

$$\hat{A} = \frac{\vec{A}}{|\vec{A}|}$$

מכפלה סקלרית: שתי דרכים לביצוע המכפלה:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = A_x \cdot B_x + A_y \cdot B_y = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \alpha$$

האם וקטורים מאונכים:

$$0 \leq \varphi \leq \pi$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\cos \varphi = \frac{A_z}{|\vec{A}|} = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$A_{xy} = |\vec{A}| \sin \varphi; A_z = |\vec{A}| \cos \varphi$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$A_x = |\vec{A}| \sin \varphi \cos \theta; A_y = |\vec{A}| \sin \varphi \sin \theta$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{A} \cdot (\vec{B} + \vec{C}) = \vec{A} \cdot \vec{B} + \vec{A} \cdot \vec{C}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$(\vec{A} + \vec{B})^2 = |\vec{A}|^2 + 2\vec{A} \cdot \vec{B} + |\vec{B}|^2$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\cos \alpha = \frac{A_x B_x + A_y B_y}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} = \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{A} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| |\vec{B}| |\sin \alpha|$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

וקטור בשלושה מימדים:

$$\vec{r} = r \hat{r}$$

$$\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r} = \frac{kq}{r^3} \vec{r}$$

$\vec{r}$ - וקטור מהמטען q אל הנקודה בה מחשבים את השדה. שימו לב שבנוסחה הזו המטען הוא זה שיוצר את השדה.

כוח הפועל על מטען q הנמצא בשדה חשמלי $\vec{E}$:

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

שימו לב שבנוסחה הזו המטען q הוא המטען שמרגיש את הכוח (המטען בעצמו גם יוצר שדה אבל זה לא רלוונטי לנוסחה הזו והמטען לא מרגיש את השדה שהוא יוצר)

חישוב שדה או כוח שיוצרת התפלגות מטען רציפה:

נחלקת את הגוף לחתיכות קטנות, נחשב את השדה שיוצרת כל חתיכה בנקודה ונסכום על כל החתיכות. שימו לב שלסכום על כל רכיב (x, y, z) בנפרד.

אלמנט המטען של חתיכה קטנה הוא:

$$dq = \lambda dl / \sigma ds / \rho dv$$

כאשר dl , ds ו- dv הם אלמנט אורך, שטח ונפח בהתאמה. הביטוי של האלמנטים מופיע במבוא מתמטי תחת הקורדינטות המתאימות.

פוטנציאל

הגדרת הפוטנציאל: $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$ או $\varphi = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית: $U = q\varphi$

מתח: $V = \Delta\varphi$

העבודה של הכוח החשמלי: $W = -\Delta U = -q\Delta\varphi$

עבודה להזיז מטען נגד הכוח החשמלי: $W = \Delta U = q\Delta\varphi$

פוטנציאל של מטען נקודתי:

$$\varphi = \frac{kq}{r}$$

מוליכים:

- המטענים בתוך מוליך חופשיים לזוז.

- במצב סטטי (ללא זרם או תנועת מטען) השדה (או הכוח) בתוך המוליך מתאפס.

- על השפה יכול להיות שדה מאונך לשפה.

- במצב סטטי, המטען הכולל בכל נקודה בתוך המוליך הוא אפס למעט על השפה.

- הפוטנציאל במוליך אחיד (קבוע).

הארקה - חיבור לקרקע, מאפסת את הפוטנציאל. שיטות לחישוב פוטנציאל:

1. אם ניתן לחשב את השדה (בד"כ עם חוק גאוס) או אם השדה נתון, נעשה אינטגרל לא מסוים של השדה בכל תחום ונוסיף קבוע. את הקבועים מוציאים על ידי תנאי הרציפות של הפוטנציאל וכיוול (בחירת נק' האפס).

2. חלוקת הגוף לחתיכות קטנות, חישוב הפוטנציאל של כל חתיכה כמו גוף נקודתי $d\varphi = \frac{k dq}{r}$ וסכימה. (הסבר על dq בחוק קולון)

דיפול חשמלי

דיפול חשמלי הוא זוג מטענים בעלי מטען זהה וסימון הפוך הנמצאים במרחק d זה מזה.

מומנט דיפול: $\vec{p} = q\vec{d}$

כיוונו מהמטען השלילי לחיובי.

הפוטנציאל שיוצר דיפול במרחק גדול $r \gg d$:

$$\varphi = \frac{k(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3} = \frac{k(\vec{p} \cdot \hat{r})}{r^2}$$

השדה של דיפול במרחק גדול:

$$\vec{E} = \frac{k[3(\vec{p} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{p}]}{r^3}$$

מומנט דיפול של מערכת מטענים:

$$p_x = \sum x_i q_i = \int x dq$$

מומנט כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חשמלי חיצוני:

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

אנרגיה פוטנציאלית של דיפול בשדה חיצוני:

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חיצוני:

$$\vec{F} = (\vec{p} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E} = -\vec{\nabla} U$$

השוויון האחרון נכון רק אם השדה משמר (שדה שנוצר ממטענים) ומומנט הדיפול אחיד (לא תלוי בקואורדינטות).

מציאת התפלגות מטען

למצא צפיפות נפחית נעשה:

$$\rho = \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E}$$

למצא צפיפות משטחית:

$$\sigma = \epsilon_0 \Delta E_\perp$$

כאשר $\Delta E_\perp$ היא הקפיצה בשדה המאונך למשטח.

מטען נקודתי: אם יש שדה מהצורה $\vec{E} = \frac{\alpha}{r^2} \hat{r}$

(בקורדינטות גליליות) באזור הכולל את הראשית אז יש מטען נקודתי כך ש $q = \frac{\alpha}{k}$.

