

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 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.

מבוא מתמטי

GOOL

קואורדינטות גליליות: (r, θ, z)

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$z = z$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\tan \theta = \frac{y}{x}$$

$$dl = dr/r d\theta (טבעת) / dz$$

$$ds = r dr d\theta (דיסקה) / r d\theta dz (קליפה גלילית דקה)$$

$$dv = r d\theta dr dz (גליל מלא או קליפה גלילית עבה)$$

קואורדינטות כדוריות: (r, θ, φ)

$$z = r \cos \varphi$$

$$x = r \sin \varphi \cos \theta$$

$$y = r \sin \varphi \sin \theta$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\tan \theta = \frac{y}{x}$$

$$\cos \varphi = \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$dl = dr / r \sin \varphi d\theta / r d\varphi$$

$$ds = r^2 \sin \varphi d\theta d\varphi (כדור)$$

$$dv = r^2 \sin \varphi d\theta d\varphi dr (כדור מלא או קליפה כדורית עבה)$$

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

$$V, S, l \text{ הם נפח, שטח ואורך הגוף.}$$

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

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

$$\alpha \text{ - זווית בין הוקטורים.}$$

$$\text{תוצאת המכפלה היא תמיד סקלר (ולא וקטור).}$$

$$\text{מכפלה בין וקטורים מאונכים מתאפסת, זו דרך לבדוק}$$

$$\text{האם וקטורים מאונכים}$$

$$\text{וקטור בשלושה מימדים:}$$

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

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

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

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

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

$$\text{פירוק לרכיבים: } A_{xy} = |\vec{A}| \sin \varphi; A_z = |\vec{A}| \cos \varphi$$

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

$$\text{פתיחת סוגרים והעלאה בריבוע:}$$

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

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

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

$$\text{זווית בין שני וקטורים:}$$

$$\text{מכפלה וקטורית:}$$

$$\text{דרך 1 לעשות את המכפלה - דטרמיננטה:}$$

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

$$\text{דרך 2 - לפי גודל וכיוון בנפרד:}$$

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

$$\text{גודל המכפלה הוא: } |\vec{A}| |\vec{B}| |\sin \alpha|$$

$$\text{וכיוון לפי כלל יד ימין}$$

$$\text{שימו לב שאתם עם יד ימין!! ובתמונה השמאלית, קודם}$$

$$\text{לעשות אקדח ואחר כך לפתוח את האמה!}$$

$$\vec{A} \times \vec{B}$$

$$\text{גרדיאנט בקרטזיות:}$$

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

$$\text{בגליליות:}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:}$$

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

$$\text{חוק קולון: הכוח החשמלי שמפעיל מטען } q_1 \text{ כלשהו על}$$

$$\vec{F} = \frac{k q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

$$\text{מטען } q_2 \text{ כלשהו:}$$

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} \text{ וקטור מ- } q_1 \text{ אל } q_2, |\vec{r}| = r$$

