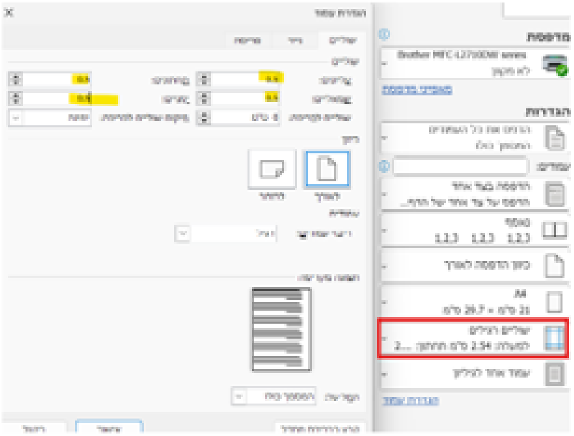
הוראות לדף הנוסחאות



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.

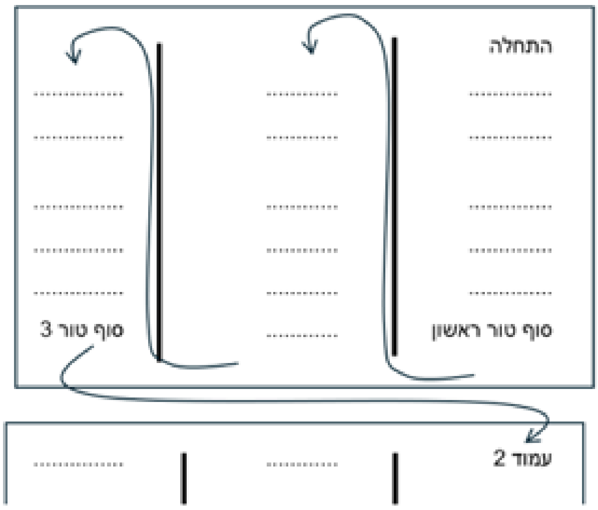
בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.

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

מבנה הדף:

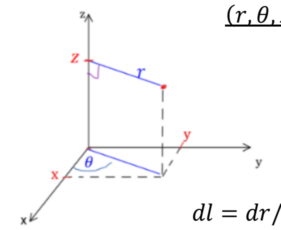
הדף בנוי משלושה טורים.
ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.
בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.

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



מבוא מתמטי GOOL

קואורדינטות גליליות: (r,θ,z)



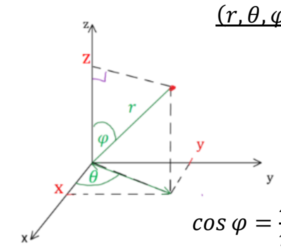
$$x = r\cos\theta$$
$$y = r\sin\theta$$
$$z = z$$
$$r = \sqrt{x^2+y^2}$$
$$\tan\theta = \frac{y}{x}$$

$dl = dr/rd\theta(\text{טבעת})/dz$

$ds = rdrd\theta(\text{דיסקה})/rd\theta dz(\text{קליפה גלילית דקה})/drdz$

$dv = rd\theta drdz(\text{גליל מלא או קליפה גלילית עבה})$

קואורדינטות כדוריות: (r,θ,φ)



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

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

$ds = r^2\sin\varphi d\theta d\varphi(\text{מעטפת כדור})$

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

צפיפות נפחית/משטחית/אורכית:

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

V,S,l הם נפח, שטח ואורך הגוף.

וקטור יחידה: $\hat{A} = \frac{\vec{A}}{|\vec{A}|}$

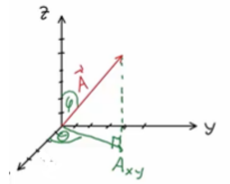
מכפלה סקלרית: שתי דרכים לביצוע המכפלה:

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

α - זווית בין הוקטורים.

- תוצאת המכפלה היא תמיד סקלר (ולא וקטור).
- מכפלה בין וקטורים מאונכים מתאפסת, זו דרך **לבדוק האם וקטורים מאונכים**.

וקטור בשלושה מימדים:



$$0 \le \varphi \le \pi$$
$$0 \le \theta \le 2\pi$$
$$\tan\theta = \frac{A_y}{A_x}$$
$$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2+A_y^2+A_z^2}$$
$$;\ \cos\varphi = \frac{A_z}{|\vec{A}|} = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2+A_y^2+A_z^2}}$$

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

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

פתיחת סוגרים והעלאה בריבוע:

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

זווית בין שני וקטורים: $\cos\alpha = \frac{A_xB_x+A_yB_y}{|\vec{A}|\cdot|\vec{B}|} = \frac{\vec{A}\cdot\vec{B}}{|\vec{A}|\cdot|\vec{B}|}$

מכפלה וקטורית:

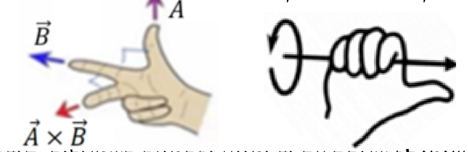
דרך 1 לעשות את המכפלה– דטרמיננטה:

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

דרך 2 – לפי גודל וכיוון בנפרד:

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

וכיוון לפי כלל יד ימין



שימו לב שאתם עם יד ימין!! ובתמונה השמאלית, קודם לעשות אקדח ואחר"כ 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:

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

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

- בגליליות:

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

- בכדוריות (*):

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

(*) **שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר x**

במערכות צירים צריך להתקיים:

$$\hat{x}\times\hat{y} = \hat{z}\ \ ;\ \ \hat{r}\times\hat{\theta} = \hat{z}\ \ ;\ \ \hat{r}\times\hat{\theta} = \hat{\varphi}$$