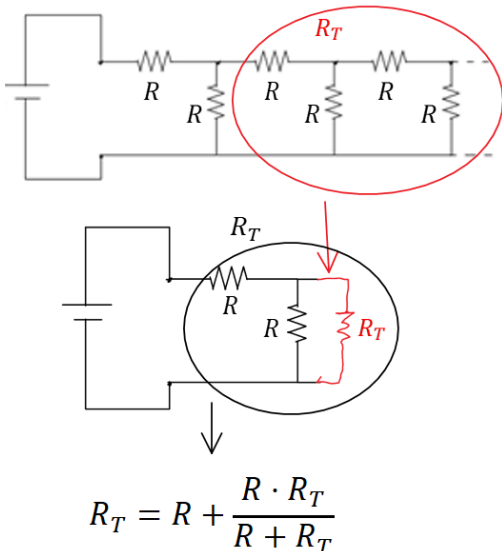
צפיפות מטען אורכית: אם יש שדה מהצורה $\vec{E} = \frac{\alpha}{r} \hat{r}$

(בקורדינטות גליליות) באזור הכולל את הראשית אז יש צפיפות מטען אורכית כך ש $\lambda = 2\pi\epsilon_0\alpha$.

אם נתון הפוטנציאל אז קודם נמצא את השדה באמצעות $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$ (הנוסחאות של הגרדיאנט בפרק וקטורים)

אנרגיה הדרושה לבניית מערכת

$$U = \sum \frac{1}{2} \varphi_i q_i = \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 dv$$



מעגלי זרם ישר

זרם: $I = \frac{dq}{dt}$
 - כמות המטען שעוברת (דרך שטח חתך) ביחידת זמן.
חוק אוהם: - הקשר בין המתח לזרם **בנגד**: $V = IR$
חיבור נגדים בטור: - נגדים עם זרם זהה: $R_T = R_1 + R_2$
 כאשר R_T התנגדות הנגד השקול.

 כאשר V_T ו- I_T הם המתח והזרם בנגד השקול.
חיבור נגדים במקביל: - נגדים עם מתח זהה:

 $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
 $I_T = I_1 + I_2$
 $V_T = V_1 = V_2$

- עבור יותר משני נגדים הנוסחאות ממשיכות באופן דומה:
 בטור: $R_T = \sum R_i$, $V_T = \sum V_i$, $I_T = I_i$
 במקביל: $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$, $I_T = \sum I_i$, $V_T = V_i$
מד זרם (אמפרמטר) אידיאלי: - מחובר בטור ובעל התנגדות זניחה.
מד מתח (וולטמטר) אידיאלי: - מחובר במקביל לרכיב הנמדד, בעל התנגדות מאוד גבוהה.

ההספק בנגד: $P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$
 - נכון לכל רכיב חשמלי, שני השוויונים האחרים הם לאחר שימוש בחוק אוהם ונכונים רק בנגד.
נתק: - מצב בו לא עובר זרם - חוט חתוך או התנגדות אינסופית.
קצר: - מצב בו אין התנגדות
מקור מתח לא אידיאלי: $V = \mathcal{E} - Ir$
 - מתח הדקים, המתח בין קצוות הסוללה או המתח שמרגיש המעגל - תלוי בזרם.
 - $\mathcal{E}$ - כח"מ הסוללה, מתח פנימי שאינו משתנה.
 - r - ההתנגדות הפנימית.

חוקי קירכהוף (לפתרון מעגלים מורכבים):
 - נגדיר זרם לכל חוט במעגל.
 - נרשום משוואות מתחים, סכום המתחים במסלול סגור שווה לאפס. (להוסיף משוואות עד שעוברים על כל הרכיבים במעגל).
 - נרשום משוואות זרמים, בכל צומת סך הזרם שנכנס שווה לסך הזרם שיוצא.
 - נפתור את מערכת המשוואות.

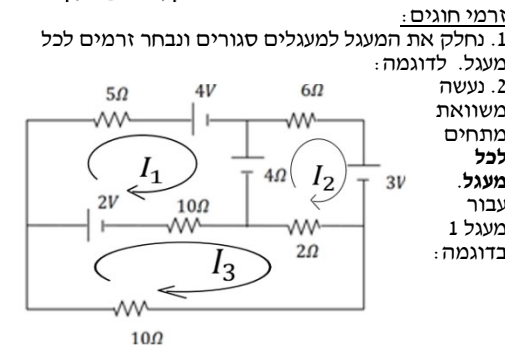
שיטת קרמר (לפתרון מערכת משוואות):
 $I_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$
 Δ - דטרמיננטה של מערכת המשוואות ההומוגנית (ללא הפרעות).
 Δ_i - דטרמיננטה של מערכת המשוואות הבאה:

$$\begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

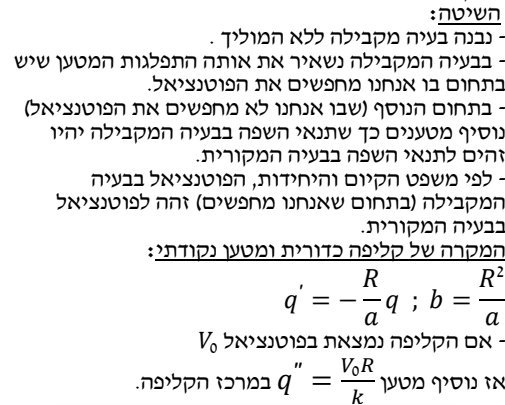
 $\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$
 - דטרמיננטה של מערכת המשוואות שהוחלפה בה העמודה ה- i בעמודת התשובות. לדוגמה, במערכת הנ"ל:

זרמי חוגים:
 1. נחלק את המעגל למעגלים סגורים ונבחר זרמים לכל מעגל. לדוגמה:
 2. נעשה משוואות מתחים לכל מעגל.
 3. נפתור את מערכת המשוואות.