$$\text{השדה החשמלי שיוצר מטען } q \text{ במרחב:}$$

$$\vec{E} = \frac{k q}{r^2} \hat{r}$$

$$\text{כאשר } dl, ds \text{ ו- } dv \text{ הם אלמנט אורך, שטח ונפח}$$

$$\text{בהתאמה. הביטוי של האלמנטים מופיע במבוא מתמטי}$$

$$\text{תחת הקורדינטות המתאימות.}$$

$$\text{פוטנציאל}$$

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

$$\text{אנרגיה פוטנציאלית חשמלית:}$$

$$U = q\varphi$$

$$\text{מתח:}$$

$$V = \Delta\varphi$$

$$\text{העבודה של הכוח החשמלי:}$$

$$W = -\Delta U = -q\Delta\varphi$$

$$\text{עבודה לחזוי מטען נגד הכוח החשמלי:}$$

$$W = \Delta U = q\Delta\varphi$$

$$\text{פוטנציאל של מטען נקודתי:}$$

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

$$\text{מוליכים:}$$

$$\text{המטענים בתוך מוליך חופשיים לזוז.}$$

$$\text{במצב סטטי (ללא זרם או תנועת מטען) השדה (או הכוח)}$$

$$\text{בתוך המוליך מתאפס.}$$

$$\text{על השפה יכול להיות שדה מאונך לשפה.}$$

$$\text{במצב סטטי, המטען הכולל בכל נקודה בתוך המוליך הוא}$$

$$\text{אפס למעט על השפה.}$$

$$\text{הפוטנציאל במוליך אחיד (קבוע).}$$

$$\text{הארקה - חיבור לקרקע, מאפסת את הפוטנציאל.}$$

$$\text{שיטות לחישוב פוטנציאל:}$$

$$\text{1. אם ניתן לחשב את השדה (בד"כ עם חוק גאוס) או אם}$$

$$\text{השדה נתון, נעשה אינטגרל לא מסוים על השדה בכל תחום}$$

$$\text{ונוסיף קבוע. את הקבועים מוציאים על ידי תנאי הרציפות}$$

$$\text{של הפוטנציאל וכיוול (בחירת נק' האפס).}$$

$$\text{2. חלוקת הגוף לחתיכות קטנות, חישוב הפוטנציאל של כל}$$

$$\text{חתיכה כמו גוף נקודתי } d\varphi = \frac{k dq}{r} \text{ (הסבר על } dq \text{ בחוק קולון)}$$

$$\text{דיפול חשמלי}$$

$$\text{דיפול חשמלי הוא זוג מטענים בעלי מטען זהה}$$

$$\text{וסימון הפוך הנמצאים במרחק } d \text{ זה מזה.}$$

$$\vec{p} = q\vec{d}$$

$$\text{מומנט דיפול:}$$

$$\text{כיוונו מהמטען השלילי לחיובי.}$$

$$\text{הפוטנציאל שיוצר דיפול במרחק גדול } r \gg d$$

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

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

$$\text{השדה של דיפול במרחק גדול:}$$

$$\text{מומנט כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חשמלי חיצוני:}$$

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

$$\text{מציאת התפלגות מטען}$$

$$\text{למצא צפיפות נפחית נעשה:}$$

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

$$\text{למצא צפיפות משטחית:}$$

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

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

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

$$\text{(בקורדינטות כדוריות) באזור הכולל את הראשית או יש}$$

$$\text{מטען נקודתי כך ש } q = \frac{\alpha}{k}$$

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

$$\text{(בקורדינטות גליליות) באזור הכולל את הראשית או יש}$$

$$\text{צפיפות מטען אורכית כך ש } \lambda = 2\pi\epsilon_0 \alpha$$

$$\text{אם נתון הפוטנציאל אז קודם נמצא את השדה באמצעות}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi \text{ (הנוסחאות של הגרדיאנט בפרק וקטורים)}$$

$$\text{משוואת פואסון ולאפלאס}$$

$$\vec{\nabla}^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{משוואת פלאס:}$$

$$\vec{\nabla}^2 \varphi = 0$$

$$\text{הפלסיאן } (\vec{\nabla}^2 f \text{ או } \Delta f) \text{ של פונקציה סקלרית בקרטזיות:}$$

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

$$\text{בגליליות:}$$

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\text{בכדוריות:}$$

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}$$

$$\text{בגליליות:}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

$$\text{בכדוריות (*):}$$

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

ג. נחשב את השדה בין הלוחות
ג. נחשב את המתח בין הלוחות
ד. נציג בנוסחה (בד"כ 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: $U_C = \frac{1}{2} q^2 = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV$
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):
 $q(t) = CV_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$; $V_C(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$
 $\tau = RC$ הוא קבוע הזמן אופייני

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

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. במידה 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: $\vec{J} = \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$
כאשר האינטגרל הוא על שטח החתך, שטח שמאונך ל- $\vec{J}$.
אם $\vec{J}$ אחיד אז: $I = JS$
חוק אוהם הדיפרנציאלי:
כאשר σ היא המוליכות ו-E השדה החשמלי.
חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען נפחית בתנועה:
 $\vec{J} = \rho \vec{v}$

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 לינארים (בד"כ בשאלות):
 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
חומר איזוטרופי:
 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$
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.

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.

החשק בנגד:
 $P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$
($P = IV$) 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:
 $V = \epsilon - Ir$
V - מתח הדקים, המתח בין קצוות הסוללה או המתח שמרגיש המעגל - תלוי בזרם.
 ϵ - כ"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.