זהויות כלליות למכפלה סקלרית וקטורית:

$$\vec{A}\cdot(\vec{B}\times\vec{C}) = \vec{B}\cdot(\vec{C}\times\vec{A}) = \vec{C}\cdot(\vec{A}\times\vec{B})$$
$$\vec{A}\times(\vec{B}\times\vec{C}) = \vec{B}(\vec{A}\cdot\vec{C}) - \vec{C}(\vec{A}\cdot\vec{B})$$
$$(\vec{A}\times\vec{B})\cdot(\vec{C}\times\vec{D}) = (\vec{A}\cdot\vec{C})\cdot(\vec{B}\cdot\vec{D}) - (\vec{A}\cdot\vec{D})(\vec{B}\cdot\vec{C})$$
$$\vec{A}\times\left(\vec{B}\times(\vec{C}\times\vec{D})\right) = \vec{B}\left(\vec{A}\cdot(\vec{C}\times\vec{D})\right) - (\vec{A}\cdot\vec{B})(\vec{C}\times\vec{D})$$

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

div בכדוריות:

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

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

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

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

בגליליות:

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

בכדוריות (*):

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

(*) **שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר x**

זהויות של אופרטורים:

$$\vec{\nabla}(f+g) = \vec{\nabla}f + \vec{\nabla}g$$
$$\vec{\nabla}(\vec{A}+\vec{B}) = (\vec{\nabla}\cdot\vec{A}) + (\vec{\nabla}\cdot\vec{B})$$
$$\vec{\nabla}\times(\vec{A}+\vec{B}) = (\vec{\nabla}\times\vec{A}) + (\vec{\nabla}\times\vec{B})$$
$$\vec{\nabla}(\vec{A}\cdot\vec{B}) = \vec{A}\times(\vec{\nabla}\times\vec{B}) + \vec{B}\times(\vec{\nabla}\times\vec{A}) + (\vec{A}\cdot\vec{\nabla})\vec{B} + (\vec{B}\cdot\vec{\nabla})\vec{A}$$
$$\vec{\nabla}(f\cdot g) = (\vec{\nabla}f)\cdot g + (\vec{\nabla}g)\cdot f$$
$$\vec{\nabla}(f\cdot\vec{A}) = f(\vec{\nabla}\cdot\vec{A}) + \vec{A}\cdot(\vec{\nabla}f)$$

קבועים GOOL

מסות הפרוטון, נויטרון ואלקטרון:

$$m_n \approx m_p = 1.67\cdot10^{-27}kg\ ;\ m_e = 9.1\cdot10^{-31}kg$$

מטען הפרוטון והאלקטרון:

$$q_p = 1.6\cdot10^{-19}C = e = -q_e$$

מקדם דיאלקטרי של הריק ו- k:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot10^9\frac{N\cdot m^2}{C^2}\ ;\ \varepsilon_0 = 8.85\cdot10^{-12}\frac{C^2}{N\cdot m^2}$$

חוק קולון GOOL

חוק קולון: הכוח החשמלי שמפעיל מטען q_1 כלשהו על מטען q_2 כלשהו:

$$\vec{F} = \frac{kq_1\cdot q_2}{r^2}\hat{r} = \frac{kq_1q_2}{r^3}\vec{r}$$

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

השדה החשמלי שיוצר מטען q במרחק:

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

$\vec{r}$ - וקטור מהמטען q אל הנקודה בה מחשבים את השדה.

שימו לב שבנוסחה הזו המטען הוא זה שיוצר את השדה.

הכוח 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 ו-z) בנפרד.

אלמנט המטען של חתיכה קטנה הוא:

$$dq = \lambda d\,l/\sigma d\,s/\rho\,dv$$

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

לחץ אלקטרוסטטי GOOL

הלחץ הוא כוח ליחידת שטח: $P = \frac{dF}{dS} = \sigma E$

σ צפיפות המטען המשטחית של אלמנט השטח.

E השדה החשמלי הפועל על אלמנט השטח (שימו לב שיש לחשב את השדה הכולל בנקודה שבה נמצא אלמנט השטח ולהחסיר את השדה של האלמנט עצמו השווה ל- $\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$).

עבור קליפה כדורית: $P = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$

פוטנציאל GOOL

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

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).

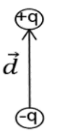
הארקה - חיבור לקרקע , מאפסת את הפוטנציאל.

שיטות לחישוב פוטנציאל:

1. אם ניתן לחשב את השדה (בדר"כ עם חוק גאוס) או אם השדה נתון, נעשה אינטגרל לא מסוים על השדה בכל תחום ונוסיף קבוע. את הקבועים מוציאים על ידי תנאי הרציפות של הפוטנציאל וכיול (בחירת נק' האפס).
2. חלוקת הגוף לחתיכות קטנות, חישוב הפוטנציאל של כל חתיכה כמו גוף נקודתי $d\varphi = \frac{kdq}{r}$ וסכימה. (הסבר על dq בחוק קולון)

דיפול חשמלי GOOL

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



מומנט הדיפול: $\vec{p} = q\vec{d}$

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:

$$p_x = \sum x_iq_i = \int x\,dq$$

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 GOOL

למצא צפיפות נפחית נעשה: $\rho = \varepsilon_0\vec{\nabla}\cdot\vec{E}$

למצא צפיפות משטחית: $\sigma = \varepsilon_0\Delta E_\perp$

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

מטען נקודתי: אם יש שדה מהצורה $\vec{E} = \frac{\alpha}{r^2}\hat{r}$ (בקורדינטות **כדוריות**) 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 $\lambda = 2\pi\varepsilon_0\alpha$.

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

משוואת פואסון ולאפלאס — GOOL

משוואת פואסון: $\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$

משוואת לפלס: $\nabla^2\varphi = 0$

הלפלסיאן ($\vec{\nabla}^2 f$ או Δf) של פונקציה סקלרית בקרטזיות:

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

בגליליות:

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

בכדוריות:

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

כאשר φ היא הזווית עם ציר z .