נפתור את מערכת המשוואות:
מעגלים אינסופיים:
 נניח שההתנגדות השקולה של המעגל שווה להתנגדות השקולה של המעגל ללא החוליה הראשונה.
 - נחליף את החוליות 2 עד אינסוף במעגל ב- R_T
 - נחשב את ההתנגדות של המעגל הסופי שהתקבל ונשווה אותה לאותו R_T

- הסכום הוא על כל המטענים כפול הפוטנציאל שהם נמצאים בו.
 - בנוסחה עם האינטגרל על השדה אפשר להשתמש רק אם אין מטענים נקודתיים או התפלגות קווית
 $\mu_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$ נקראת צפיפות האנרגיה החשמלית
מטעני דמות
 שיטה למצא פוטנציאל בבעיות עם מוליכים והתפלגות מטען שאינה אחידה.
השיטה:
 - נבנה בעיה מקבילה ללא המוליך.
 - בבעיה המקבילה נשאיר את אותה התפלגות המטען שיש בתחום בו אנחנו מחפשים את הפוטנציאל.
 - בתחום הנוסף (שבו אנחנו לא מחפשים את הפוטנציאל) נוסיף מטענים כך שתנאי השפה בבעיה המקבילה יהיו זהים לתנאי השפה בבעיה המקורית.
 - לפי משפט הקיום והיחידות, הפוטנציאל בבעיה המקבילה (בתחום שאנחנו מחפשים) זהה לפוטנציאל בבעיה המקורית.
המקרה של קליפה כדורית ומטען נקודתי:
 $q' = -\frac{R}{a} q$; $b = \frac{R^2}{a}$
 - אם הקליפה נמצאת בפוטנציאל V_0
 אז נוסיף מטען $q'' = \frac{V_0 R}{k}$ במרכז הקליפה.



המקרה של שני גלילים אינסופיים:

 $\lambda = \frac{\pi \epsilon_0 V_0}{\ln\left(\frac{D}{2R} + \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - 1}\right)}$; $a = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - R^2}$

חומרים דיאלקטריים
 חומר דיאלקטרי הוא חומר שמכיל דיפולים. במצב רגיל כל דיפול לכיוון שונה והשדה הממוצע בחומר הוא אפס. כשמכנסים את החומר לשדה חצוני הדיפולים מתיישרים ויוצרים שדה מנוגד לשדה החיצוני.
השדה בתוך חומר דיאלקטרי לינארי ואיזוטרופי:

$\vec{E} = \frac{\vec{E}_{free}}{\epsilon_r}$
 - $\vec{E}_{free}$ הוא השדה שנוצר ממטענים חופשיים/מחוץ לחומר.
 $\vec{E}$ הוא השדה הכולל בתוך החומר (מהמטענים החופשיים והדיפולים של החומר).
 ϵ_r או ϵ - מקדם דיאלקטרי של החומר - תכונה של החומר בדרכי קבוע וידוע. $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ - $\epsilon_r > 1$
 σ_{free} - צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:

$\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta E_{free \perp}$
 σ_T - צפיפות המטען הכוללת: $\sigma_T = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$
 σ_i - צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת על שפת החומר הדיאלקטרי מהקיטוב של הדיפולים.
 $\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$
 $\vec{P}$ - וקטור הפולריזציה. צפיפות הדיפולים ליחידת נפח.
 $\vec{P} = N \vec{p}_1$
 - $\vec{p}_1$ - מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.
 - N - מספר הדיפולים ביחידת נפח. יחידות של $\left[\frac{1}{m^2}\right]$
מומנט הדיפול הכולל בחומר: $\vec{p} = \int \vec{P} dV$
הקשר בין $\vec{P}$ לצפיפות המושרית על השפה:
 $\sigma_i \equiv \sigma_b = \vec{P} \cdot \hat{n}$
 כאשר $\hat{n}$ הוא וקטור יחידה המאונך לשפה כלפי חוץ מהחומר.

אם $\vec{P}$ לא אחיד אז יש גם צפיפות מטען מושרית נפחית
בתוך החומר: $\rho_i \equiv \rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$
וקטור העתקה: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$
חוק גאוס למטען החופשי:
 $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_f \Leftrightarrow \oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{in f}$
בחומרים לינאריים (בדרכי בשאלות): $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
חומר איזוטרופי: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$

חומרים דיאלקטריים

הגדרת הקיבול: $C = \frac{|q|}{|V|}$
 הקיבול היא תכונה קבועה ותלויה רק במבנה הגיאומטרי של הגוף (ולא במתח או במטען על הרכיב).

קיבול של קבל לוחות: $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$
 - A - שטח כל לוח. d - מרחק בין הלוחות, $d \ll \sqrt{A}$
שדה בתוך קבל לוחות: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d}$
 - σ - צפיפות המטען ליחידת שטח בכל לוח.
 - V - המתח בין הלוחות. d - מרחק בין הלוחות.

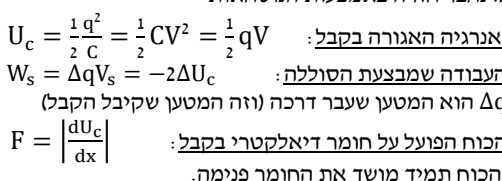
קיבול של קבל גלילי: $C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}}$
 a ו- b - רדיוס הגליל הפנימי והחיצוני בהתאמה.
 L - אורך הגלילים, $a, b \ll L$.

הקיבול של קבל המלא בחומר דיאלקטרי אחיד: $C' = kC_0$
 k (או ϵ_r) - המקדם הדיאלקטרי של החומר.
 C_0 - הקיבול ללא החומר הדיאלקטרי.
חיבור קבלים בטור (קבלים עם מטען זהה):
 $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
 כאשר $Q_T = Q_1 = Q_2$ ו- $V_T = V_1 + V_2$
חיבור קבלים במקביל (מתח זהה): $C_T = C_1 + C_2$
 כאשר $Q_T = Q_1 + Q_2$ ו- $V_T = V_1 = V_2$
שיטה 1 לחישוב קיבול - לפי הגדרה:
 א. נניח שיש מטען Q על לוחות הקבל.
 ב. נחשב את השדה בין הלוחות
 ג. נחשב את המתח בין הלוחות
 ד. נציב בנוסחה (בדרכי Q יצטמצם)
שיטה 2 לחישוב קיבול - פירוק הקבל לקבלים חלקיים:
 א. נפרק את הקבל לקבלים שמחוברים בטור או במקביל
 ב. נחשב את הקיבול של כל אחד
 ג. נחבר חזרה באמצעות הנוסחאות

אנרגיה האגורה בקבל: $U_c = \frac{1}{2} q^2 C = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV$
העבודה שמבצעת הסוללה: $W_s = \Delta q V_s = -2\Delta U_c$
 Δq הוא המטען שעבר דרכה (וזה המטען שקיבל הקבל)
הכוח הפועל על חומר דיאלקטרי בקבל: $F = \left| \frac{dU_c}{dx} \right|$
 הכוח תמיד מושך את החומר פנימה.