חומרים דיאלקטרים
הגדרת הקיבול:
הקיבול היא תכונה קבועה ותלויה רק במבנה הגיאומטרי של הגוף (ולא במתח או במטען על הרכיב).
קיבול של קבל לוחות:
A - שטח כל לוח. d - מרחק בין הלוחות, $d \ll \sqrt{A}$.
C = $\frac{\epsilon_0 A}{d}$
שדה בתוך קבל לוחות:
 $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d}$
C = $\frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}}$
קיבול של קבל גלילי:
a - 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.
C₀ - 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):
 $C_T = C_1 + C_2$ ו- $V_T = V_1 = V_2$
כאשר $Q_T = Q_1 + Q_2$ ו- $V_T = V_1 = V_2$
שיטה 1 לחישוב קיבול - לפי הגדרה:
א. ניחש שיש מטען Q על לוחות הקבל.

$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial f}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}$
כאשר φ היא הזווית עם ציר z.

אנרגיה הדרושה לבניית מערכת
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 דיאלקטרים
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 k - מקדם דיאלקטרי של החומר - תכונה של החומר בדרי"כ קבוע וידוע. $\epsilon_r > 1$ ו- $\epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon$
צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:
 $\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta E_{free}$
 $\sigma_T = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$ - צפיפות המטען הכוללת:
 σ_i - צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת על שפת החומר הדיאלקטרי מהקיטוב של הדיפולים.
 $\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$
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 $\left[\frac{1}{m^3} \right]$.
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 מהגוף.

בקאורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הארצית ו-C

קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי ($\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$) ונקבל

$$I = \frac{C2\pi}{\mu_0}$$

GOOL

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

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.

GOOL שדות משתנים בזמן חרם העתקה

ממשוואת 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 בדרכ"ש 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 $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$ (או במקום צפיפות זרם $\frac{d\vec{E}}{dt}$) שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

GOOL מומנט דיפול מגנטי

דיפול מגנטי הוא לולאת זרם סגורה. 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. כיוון במאונך למשטח ובהתאם לכלל יד ימין של הזרם. השדה שיוצר דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדי

הדיפול: $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\vec{\mu} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{\mu}]$

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: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

GOOL השראות ברכיב

השראות ברכיב: $L = \frac{\Phi_B}{I}$

Φ_B הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו-I הזרם ברכיב. ההשראות היא תכונה שתלוייה רק במבנה ולכן היא בד"כ קבועה.

חישוב השראות לפי הגדרה: 1. נניח שזרם 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: $L = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{l}$

N 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): $U_L = \frac{1}{2} L I^2$

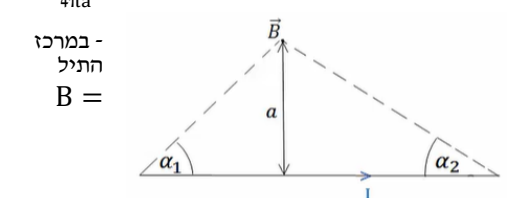
האנרגיה האגורה בשדה המגנטי: $U = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV$

- 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 (משורר) במעגל: $V_L = L \dot{I}$

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



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



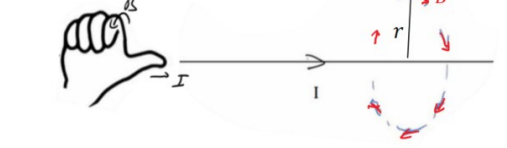
GOOL חוק אמפר

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"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.

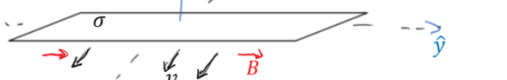
שדה של תיל אינסופי: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

כאשר r הוא המרחק מהתיל.



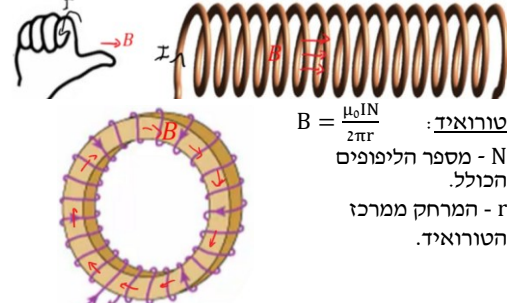
כאשר הזרם בכיוון $\hat{z}$ השדה בכיוון $\hat{\theta}$ שדה של מישור אינסופי: $\vec{B} = \frac{\mu_0 \sigma v}{2} \begin{cases} -\hat{y}, & z > 0 \\ \hat{y}, & z < 0 \end{cases}$

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 משדה מגנטי נתון

מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון (חוק אמפר הדיפרנציאלי): $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$

מציאת צפיפות זרם קווית $\vec{k}$ משדה 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: $\vec{B} = \frac{C}{r} \hat{\theta}$

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 הסיפח $\vec{v}_{drift}$.