אנרגיה הדרושה לבניית מערכת — GOOL

$$U = \Sigma\frac{1}{2}\varphi_i q_i = \int\frac{\varepsilon_0}{2}E^2\,dv$$

- 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
- $\mu_E = \frac{\varepsilon_0}{2}E^2$ נקראת צפיפות האנרגיה החשמלית

מטען דמות — GOOL

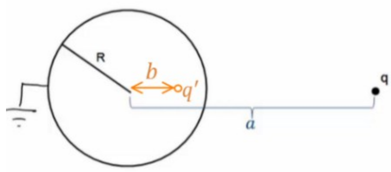
שיטה למצוא פוטנציאל בבעיות עם מוליכים והתפלגות מטען שאינה אחידה.

השיטה:
- נבנה בעיה מקבילה ללא המוליך .
- בבעיה המקבילה נשאר 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.

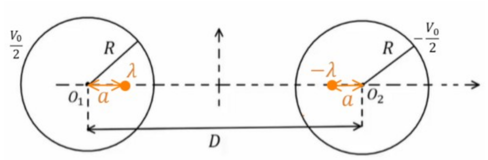
המקרה של קליפה כדורית ומטען נקודתי:

$$q' = -\frac{R}{a}q \; ; \; b = \frac{R^2}{a}$$

- אם הקליפה נמצאת בפוטנציאל V_0 אז נוסיף מטען $q'' = \frac{V_0 R}{k}$ במרכז הקליפה.



המקרה של שני גלילים אינסופיים:



$$\lambda = \frac{\pi\varepsilon_0 V_0}{\ln\left(\frac{D}{2R}+\sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^2-1}\right)} \; ; \; a = \frac{D}{2}-\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2-R}$$

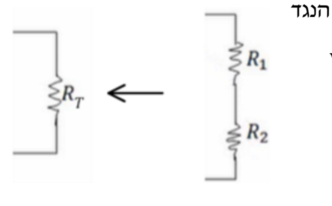
מעגלי זרם ישר — GOOL

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.

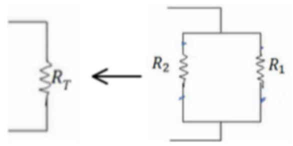


$V_T = V_1 + V_2$

$I_T = I_1 = I_2$

כאשר I_T ו- V_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: $R_T = \Sigma R_i$, $V_T = \Sigma V_i$, $I_T = I_i$

במקביל: $\frac{1}{R_T} = \Sigma\frac{1}{R_i}$, $I_T = \Sigma I_i$, $V_T = V_i$

מד זרם (אמפרמטר) אידיאלי - מחובר בטור ובעל התנגדות זניחה.

מד מתח (וולטמטר) אידיאלי - מחובר במקביל לרכיב הנמדד, בעל התנגדות מאוד גבוהה.

ההספק בנגד: $P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R}$

($P = IV$ 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: $V = \varepsilon - Ir$

V - מתח הדקים, המתח בין קצוות הסוללה או המתח שמרגיש המעגל - תלוי בזרם.

ε - כא"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 הפתרונות). לדוגמה, עבור מערכת המשוואות הבאה:

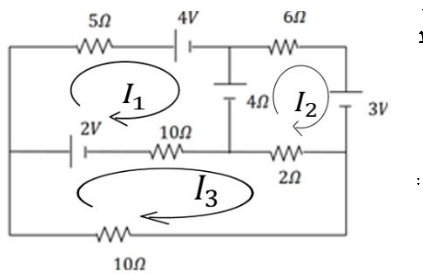
$$\begin{aligned}3I_1+4I_2+8I_3&=5\\2I_1-5I_2+9I_3&=1\\4I_1+3I_2-7I_3&=3\end{aligned} \qquad \Delta = \begin{vmatrix}3&4&8\\2&-5&9\\4&3&-7\end{vmatrix}$$

Δ_i - דטרמיננטה של מערכת המשוואות שהוחלפה בה העמודה ה i בעמודת התשובות. לדוגמה, במערכת הנ"ל:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix}3&5&8\\2&1&9\\4&3&-7\end{vmatrix}$$

זרמי חוגים:

1. נחלק את המעגל למעגלים סגורים ונבחר זרמים לכל מעגל. לדוגמה:



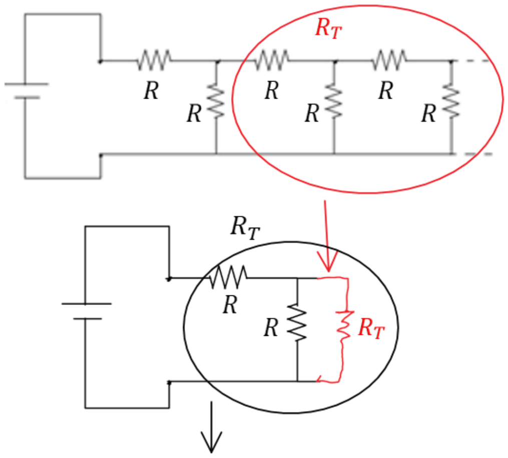
2. נעשה משוואת מתחים **לכל מעגל**. עבור מעגל 1 בדוגמה:

$$5I_1+4+4+10(I_1-I_3)-2=0$$

3. נפתור את מערכת המשוואות

מעגלים אינסופיים:

נניח שההתנגדות השקולה של המעגל שווה להתנגדות השקולה של המעגלת 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



$$R_T = R+\frac{R\cdot R_T}{R+R_T}$$

חומרים דיאלקטרים — GOOL

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:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_{free}}{\varepsilon_r}$$

$\vec{E}_{free}$ הוא השדה שנוצר ממטענים חופשיים/מחוץ לחומר.

$\vec{E}$ הוא השדה הכולל בתוך החומר (מהמטענים החופשיים והדיפולים של החומר).

ε_r או κ - מקדם דיאלקטרי של החומר -תכונה של החומר בדר"כ קבוע וידוע. $\varepsilon_r > 1$ ו- $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$

σ_{free} - צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:

$\sigma_{free} = \varepsilon_0\Delta E_{free\perp}$

σ_T - צפיפות המטען הכוללת: $\sigma_T = \varepsilon_0\Delta E_\perp$

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 $\left[\frac{1}{m^3}\right]$.

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.