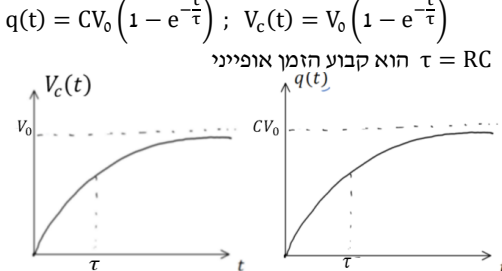
פריקה וטעינה של קבל

מעגל טעינה:
 משוואת המתחים:
 $V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$
 $I = \frac{dq}{dt}$
המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בטעינה):
 $q(t) = CV_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$; $V_c(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
 $\tau = RC$ הוא קבוע הזמן אופייני



פריקה וטעינה של קבל

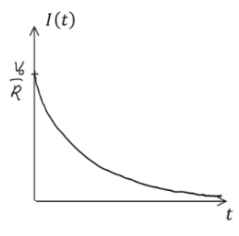
מעגל טעינה:
 משוואת המתחים:
 $V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$
 $I = \frac{dq}{dt}$
המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בטעינה):
 $q(t) = CV_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$; $V_c(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
 $\tau = RC$ הוא קבוע הזמן אופייני



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 $\frac{V_0}{R}$



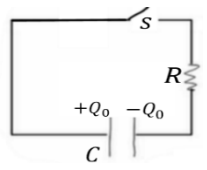
- לאחר זמן רב ($t > 5\tau$) הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמתח קבועים והזרם מתאפס.

מעגל פריקה:

- משוואת המתחים:

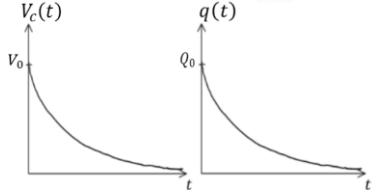
$$\frac{q}{C} - IR = 0$$

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



- 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 במעגל זרם ישר.

GOOL

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, דרך 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): $\sigma = \frac{1}{\rho}$

$\vec{J}$ - 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 $\vec{v}_{drift}$.

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

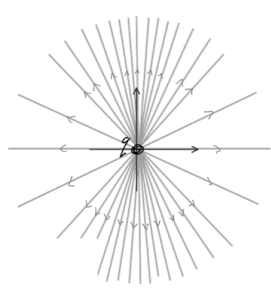
עבור צפיפות מטען ליחידת אורך λ בתנועה נקבל: $I = \lambda v$

GOOL

גדרת המטען

המטען הוא גודל אינווריאנטי במעבר בין מערכות ייחוס. שדה של מטען הנע במהירות קבועה:

$$E = \frac{kq}{r^2} \cdot \frac{(1-\beta^2)}{(1-\beta^2 \sin^2 \theta)^{\frac{3}{2}}}; \beta = \frac{v}{c}$$



θ היא הזווית בין המהירות לוקטור המיקום שבו מחפשים את השדה. - השדה הוא שדה לא משמר! - השדה של מטען במנוחה זהה לחוק קולון "הרגיל". - קווי השדה מתוארים באיור:

שדה של מטען שעובר בפאנומיות: ניצור ספירה סביב הנקודה שבה נעצר המטען ברדיוס השווה למהירות האור כפול הזמן מתחילת התנועה. בתוך הספירה השדה יהיה שדה של מטען במנוחה. הפסיק את התנועה. עובי הספירה קשור לתהליך העצירה. השדה בתוך עובי הספירה הוא בערך בכיוון משיק לספירה. שדה של מטען שמתחיל תנועה בפאנומיות:

ניצור ספירה סביב הנקודה ממנה התחיל המטען לנע ברדיוס השווה למהירות האור כפול הזמן מתחילת התנועה. בתוך הספירה השדה יהיה שדה של מטען הנע במהירות קבועה. מחוץ לספירה השדה יהיה שדה של המטען במנוחה (הנמצא בנקודת המוצא).

עובי הספירה קשור לתהליך העצירה והשדה שם הוא בערך בכיוון משיק לספירה.

המקרה	השדה של המטען שמפעיל את הכוח	הכוח
שני המטענים במנוחה	שדה של מטען במנוחה	$Q\vec{E}$
המטען שמפעיל את הכוח נע במהירות קבועה והמטען שמרגיש את הכוח במנוחה	שדה של מטען במהירות קבועה	$Q\vec{E}$
המטען שמפעיל את הכוח נע במנוחה והמטען שמרגיש את הכוח נע במהירות קבועה	שדה של מטען במנוחה	$Q\vec{E}$
שני המטענים נעים במהירות קבועה	שדה של מטען הנע במהירות קבועה	$Q\vec{E}$ ועוד תוספת*

*התוספת מגיעה משינוי מערכת הייחוס של המטען עליו פועל הכוח וניתן לתאר אותה באמצעות שדה נוסף כך שהיא שווה ל- $Q\vec{v} \times \vec{B}$. זה ההסבר של תורת היחסות לכוח המגנטי.

הכוח המגנטי - חוק לורנץ

חוק לורנץ - הכוח המגנטי: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$

ניתן לחשב את הכוח בשני דרכים.

- דרך דטרמיננטה (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 אקדה).

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.

עבודת 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 לולאה סגורה בשדה אחיד מתאפס.