$\vec{k}$ - 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: $I = k l$

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 משוואות הרציפות

משוואות הרציפות: $\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{dp}{dt}$

$\vec{j}$ - 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 $-\frac{dp}{dt}$

משוואות הרציפות בדו 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)

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

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

GOOL הכוח המגנטי - חוק לורנץ

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

ניתן לחשב את הכוח בשתי 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 (עדף 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. עבודת הכוח המגנטי: תמיד מתאפסת (כי הוא מאונך לתנועה).

GOOL הכוח המגנטי על תיל נושא זרם

כוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך dl עם זרם I הנמצאת בשדה מגנטי B הוא: $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$

- 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 לכוח הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

GOOL חוק ביו-סבר

חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם: $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{|\vec{r}|^2}$

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

- חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:

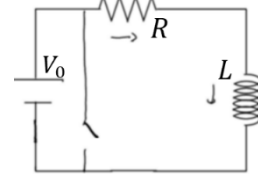


הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

GOOL

RL מעגלי

טעינה:



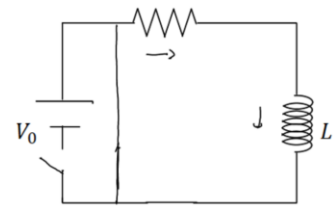
$$V_0 - IR - L\dot{I} = 0$$

$$I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

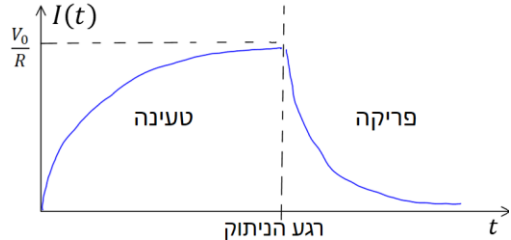
- סליל (או משרן) מתנהג בהתחלה כמו נתק ולאחר זמן רב כמו קצר.

פריקה:



$$-IR - L\dot{I} = 0$$

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



רגע הניתוק

חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:

$$L_T = L_1 + L_2 + \dots$$

בטור:

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots$$

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots$$

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$$

במקביל:

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots$$

$$V_T = V_1 = V_2 = \dots$$

GOOL

השראות הדדית

$$M_{1,2} = \frac{\Phi_1}{I_2}$$

השראות הדדית:

חישוב השראות הדדית:

1. נניח שזרם 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 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:

$$\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

N הוא מספר הליפופים בכל צד.

GOOL

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-

$$V = \frac{IdB_{\perp}}{nqA} = \frac{2IB_{\perp}}{nq\pi R}$$

המתח הנוצר לרוחב המוליך:

V - 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.

GOOL

הפוטנציאל הקוטרי

חומרים פאראמגנטיים: חומרים המחזקים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים בעלי אטומים עם מס אלק' לא זוגי, לאטומים אלו דיפול מגנטי כתוצאה מהסיבוב האלקטרוני 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 דיפול של יחיד בחומר.

מומנט הדיפול הכולל של החומר:

צפיפות זרם קשורה: ניתן לחשב את השדה המגנטי שיוצרים הדיפולים באמצעות חישוב השדה של צפיפות

זרם קשורה.

$\hat{n}$ - 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 לזוו בחומר ו- $\vec{J}_b$ נובעת מהמגנטיזציה.

הוקטור $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$:

- הוקטור $\vec{H}$ מקיים את חוק אמפר עבור הזרמים

החופשיים: $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{in,free}$

הדיברגנט של $\vec{H}$: $\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$

חומרים לינאריים: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$; $\vec{B} = \mu \vec{H}$

כאשר χ_m היא הסוסטבייליות המגנטית, תכונה שתלויה

בחומר ובדרי"כ קבועה. μ היא הפרמביליות המגנטית כך

ש: $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$

תנאי שפה:

$$H_{2\perp} - H_{1\perp} = -(M_{2\perp} - M_{1\perp})$$

$$\vec{H}_{2\parallel} - \vec{H}_{1\parallel} = \vec{k}_{f \rightarrow 2} \times \hat{n}_{1 \rightarrow 2}$$

$$B_{2\perp} = B_{1\perp}$$

$$\vec{B}_{2\parallel} - \vec{B}_{1\parallel} = \vec{k}_T \times \hat{n}_{1 \rightarrow 2}$$

הכי נוה להשתמש בתנאים 2 ו-3 ואלו מספיקים בשביל

למצא את כל הרכיבים של כל השדות בהנחת הלינאריות

או בהינתן המגנטיזציה.