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: $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}+\vec{P}$

חוק גאוס למטען החופשי:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{D} = \rho_f \Leftrightarrow \oint\vec{D}\cdot d\vec{s} = Q_{in_f}$$

בחומרים לינאריים (בדר"כ בשאלות): $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$

חומר איזוטרופי: $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}_0$

חומרים דיאלקטרים — GOOL

הגדרת הקיבול: $C = \frac{|q|}{|V|}$

הקיבול היא תכונה קבועה ותלויה רק במבנה הגיאומטרי של הגוף (ולא במתח או במטען על הרכיב).

קיבול קבל לוחות: $C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

A - שטח כל לוח. d - מרחק בין הלוחות, $d \ll \sqrt{A}$.

שדה בתוך קבל לוחות: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{V}{d}$

σ - צפיפות המטען ליחידת שטח בכל לוח.

V - המתח בין הלוחות. d - מרחק בין הלוחות.

קיבול קבל גלילי: $C = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln\frac{b}{a}}$

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 (בדר"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: $U_c = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}qV$

העבודה שמבצעת הסוללה: $W_s = \Delta q V_s = -2\Delta U_c$

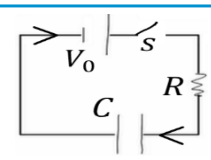
Δq הוא המטען שעבר דרכה (וזה המטען שקיבל הקבל)

הכוח הפועל על חומר דיאלקטרי בקבל: $F = \left|\frac{dU_c}{dx}\right|$

הכוח תמיד מושך את החומר פנימה.

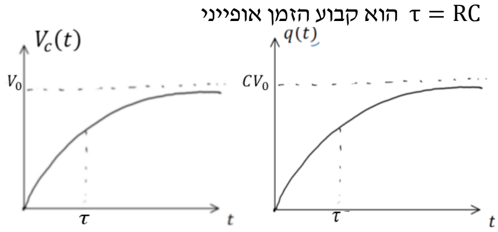
פריקה וטעינה של קבל GOOL

מעגל טעינה:

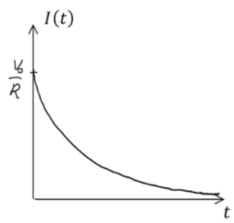


- משוואת המתחים: $V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$, $I = \frac{dq}{dt}$
- המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן(בטעינה): $q(t) = CV_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$; $V_c(t) = V_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

$\tau = RC$ הוא קבוע הזמן אופייני

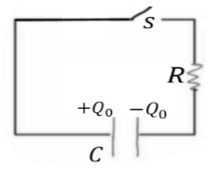


- הזרם כתלות בזמן: $I(t) = \frac{V_0}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$

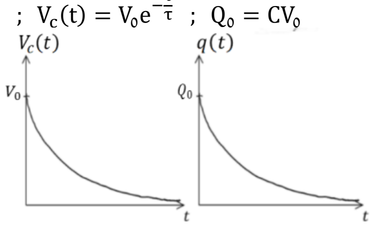


- בהתחלה $(t = 0)$ הקבל מתנהג כמו קצר, המתח והמטען על הקבל הם אפס והזרם הוא $\frac{V_0}{R}$.
- לאחר זמן רב $(t > 5\tau)$ הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמתח קבועים והזרם מתאפס.

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

מעגלים אינסופיים בקבלים: ראו מעגלים אינסופיים במעגלי זרם ישר.

מבנה הנגד וצפיפות זרם GOOL

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 - $\vec J$: $I = \int \vec J \cdot d\vec S$

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 ליח נפח ו- q הוא המטען של נושא מטען יחיד, בד"כ אלקטרון. מהירות המטענים נקראת מהירות הסחיפה $\vec v_{drift}$.

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

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

אם $\vec k$ אחידה אז: $I = kl$

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען משטחית בתנועה: $\vec k = \sigma\vec v$

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

משוואת הרציפות GOOL

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

$\vec J$ – 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 $-\frac{d\rho}{dt}$

משוואת הרציפות בדו ממד: $\frac{d\sigma}{dt} = -\vec\nabla_{2D} \cdot \vec k$

$\vec k$ – צפיפות הזרם ליחידת אורך.

σ – צפיפות המטען המשטחית.

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

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

I – הזרם בתיל, λ – צפיפות המטען ליח' אורך בתיל.

שדות של מטענים נעים GOOL

הגדרת המטען: $q = \varepsilon_0 \oint \vec E \cdot d\vec s$

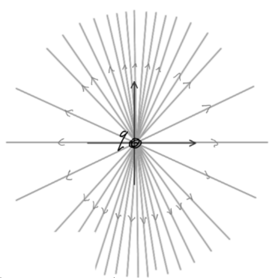
המטען הוא גודל אינוואריאנטי במעבר בין מערכות ייחוס.

שדה של מטען נע במהירות קבועה:

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

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 שעוצר בפתאומיות:

ניצור ספירה סביב הנקודה שבה נעצר המטען ברדיוס השווה למהירות האור כפול הזמן מתחילת התנועה.

בתוך הספירה השדה יהיה שדה של מטען במנוחה.

מחוץ לספירה השדה יהיה שדה של המטען כאילו הוא לא הפסיק את התנועה.

עובי הספירה קשור לתהליך העצירה. השדה בתוך עובי הספירה הוא בערך בכיוון משיק לספירה.

שדה של מטען שמתחיל תנועה בפתאומיות:

ניצור ספירה סביב הנקודה ממנה התחיל המטען לנוע ברדיוס השווה למהירות האור כפול הזמן מתחילת התנועה. בתוך הספירה השדה יהיה שדה של מטען נע 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 קבוע	$Q\vec E$
המטען שמפעיל את הכוח 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 GOOL

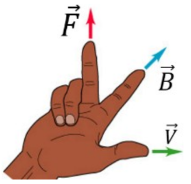
חוק לורנץ - הכוח המגנטי: $\vec F_B = q\vec v \times \vec B$

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 (עדיף לעשות קודם אקדח).