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

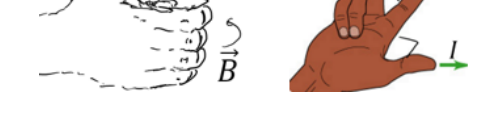
חוק ביו-סבר

חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

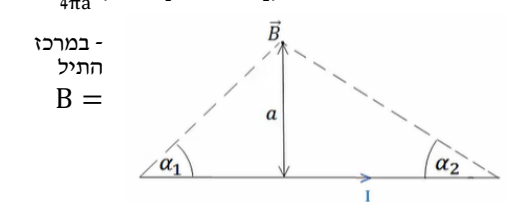
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

$\vec{r}$ הוא הוקטור מהחתיכה לנקודה בה מחפשים את השדה. $d\vec{l}$ הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.

- חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:



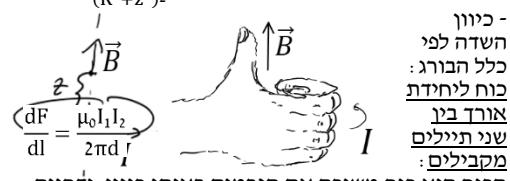
השדה של תיל סופי: $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$



- במרכז התיל $B =$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \frac{L}{(\frac{L}{2})^2 + a^2}^{\frac{1}{2}}$$

שדה של טבעת לאורך ציר הסימטריה: $B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$



הכוח הוא כוח משיכה אם הזרמים באותו כיוון, ודחייה אם כיוון הזרמים הפוך.

חוק אמפר

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

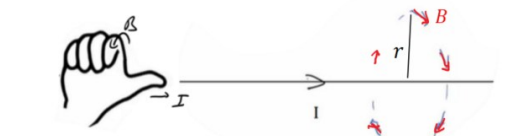
- כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיק של B לאורך מסלול סגור. בדרכ נבחר מקרים בהם B אחיד לאורך המסלול והאינטגרל יהיה B כפול אורך המסלול.

- 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.

שדה של תיל אינסופי: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

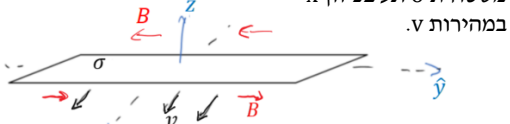
כאשר r הוא המרחק מהתיל.



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

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

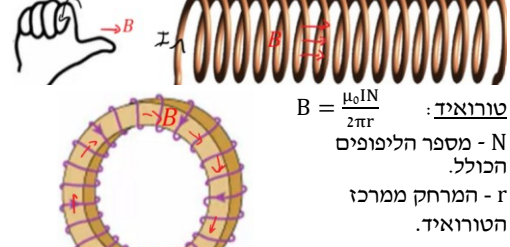
עבור מישור דק הטעון בצפיפות משטחית σ ונע בכיוון $\hat{x}$ במהירות v .



שדה של סליל אינסופי/סולנואיד: $B = \mu_0 n I$

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

GOOL

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 $\vec{B} = \frac{c}{r} \hat{\theta}$

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{יחס המתחים בשנאי:}$$

N הוא מספר הליפופים בכל צד.

הפוטנציאל הקוטרי
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 (יחידות 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 $\vec{j}_T = \vec{j}_b + \vec{j}_{free}$
כאשר $\vec{j}_{free}$ היא צפיפות הזרם הנובעת ממטענים החופשיים לווז בחומר ו- $\vec{j}_b$ נובעת מהמגנטיזציה.

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

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

הכי נוח להשתמש בתנאים 2 ו-3 ואלו מספיקים בשביל למצא את כל הרכיבים של כל השדות בהנחת הלינאריות או בהיתן המגנטיזציה.

מעגלי זרם חילופין
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.

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

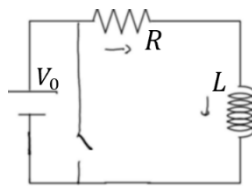
האנרגיה האגורה במעגל:
(האנרגיה הכוללת נשמרת)

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 $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$
ו- $\Gamma = \frac{R}{2L}$
הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:

מקרה 1- ריסון חזק: $\Gamma > \omega_0$
 $q(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$
 $\lambda_{1,2} = \Gamma \pm \sqrt{\Gamma^2 - \omega_0^2}$

מומנט הדיפול המגנטי $\vec{\mu}$ לפעמים מסומן ב- $\vec{m}$): $\vec{\mu} = I\vec{A}$
I - 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:
חישוב:
מומנט כוח שפועל על דיפול מגנטי הנמצא בשדה מגנטי
חישוב:
האנרגיה הפוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי
חישוב:
השראות
ההשראות ברכיב:
 $\Phi_B = \frac{\Phi_B}{I}$
 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.

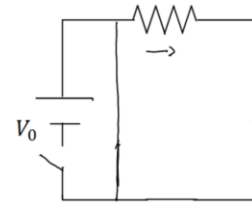
השראות של סליל:
N מספר הליפופים הכולל, I אורך הסליל ו- a רדיוס טבעת כא"מ ברכיב עם השראות L: $\varepsilon = -L\dot{I}$
האנרגיה האגורה בסליל (או בכל רכיב בעל השראות):
האנרגיה האגורה בשדה המגנטי:
- את האינטגרל עושים על כל המרחב.
- זו אותה האנרגיה שמחשבים באמצעות ההשראות (פשוט צורת חישוב אחרת).
- ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).

המתח על סליל (משוך) במעגל:
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 משוך) 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 $V_T = V_1 = V_2 = \dots$ ו- $I_T = I_1 = I_2 = \dots$
במקביל: $\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$
כאשר $V_T = V_1 = V_2 = \dots$ ו- $I_T = I_1 + I_2 + \dots$

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).

בקואורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הראשית ו- C
קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי $(\frac{\mu_0 I}{2\pi r})$ ונקבל $I = \frac{C2\pi}{\mu_0}$

חוק פאראדי
חוק פאראדי:
 $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$; $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$
הכא"מ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.
בד"כ נמצא באמצעות החוק את גודל הכא"מ ואת הכיוון נמצא לפי חוק לנץ.
חוק לנץ: הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.
האם השטף גדל או קטן?


הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה:
כאשר $\vec{v}$ היא מהירות הגוף (שימו לב למכפלה הסקלרית) כא"מ הנוצר במוט הנע בשדה מגנטי: $\varepsilon = BLv \sin \alpha$
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.

המתח הנוצר לרוחב המוליך:
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 הליל.
טרנספורמציות יחסיות (לורנץ) לשדות
טרנספורמציה של השדות עבור צופה הנע במהירות $\vec{v}$
ביחס למעבדה: $\vec{E}'_{\parallel} = \vec{E}_{\parallel}$; $\vec{E}'_{\perp} = \gamma(\vec{E}_{\perp} + \vec{v} \times \vec{B}_{\perp})$
 $\vec{B}'_{\parallel} = \vec{B}_{\parallel}$; $\vec{B}'_{\perp} = \gamma(\vec{B}_{\perp} - \frac{1}{c^2}\vec{v} \times \vec{E}_{\perp})$; $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$
הטרנס' ההפוכה: $\vec{E}_{\parallel} = \vec{E}'_{\parallel}$; $\vec{E}_{\perp} = \gamma(\vec{E}'_{\perp} - \vec{v} \times \vec{B}'_{\perp})$
 $\vec{B}_{\parallel} = \vec{B}'_{\parallel}$; $\vec{B}_{\perp} = \gamma(\vec{B}'_{\perp} + \frac{1}{c^2}\vec{v} \times \vec{E}'_{\perp})$
טרנספורמציה של צפיפויות המטען:
כאשר λ_0 , σ_0 , ρ_0 הן צפיפות אורכית, משטחית ונפחית במערכת העצמית של הגוף.
- הסיבה לטרנספורמציה היא שסך המטען זהה בשתי המערכות אבל האורך משתנה.
נוסחאות לצפיפויות הזרם:
 $\vec{j}' = \gamma\rho_0\vec{v}$; $\vec{k}' = \gamma\sigma_0\vec{v}$; $I = \gamma\lambda_0 v$
כאשר λ_0 , σ_0 , ρ_0 הן צפיפות אורכית, משטחית ונפחית במערכת העצמית של הגוף.

שדות משתנים בזמן חרם העתקה
ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשתנה בזמן יוצר שדה חשמלי ולהפך.
אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה החשמלי אז: נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו חוק פאראדי 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 אז: נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר
רק שבמקום זרם יש $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} d\vec{s}$ (או במקום צפיפות זרם

כאשר λ_0 , σ_0 , ρ_0 הן צפיפות אורכית, משטחית ונפחית במערכת העצמית של הגוף.

שדות משתנים בזמן חרם העתקה
ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשתנה בזמן יוצר שדה חשמלי ולהפך.
אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה החשמלי אז: נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו חוק פאראדי 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 אז: נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר
רק שבמקום זרם יש $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} d\vec{s}$ (או במקום צפיפות זרם
כאשר λ_0 , σ_0 , ρ_0 הן צפיפות אורכית, משטחית ונפחית במערכת העצמית של הגוף.
מומנט דיפול מגנטי
דיפול מגנטי הוא לולאת זרם סגורה.

גלים רוחביים במיתר

GOOL

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2}$$

משוואת הגלים:

T – המתוחות במיתר, ρ – צפיפות המסה ליחידת אורך, ψ – פונקציית הגל, ההעתק הרוחבי של כל חתיכה במיתר.

מהירות הגל:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

פתרון המשוואה:

$$\psi(x,t) = A \cos(kx - \omega t) + B \sin(kx - \omega t) + C \cos(kx + \omega t) + D \sin(kx + \omega t)$$

- אפשרויות נוספות לפתרון (על ידי שימוש בזוויות טריגונומטריות)

$$\psi(x,t) = A_1 \cos(kx - \omega t + \phi_1) + A_2 \cos(kx - \omega t + \phi_2) = B_1 \cos kx \cos \omega t + B_2 \cos kx \sin \omega t + B_3 \sin kx \cos \omega t + B_4 \sin kx \sin \omega t = C_1 \cos kx \cos(\omega t + \phi_1) + C_2 \sin kx \cos(\omega t + \phi_2)$$

שתי האפשרויות האחרונות עדיפות לגלים עומדים.

יחס הדיספרסיה:

$$\omega = v \cdot k$$

GOOL

החזרה והעברה

תנאי שפה לנקודת אי-רציפות במיתר ב- $x=0$:

- רציפות הפונקציה: $\psi_L(0,t) = \psi_R(0,t)$
- רציפות הכוח: $F_L = F_R$

אם המתיחות אחידה, אז תנאי 2 הופך לרציפות הנגזרת:

$$\left. \frac{\partial \psi_L}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \psi_R}{\partial x} \right|_{x=0}$$
$$\psi_L(x,t) = \psi_r(x,t) + \psi(x,t); \quad \psi_R(x,t) = \psi_t(x,t)$$
$$\psi_r(x,t) = r\psi(-x,t)$$
$$\psi_t(x,t) = t\psi\left(\frac{v_1}{v_2}x, t\right); \quad v_1 = \sqrt{\frac{T}{\rho_1}}, v_2 = \sqrt{\frac{T}{\rho_2}}$$

מקדם החזרה:

$$r = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}{\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1}}$$

מקדם העברה:

$$t = \frac{2v_2}{v_2 + v_1} = \frac{2\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}}$$

הערה: את הנוסחאות של מקדם ההעברה והחזרה נרשום בנושא הבא בצורה יותר כללית עם שימוש בעכבות.