מודל המטען המגנטי:

אם $\vec{J}_{free} = 0$ אז $\vec{H}$ שדה משמר וניתן להגדיר פונקציית

פוטנציאל מגנטי: $\vec{H} = -\vec{\nabla}\phi_m$

את הפוטנציאל (או השדה) ניתן למצא כמו שמוצאים

פוטנציאל באלקטרוסטטיקה ממשטן (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.

GOOL

משוואות מקסוול

הצורה הדיפרנציאלית: הצורה האינטגרלית:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$$

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$$

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$

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)

תנוד: החומר בו מתקדמת ההפרעה

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

אנרגיה של גל: $E, A \propto A^2$ 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 מתוזריים: $\lambda = v \cdot T$

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

תדירות (מספר המחזורים בשנייה): $f = \frac{1}{T}$

גל הרמוני: $y(x, t) = A \cos(kx \pm \omega t + \phi)$

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

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

נקודת טבור (antinode): אמפליטודה מקסימאלית.

פעימות: בפעימות אחרון מחברים שני גלים בעלי אותה

אמפליטודה ומקבלים גל בתוך מעטפת (פעימה).

$$\Psi_1(t) = A \cos(\omega_1 t) \text{ \& } \Psi_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$$

$$\Psi_T(t) = \Psi_1(t) + \Psi_2(t) = 2A \cos(\epsilon t) \cos(\Omega t)$$

$$\epsilon = \frac{\omega_f - \omega_s}{2}$$

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

$$\epsilon \ll \Omega$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

$$\Psi_T(t) = A(t) \cos(\epsilon t)$$

(האנרגיה הכוללת נשמרת)

מעגל RLC:

משוואת המעגל:

$$I = -\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$$

(ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מרוסנת. נגיד $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$

$$\Gamma = \frac{R}{2L}$$

הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:

מקרה 1 - ריסון חזק: $\Gamma > \omega_0$

$$q(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$$

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

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

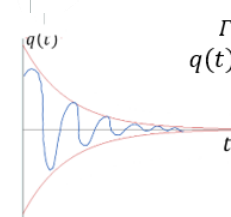
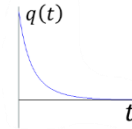
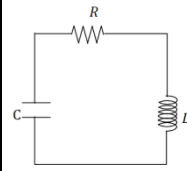
$$q(t) = Ae^{-\omega_0 t} + Bte^{-\omega_0 t}$$

בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר משלושת המקרים.

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

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

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



בכל המקרים האנרגיה של המעגל (שאגורה בסליל ובקבל)

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

דועכת בקצב כפול:

(בריסון חזק קבוע הדעיכה הוא λ במקום Γ)

מעגלים עם מקור מתח חילופין:

משוואת המעגל:

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

$$I = \dot{q}$$

(ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת.

פתרון המשוואה:

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

- הפתרון ההומוגני הוא פתרון מעגל RLC והוא דועך בזמן.

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

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

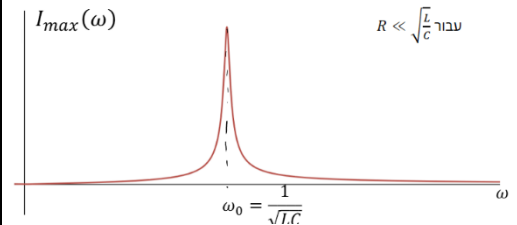
$$\tan \varphi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$

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

$$R \ll \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \omega \text{ ולהשוות לאפס. עבור } \omega \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$$



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

פתרון עם מספרים מורכבים:

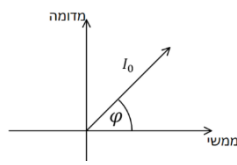
אם כל המשתנים הם פונקציות מהצורה $A \cos(\omega t + \varphi)$ והמשוואות שלנו לינאריות. אז יותר נוח לעבוד עם מספרים מורכבים. כך ש:

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

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

(בדד"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 בדד"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:

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

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

הגודל של העכבה:

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

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

העכבה הכוללת של המעגל:

$\tilde{V}_s$ ו- $\tilde{I}_s$ 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.

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

$$V_{RMS} I_{RMS} \cos \varphi$$

כאשר φ היא הפאזה של המתח ביחס לזרם.

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