תנועה בשדה אחיד: מטען q בעל מסה m הנע במהירות v בשדה מגנטי אחיד (המאונך למהירות) עושה תנועה מעגלית, רדיוס המעגל הוא: $R = \frac{mv}{qB}$

אם v לא מאונך למהירות אז התנועה תהיה בורגית כאשר המעגל יהיה מסביב לשדה, רדיוס המעגל יהיה: $R = \frac{mv\sin\alpha}{qB}$

$v\cos\alpha$ היא מהירות ההתקדמות לאורך ציר השדה.

עבודת הכוח המגנטי: תמיד מתאפסת (כי הוא מאונך לתנועה).

הכוח המגנטי על תיל נושא זרם GOOL

הכוח 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 למצוא 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.

חוק ביו-סבר GOOL

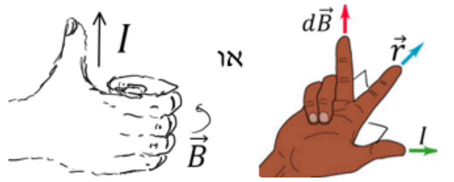
חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

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

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

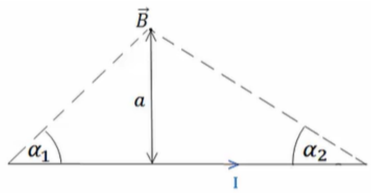
$d\vec l$ הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.

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



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

- כיוון השדה לפי כלל הבורג:

כוח ליחידת אורך בין שני תיילים מקבילים: $\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$

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

חוק אמפר GOOL

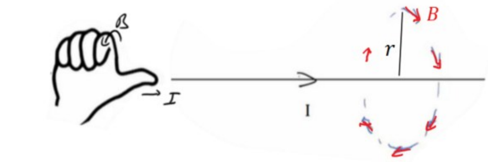
חוק אמפר: $\oint \vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0 I_{in}$; $I_{in}=\int \vec{J}\cdot d\vec{s}$

- כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיק של B לאורך מסלול סגור. בדר"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: $B=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

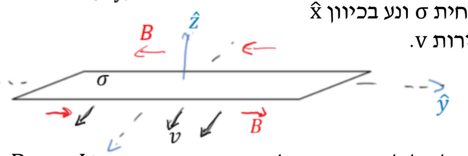
כאשר r הוא המרחק מהתיל.



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

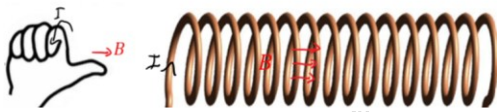
שדה של מישור אינסופי: $\vec{B}=\frac{\mu_0\sigma v}{2}\begin{cases}-\hat{y}, & z>0\\ \hat{y}, & z<0\end{cases}$

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



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

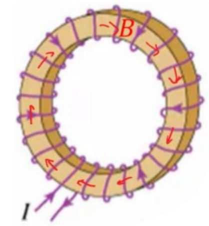
כאשר n הוא מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל.
- כיוון: לפי כלל הבורג, האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.



טורואיד: $B=\frac{\mu_0 IN}{2\pi r}$

N - מספר הליפופים הכולל.

r - המרחק ממרכז הטורואיד.



טרנספורמציית יחסותית (לורנץ) לשדות

טרנספורמציית השדות עבור צופה הנע במהירות $\vec{v}$ ביחס למעבדה: $\vec{E}'=\vec{E}+\vec{v}\times\vec{B}$; $\vec{B}'=\vec{B}-\frac{\vec{v}\times\vec{E}}{c^2}$

$\vec{E}$ ו-$\vec{B}$ הם השדות במערכת המעבדה ו-$\vec{E}',\vec{B}'$ הם השדות במערכת הנעה. $c=3\cdot 10^8\,{}^{m}/_{s}$ מהירות האור

טרנס' ההפוכה: $\vec{E}=\vec{E}'-\vec{v}\times\vec{B}'$; $\vec{B}=\vec{B}'+\frac{\vec{v}\times\vec{E}'}{c^2}$

מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון GOOL

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

מציאת צפיפות זרם קווית $\vec{k}$ משדה מגנטי נתון (כאשר יש אי רציפות בשדה): $\hat{n}_{1\to2}\times\Delta\vec{B}=\mu_0\vec{k}$

כאשר $\hat{n}_{1\to2}$ הוא וקטור יחידה בכיוון הקפיצה מתחום 1 לתחום 2 ו- $\Delta\vec{B}=\vec{B}_2-\vec{B}_1$

בשביל למצוא זרם של תיל נחפש שדה מהצורה $\vec{B}=\frac{C}{r}\hat{\theta}$ **בקואורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הראשית** ו- C קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי ($\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$) ונקבל $I=\frac{C2\pi}{\mu_0}$

חוק פאראדיי GOOL

חוק פאראדיי: $\varepsilon=-\frac{d\phi_B}{dt}$; $\phi_B=\int\vec{B}\cdot d\vec{s}$

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?

נרצה להקטין את השטף → ניצור שדה מגנטי בכיוון הפוך לשדה הקיים

נרצה להגדיל את השטף → ניצור שדה מגנטי באותו הכיוון של השדה הקיים

נמצא את כיוון הזרם שייצור את השדה המתאים לפי כלל יד ימין

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.

אפקט הול GOOL

בפועל רק אלקטרונים זזים במוליך כשיש זרם. כתוצאה מהתנועה הזו הם מרגישים כוח (אם יש שדה מגנטי) שדוחף אותם לדופן המוליך ונוצרת הפרדת מטענים הגורמת לשדה חשמלי לרוחב המוליך. בשיווי משקל הכוח החשמלי שווה למגנטי. מהשוויון ניתן לחשב את השדה החשמלי ו-

המתח הנוצר לרוחב המוליך: $V=\frac{IdB_\perp}{nqA}=\frac{2IB_\perp}{nq\pi R}$

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.