GOOL

עכבה

עכבה (impedance):

$$Z = \sqrt{\rho T}$$

T – מתיחות. V – מהירות הגל

$$|Z| = \frac{|F_y|}{|V_y(t)|}$$

F_y – הכוח על אלמנט מסה $V_y(t)$ – מהירות אלמנט מסה (מהירות החומר)

מקדמי העברה והחזרה בפגיעה של גל מתווך 1 ל-2:

$$r = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}, \quad t = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}$$

$t = 0 \rightarrow 1$ – תאום עכבות: $z_1 = z_2$

אנרגיה הספק ותנע

אנרגיה ליחידת אורך של גל נע במיתר:

$$\varepsilon(x,t) = \rho \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 = \rho v^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2$$

אנרגיה ממוצעת בזמן:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 |A|^2$$

הספק רגעי בנקודה, כמה עבודה עושה החלק השמאלי על החלק הימני ביחידת זמן:

$$P^\pm = \pm Z \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 = \pm v \varepsilon(x,t)$$

$P^\pm$ הוא הספק רגעי של גל הנע בכיוון החיובי/שלילי

ההספק הממוצע בזמן:

$$\bar{P}^\pm = \pm \frac{1}{2} z \omega^2 |A|^2$$

מקדם החזרה של האנרגיה:

$$R = \frac{P_1^-}{P_1^+} = r^2 = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2$$

מקדם העברה של האנרגיה:

$$T = \frac{P_2^+}{P_1^+} = \frac{z_2}{z_1} t^2 = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}$$

$R + T = 1$

GOOL

גלים עומדים

תנע: התנע הוא אפס.

גלים עומדים

מיתר חצי אינסופי:

$$\psi(x=0,t) = 0 \Rightarrow \psi(x,t) = C \sin(kx) \sin(\omega t + \varphi)$$

קצה קשור:

קצה חופשי:

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \Rightarrow \psi(x,t) = C \cos(kx) \cos(\omega t + \varphi)$$

מיתר סופי:

$$\psi(x=0,t) = \psi(x=L,t) = 0$$

קצוות קשורים:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}; k_n = \frac{n\pi}{L}; n = 0,1,2,3 \dots; f_n = \frac{v n}{2L}$$

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:

$$\tilde{V}_s = Z_T \tilde{I}_s$$

$\tilde{I}_s$ ו- $\tilde{V}_s$ הם הזרם והמתח של המקור (בייצוג המורכב).

ערכי RMS (ממוצע של ריבוע הגודל בזמן):

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

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.

הספק ממוצע:

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

$V_{RMS} I_{RMS} \cos \varphi$ כאשר φ היא המאזה של המתח ביחס לזרם.

$\cos \varphi$ הוא מקדם/גורם ההספק. מצביע על ניצול האנרגיה במעגל.

GOOL

משוואות מקסוול

הצורה הדיפרנציאלית: הצורה האינטגרלית:

- חוק גאוס: $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$; $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$
- $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$; $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
- השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי. $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$; $\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$
- מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי $\varepsilon = -\dot{\phi}_B$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$$
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

GOOL

מבוא לגלים

גלים רוחביים: ההפרעה בכיוון ניצב להתקדמות (מיתר)

גלים אורכיים: ההפרעה בכיוון מקביל להתקדמות (קול)

תווך: החומר בו מתקדמת ההפרעה

פונקציית הגל: $f(x \pm vt)$, כאשר v היא מהירות הגל.

אנרגיה של גל: $E \propto A^2$, A היא האמפליטודה (משרעת)

משוואת הגלים במימד אחד:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

כל פונקציה מהצורה $f(x \pm vt)$ היא פתרון של משוואת הגלים. סכום של שני פתרונות מהווה גם פתרון אם לשני הפתרונות אותה מהירות גל.

התאבכות: סכימה של גלים שנפגשים

חזית גל: אוסף הנקודות המגיעות לשיא באותו זמן

גלים מחזוריים:

$$\lambda = v \cdot T$$

λ – אורך הגל; T – זמן המחזור; v – מהירות הגל

תדירות (מספר המחזורים בשנייה):

$$f = \frac{1}{T}$$

גל הרמוני:

$$y(x,t) = A \cos(kx \pm \omega t + \varphi)$$

מספר הגל:

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

קשרים בין הגדלים השונים:

$$\omega = vk = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

גל עומד: מורכב משני גלים נעים זהים הנעים בכיוונים מנוגדים

$$y(x,t) = A \sin(kx) \cos(\omega t + \varphi) = \frac{A}{2} \sin(kx - (\omega t + \varphi)) + \frac{A}{2} \sin(kx + (\omega t + \varphi))$$

נקודות צומת (node): נקודות שלא זזות. אין מהירות גל.

נקודת טבור (antinode): אמפליטודה מקסימאלית.

פעילות: בפעמיות אנחנו מחברים שני גלים בעלי אותה אמפליטודה ומקבלים גל בתוך מעטפת (פעימה).

$$\Psi_1(t) = A \cos(\omega_1 t) \quad \& \quad \Psi_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$$
$$\Psi_T(t) = \Psi_1(t) + \Psi_2(t) = 2A \cos(\epsilon t) \cos(\Omega t)$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_f - \omega_s}{2}$$
$$\Omega = \frac{\omega_f + \omega_s}{2}$$

$\epsilon \ll \Omega$

תדירות הפעימה היא 2ϵ

מקרה 2- ריסון קריט: $\Gamma = \omega_0$

$$q(t) = Ae^{-\omega_0 t} + Bte^{-\omega_0 t}$$

בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר משלושת המקרים.

מקרה 3- ריסון חלש: $\Gamma < \omega_0$

$$q(t) = Ae^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \varphi)$$
$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}$$

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:

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

$I = \dot{q}$

ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען (המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת).

פתרון המשוואה:

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

הפתרון ההומוגני הוא פתרון מעגל RLC והוא דועך בזמן.

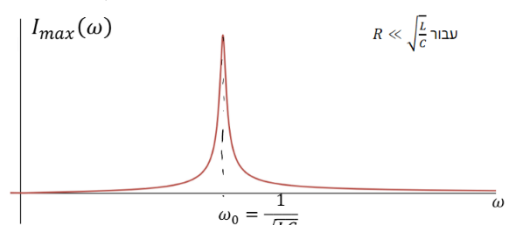
הפתרון הפרטי נקרא הפתרון של המצב העמיד (לאחר זמן רב) ב"כ מתייחסים רק אליו.