טרנספורמציית יחסותית (לורנץ) לשדות

טרנספורמציה של השדות עבור צופה הנע במהירות $\vec{v}$

ביחס למעבדה: $\vec{E}'_{||}=\vec{E}_{||}$; $\vec{E}'_\perp=\gamma(\vec{E}_\perp+\vec{v}\times\vec{B}_\perp)$

$\vec{B}'_{||}=\vec{B}_{||}$; $\vec{B}'_\perp=\gamma\left(\vec{B}_\perp-\frac{1}{c^2}\vec{v}\times\vec{E}_\perp\right)$; $\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

$\vec{E}$ ו-$\vec{B}$ הם השדות במערכת המעבדה ו-$\vec{E}',\vec{B}'$ הם השדות במערכת הנעה.

הטרנס' ההפוכה: $\vec{E}'_{||}=\vec{E}_{||}$; $\vec{E}_\perp=\gamma(\vec{E}'_\perp-\vec{v}\times\vec{B}'_\perp)$

$\vec{B}'_{||}=\vec{B}_{||}$; $\vec{B}_\perp=\gamma\left(\vec{B}'_\perp+\frac{1}{c^2}\vec{v}\times\vec{E}'_\perp\right)$

טרנספורמציה של צפיפויות המטען: $\lambda=\gamma\lambda_0$; $\sigma=\gamma\sigma_0$; $\rho=\gamma\rho_0$

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.

מומנט דיפול מגנטי GOOL

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. כיוונו במאונך למשטח ובהתאם לכלל יד ימין של הזרם.

השדה שיוצר דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדיי הדיפול: $\vec{B}=\frac{\mu_0[3(\vec{\mu}\cdot\hat{r})\hat{r}-\vec{\mu}]}{4\pi r^3}$

מומנט כוח שפועל על דיפול מגנטי הנמצא בשדה מגנטי חיצוני: $\vec{\tau}=\vec{\mu}\times\vec{B}$

האנרגיה הפוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי חיצוני: $U=-\vec{\mu}\cdot\vec{B}$

השראות GOOL

השראות ברכיב: $L=\frac{\phi_B}{I}$

כאשר ϕ_B הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב.

- ההשראות היא **תכונה שתלויה רק במבנה** ולכן היא בד"כ קבועה.

חישוב השראות לפי הגדרה:
1. נניח שזורם זרם I ברכיב.
2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם בתוך הרכיב.
3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב.
4. נציב בנוסחה של ההשראות והזרם יצטמצם.

השראות של סליל: $L=\frac{\mu_0\pi a^2N^2}{l}$

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): $U_L=\frac{1}{2}LI^2$

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

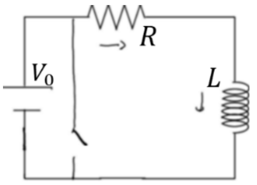
- את האינטגרל עושים על **כל המרחב**.
- זו אותה האנרגיה שמחשבים באמצעות ההשראות (פשוט צורת חישוב אחרת).
- ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).

המתח על סליל (משרן) במעגל: $V_L=L\dot{I}$

הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

מעגלי RL GOOL

טעינה:



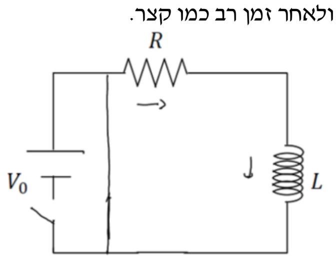
$V_0-IR-L\dot{I}=0$

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

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

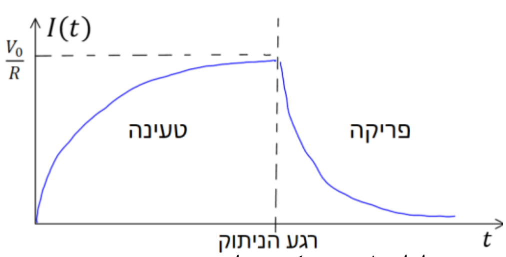
- סליל (או משרן) מתנהג בהתחלה כמו נתק ולאחר זמן רב כמו קצר.

פריקה:



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

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



חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:

בטור: $L_T=L_1+L_2+\cdots$

כאשר $V_T=V_1+V_2+\cdots$ ו- $I_T=I_1=I_2=\cdots$

במקביל: $\frac{1}{L_T}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\cdots$

כאשר $V_T=V_1=V_2=\cdots$ ו- $I_T=I_1+I_2+\cdots$

השראות הדדית GOOL

השראות הדדית: $M_{1,2}=\frac{\phi_1}{I_2}$

חישוב השראות הדדית:
1. נניח שזורם זרם I_2 ברכיב 2.
2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם ברכיב 1.
3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב 1.
4. נציב בנוסחה של ההשראות ו- I_2 יצטמצם.

- השראות הדדית תמיד סימטרית $M_{1,2}=M_{2,1}=M$ ולכן ניתן תמיד לחשב $M_{1,2}$ ולהסיק על $M_{2,1}$ (או להפך).

יחס המתחים בשנאי: $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}=\frac{N_1}{N_2}$

N הוא מספר הליפופים בכל צד.

הפוטנציאל הוקטורי GOOL

חומרים פאראמגנטיים: חומרים המחזקים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים בעלי אטומים עם מס אלקי' 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 ב"היסטוריה" 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. $\vec J_b = \vec\nabla\times\vec M$; $\vec k_b = \vec M\times\hat n$

$\hat n$ - 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 לזוז בחומר ו-$\vec J_b$ נובעת מהמגנטיזציה.

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

- הוקטור $\vec H$ מקיים את חוק אמפר עבור הזרמים החופשיים: $\vec\nabla\times\vec H = \vec J_{free}$; $\oint \vec H\cdot d\vec l = I_{in\,free}$

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

חומרים ליניאריים: $\vec M = \chi_m \vec H$; $\vec B = \mu\vec H$

כאשר χ_m היא הסוסטפטיביליות המגנטית, תכונה שתלויה בחומר ובדר"כ קבועה. μ היא הפרמביליות המגנטית כך ש: $\mu = \mu_0(1+\chi_m)$

תנאי שפה:

1. $H_{2\perp} - H_{1\perp} = -(M_{2\perp}-M_{1\perp})$
2. $\vec H_{2\parallel} - \vec H_{1\parallel} = \vec k_{free}\times\hat n_{1\to2}$
3. $B_{2\perp} = B_{1\perp}$
4. $\vec B_{2\parallel} - \vec B_{1\parallel} = \vec k_T \times \hat n_{1\to 2}$

הכי נוח 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 ממטען (באמצעות חוק גאוס, חוק קולון, משוואת לפלאס או כל שיטה אחרת), כאשר "המטען" המגנטי הוא: $\rho_m = -\vec\nabla\cdot\vec M$

- משוואת לפלאס: $\nabla^2\phi_m = -\rho_m$
- המודל תקף גם אם יש $\vec k_{free}$ (זרם חופשי על השפה).
- המודל תקף גם עבור חומרים לא ליניאריים.

הפוטנציאל הוקטורי GOOL

הפוטנציאל הוקטורי $\vec A$ מוגדר לפי: $\vec B = \vec\nabla\times\vec A$

משוואת פואסון לפוטנציאל הוקטורי (מחוק אמפר): $\nabla^2\vec A = -\mu_0\vec J$

עבור כיול של הפוטנציאל $\vec\nabla\cdot\vec A = 0$

פתרון המשוואה: $\vec A(\vec r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{\vec J(\vec r')}{|\vec r-\vec r'|}dv'$

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

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

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

תנאי שפה לפוטנציאל הוקטורי:

כל רכיבי הפוטנציאל הוקטורי רציפים.

פיתוח מולטיפולי עד לסדר שני: סדר ראשון תמיד מתאפס והסדר השני הוא: $\vec A_{dip}(\vec r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\cdot\frac{\vec m\times\hat r}{r^2}$

כאשר $\vec m$ הוא מומנט הדיפול המגנטי של המערכת.

חוק סנל GOOL

חוק סנל: $n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2$

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

משוואות מקסוול GOOL

הצורה הדיפרנציאלית ; הצורה האינטגרלית:

1. חוק גאוס $\oint\vec E\cdot d\vec s = \frac{1}{\varepsilon_0}\int\rho\,dV$; $\vec\nabla\cdot\vec E = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho$
2. $\oint\vec B\cdot d\vec s = 0$; $\vec\nabla\cdot\vec B = 0$

השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי.

3. $\oint\vec E\cdot d\vec l = -\int\frac{d\vec B}{dt}\cdot d\vec s$; $\vec\nabla\times\vec E = -\frac{d\vec B}{dt}$

מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי $\varepsilon = -\dot\phi_B$

4. $\oint\vec B\cdot d\vec l = \mu_0\int\vec J\cdot d\vec s + \mu_0\int\varepsilon_0\frac{d\vec E}{dt}d\vec s$;

$$\vec\nabla\times\vec B = \mu_0\vec J + \mu_0\varepsilon_0\frac{d\vec E}{dt}$$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

שדות משתנים בזמן וזרם העתקה GOOL

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 פארדי ובמקום הכא"מ נחשב את האינטגרל כאשר בדר"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 $\varepsilon_0\frac{d\vec E}{dt}$) שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

וקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות GOOL

אנרגיה אלקטרו מגנטית האגורה בשדות:

$$U = \int\left(\frac{\varepsilon_0(\vec E)^2}{2} + \frac{(\vec B)^2}{2\mu_0}\right)dv$$

צפיפות האנרגיה (אנרגיה ליח' נפח): $u_{em} = \frac{\varepsilon_0(\vec E)^2}{2}+\frac{(\vec B)^2}{2\mu_0}$

וקטור פויינטינג: $\vec s = \frac{1}{\mu_0}\vec E\times\vec B$

שטף האנרגיה ליחידת שטח וליחידת זמן.

הקשר בין האנרגיה לוקטור פויינטינג בריק:

$$\oint\vec s\,d\vec s = -\frac{dU}{dt}$$

בצד שמאל עושים אינטגרל של הוקטור פויינטינג על משטח סגור (שטף) ובצד ימין גוזרים בזמן את האנרגיה האגורה בשדות בנפח הכלוא במשטח.

הקשר הדיפרנציאלי בריק: $\vec\nabla\cdot\vec s = -\frac{du_{em}}{dt}$

גלים אלקטרומגנטיים GOOL

משוואות הגלים בריק ($\rho = J = 0$):

$$\vec\nabla^2\vec E = \frac{1}{c^2}\frac{d^2\vec E}{dt^2} \; ; \; \vec\nabla^2\vec B = \frac{1}{c^2}\frac{d^2\vec B}{dt^2}$$

c היא מהירות האור כאשר $\mu_0\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$

- למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.
- המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$$\vec\nabla^2\vec E = \mu_0\varepsilon_0\frac{d^2\vec E}{dt^2}\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\vec\nabla^2E_x = \mu_0\varepsilon_0\frac{d^2E_x}{dt^2} \; ; \vec\nabla^2E_y=\mu_0\varepsilon_0\frac{d^2E_y}{dt^2};$$ לכל z

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

פתרון המשוואה עבור רכיב כלשהו של $\vec E$ או של $\vec B$:

$E_i(\vec r,t) = A_i\cos(\vec k\cdot\vec r - \omega t)$

$\vec k = (k_x,k_y,k_z)$ הוא וקטור הגל, כיוונו הוא כיוון התקדמות הגל.

$\vec k\cdot\vec r = k_xx+k_yy+k_zz$

ω היא התדירות הזוויתית $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

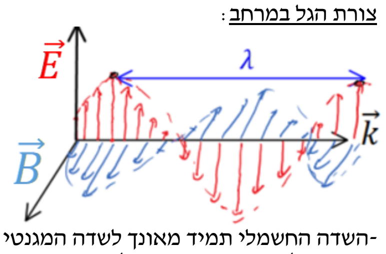
כאשר f היא התדירות בהרץ ו- T הוא זמן המחזור.