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

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 $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$



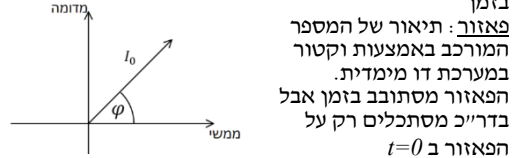
מקבלים אמפליטודה מקסימאלית כאשר $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

פתרון עם מספרים מורכבים:

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

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}\{\tilde{I}(t)\}$$
$$\tilde{I}(t) = I_0 e^{i(\omega t + \varphi)}$$

(בדו"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 בדו"כ מסתכלים רק על הפאזור ב $t=0$

עכבה Impedance:

$$Z = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}}$$

תכונה שתלויה רק במבנה (קבועה כל עוד המבנה קבוע).

הפאזה של העכבה היא הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב:

$$\varphi_z = \varphi_v - \varphi_i$$

הגודל של העכבה:

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

הרכיב	העכבה של הרכיב Z	הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב
נגד	R	המתח והזרם בנגד הם באותה הפאזה

תדירות הפעימה היא 2ϵ

GOOL

$$v = \lambda f$$

מהירות גל מחזורי:

λ – אורך הגל. f – תדירות הגל.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

חוק השבירה:

θ – הזווית בין הקרן הפוגעת/ מוחזרת לאנך למשטח.
 n – מקדם השבירה של כל תווך.
 v – מהירות הגל בכל תווך.

$$\ell = n \frac{\lambda}{2}$$

גל עומד במיתר שקצותיו קשורים:

ℓ – אורך המיתר. n – מספר נקודות הקמר (מקסי/מיני) קווי מקסימום ראשיים בהתאבכות משני מקורות (ויותר)

$$\sin \theta_n = \frac{X_n}{L_n} = n \frac{\lambda}{d}$$

שווי-מופע:

θ_n – זווית הסטייה של האור המגיע לנק' המקסימום ביחס לכיוון המאונך למישור החריצים.

X_n – המרחק בין אמצע הלוח והמקסימום מסדר n .

L_n – המרחק בין המרכז של החריצים למקסימום מסדר n .

d – סדר קו המקסימום. λ – אורך הגל.

d – המרחק בין החריצים.

קווי מינימום בהתאבכות משני מקורות שווי-מופע:

$$\sin \theta_n = \frac{X_n}{L_n} = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}$$

θ_n – זווית הסטייה של האור המגיע לנק' המינימום ביחס לכיוון המאונך למישור החריצים.

X_n – המרחק בין אמצע הלוח והמינימום מסדר n .

L_n – המרחק בין המרכז של החריצים למינימום מסדר n .

λ – אורך הגל. d – המרחק בין החריצים.

$$\frac{\Delta X}{L} = \frac{\lambda}{d}$$

נוסחת יאנג:

ΔX – רוחב פס האור. L – מרחק האנך למסך מהחריצים.

λ – אורך הגל. d – המרחק בין החריצים.

קווי מקסימום בהתאבכות בסריג עקיפה:

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} = nN \cdot \lambda$$

θ_n – הזווית למקסימום מסדר n .

d – המרחק בין שני חריצים צמודים. N – קבוע הסריג.

$$\sin \theta_n = \frac{X_n}{L_n} = n \frac{\lambda}{w}$$

קווי צומת בעקיפה בסדר יחיד:

θ_n – הזווית למינימום מסדר n .

X_n – מרחק מרכז המינימום מסדר n למרכז המקסימום המרכזי.

L_n – המרחק בין החריץ למינימום מסדר n .

w – רוחב החריץ.

GOOL

חוק סנל

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

חוק סנל:

כאשר n הם מקדמי השבירה של התווך ו- θ הן הזוויות בין הקרן שפוגעת/מוחזרת לבין האנך למשטח.

גלים והתאבכות גלים

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(k_n x) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

קצה קשור וקצה חופשי:

$$\Psi(x=0, t) = 0, \left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$

$$k_n = \frac{\pi}{L} \left(n + \frac{1}{2}\right); n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n + \frac{1}{2}}; f_n = \frac{v}{2L} \left(n + \frac{1}{2}\right)$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(k_n x) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

מיתר סופי עם 2 קצוות חופשיים:

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}; f_n = \frac{vn}{2L}; k_n = \frac{\pi n}{L}; n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(k_n x) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

GOOL

גלים אלקטרומגנטיים

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 $\frac{1}{c^2} = \frac{\mu_0 \epsilon_0}{c^2}$

- למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.

- המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla}^2 E_x = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_x}{dt^2}; \vec{\nabla}^2 E_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}; z \text{ כנל}$$

$$\vec{\nabla}^2 E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$$

- תזכורת לאפליסאן:

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

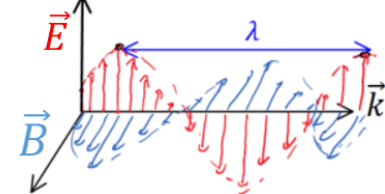
כאשר f היא התדירות בהרץ ו- T הוא זמן המחזור.

- הקוסינוס בפתרון זהה לכל הרכיבים של השדה החשמלי והמגנטי, ההבדל בין הרכיבים הוא רק במקדם A_i .

איד למצא שדה מגנטי מחשמלי ולהפך:

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

צורת הגל במרחב:



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

λ הוא אורך הגל (המרחק בין שיא לשיא):

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

יחס הדיספרסיה:

יחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואות הגלים.

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

פתרון נוסף (עם פלוס):

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

GOOL

וקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות

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 בנפח הכלוא במשטח.

הקשר הדיפרנציאלי בריק:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{s} = - \frac{du_{em}}{dt}$$