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

איך למצא שדה מגנטי מחשמלי ולהפך:

$\vec B = \frac1c\hat k\times\vec E$; $\vec E = c\vec B\times\hat k$

צורת הגל במרחב:



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

λ הוא אורך הגל (המרחק בין שיא לשיא): $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$

יחס הדיספרסיה: $\omega = c|k|$

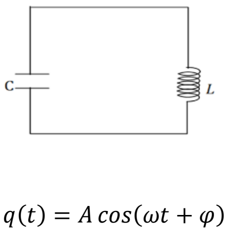
היחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואת הגלים.

פתרון נוסף (עם פלוס): $E_i(\vec r,t) = A_i\cos(\vec k\cdot\vec r+\omega t)$

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

מעגלי זרם חילופין GOOL

מעגל LC:



משוואת המעגל: $\frac qC + L\ddot q = 0$

ו- $I = -\dot q$

(ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)

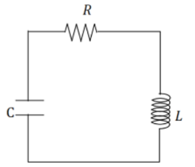
המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית פשוטה.

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

האנרגיה האגורה במעגל: $E = \frac12\frac{q^2}{C}+\frac12LI^2$

(האנרגיה הכוללת נשמרת)

מעגל RLC:



משוואת המעגל:

$\ddot q + \frac RL\dot q + \frac{1}{LC}q = 0$ ו- $I = -\dot q$

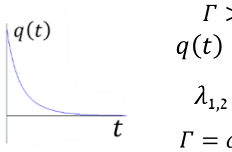
(ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)

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

ו- $\Gamma = \frac{R}{2L}$

הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:

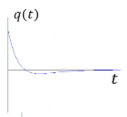
מקרה 1 - ריסון חזק: $\Gamma > \omega_0$



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

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

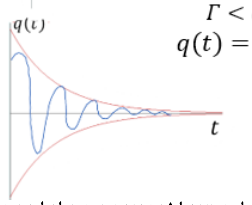
מקרה 2 - ריסון קריטי: $\Gamma=\omega_0$



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

בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר משלושת המקרים.

מקרה 3 - ריסון חלש: $\Gamma<\omega_0$



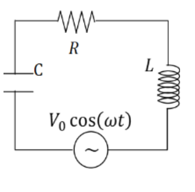
$$q(t) = Ae^{-\Gamma t}\cos(\tilde\omega t+\varphi)$$

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

בכל המקרים האנרגיה של המעגל (שאגורה בסליל ובקבל) דועכת בקצב כפול: $E\propto e^{-2\Gamma t}$

(בריסון חזק קבוע הדעיכה הוא λ במקום Γ)

מעגלים עם מקור מתח חילופין:



משוואת המעגל:

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

ו- $I = \dot q$

(ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת.

פתרון המשוואה:

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

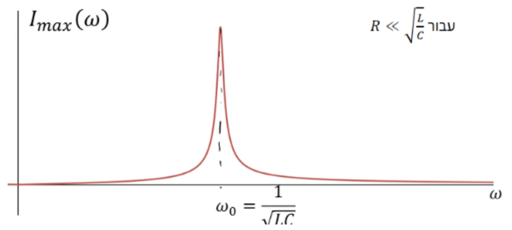
- הפתרון ההומוגני הוא פתרון מעגל RLC והוא דועך בזמן.
- הפתרון הפרטי נקרא הפתרון של המצב העמיד (לאחר זמן רב) בדר"כ מתייחסים רק אליו.

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

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

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 לגזור את I_{max} לפי ω ולהשוות לאפס. עבור $R\ll\sqrt{\frac LC}$



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

פתרון עם מספרים מרוכבים:

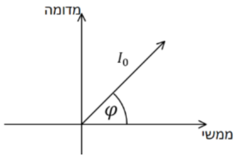
אם כל המשתנים הם פונקציות מהצורה $A\cos(\omega t+\varphi)$ והמשוואות שלנו לינאריות. אז יותר נוח לעבוד עם מספרים מורכבים. כך ש:

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

$\tilde I(t) = I_0e^{i(\omega t+\varphi)}$

(בדר"כ לא רושמים את הגל)

בעבודה עם מספרים מורכבים אפשר להוריד את התלות בזמן



<u>פאזור</u>: תיאור של המספר המורכב באמצעות וקטור במערכת דו מימדית.
הפאזור מסתובב בזמן אבל בדר״כ מסתכלים רק על הפאזור ב $t=0$

<u>עכבה *Impedance*</u>: $Z = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}}$
תכונה שתלויה רק במבנה (קבועה כל עוד המבנה קבוע).
<u>הפאזה של העכבה</u> היא הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב: $\varphi_Z = \varphi_v - \varphi_I$
<u>הגודל של העכבה</u>: $|Z| = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

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

<u>ניתן לחבר עכבות בדיוק כמו חיבור של נגדים ולקבל את העכבה הכוללת של המעגל</u>: $\tilde{V}_S = Z_T \tilde{I}_S$
$\tilde{V}_S$ ו- $\tilde{I}_S$ הם הזרם והמתח של המקור (בייצוג המורכב).
<u>ערכי *RMS*</u> (ממוצע של ריבוע הגודל בזמן):
$$I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \;\; ; \;\; V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$
<u>הספק רגעי</u>: $P(t) = V(t)I(t)$
לשים לב שההספק הרגעי הוא לא גודל לינארי ולכן אי אפשר לחשב אותו באמצעות הייצוג המורכב של המתח והזרם.

<u>הספק ממוצע</u>: $\bar{P} = \frac{V_{max}I_{max}}{2} \cos\varphi = V_{RMS}I_{RMS} \cos\varphi$
כאשר φ היא הפאזה של המתח ביחס לזרם.
$\cos\varphi$ הוא מקדם/גורם ההספק. מצביע על ניצול האנרגיה במעגל.