

הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה:

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

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

עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים, תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.

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

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

מבנה הדף:



הדף בנוי משלושה טורים.

ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.

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

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

כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאתר GOOL

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

קבועים

מסות הפרוטון, נויטרון ואלקטרון:
 $m_n \approx m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
 מטען הפרוטון והאלקטרון:
 $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = e = -q_e$
 מקדם דיאלקטרי של הריק ו-1:
 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}$; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}\cdot\text{m}^2}$

חוק קולון

חוק קולון: הכוח החשמלי שמפעיל מטען q_1 כלשהו על מטען q_2 כלשהו:
 $\vec{F} = \frac{kq_1q_2}{r^2} \hat{r} = \frac{kq_1q_2}{r^3} \vec{r}$
 $\hat{r}$ - וקטור מ- q_1 אל q_2 , $|\vec{r}| = r$
 השדה החשמלי שיוצר מטען q במרחק:

$\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r} = \frac{kq}{r^3} \vec{r}$
 $\hat{r}$ - 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 רציף:
 נחלק את הגוף לחתיכות קטנות, נחשב את השדה שיוצרת כל חתיכה בנקודה ונסכום על כל החתיכות. שימו לב שלסכום על כל רכיב (x, y, z) בנפרד. אלמנט המטען של חתיכה קטנה הוא:

$dq = \lambda dl / \sigma ds / \rho dv$
 כאשר ds ו- dv הם אלמנט אורך, שטח ונפח בהתאמה. הביטוי של האלמנטים מופיע במבוא מתמטי תחת הקורדינטות המתאימות.

פוטנציאל

הגדרת הפוטנציאל: $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ או $\phi = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$
אנרגיה פוטנציאלית חשמלית: $U = q\phi$
מתח: $V = \Delta\phi$
העבודה של הכוח החשמלי: $W = -\Delta U = -q\Delta\phi$
עבודה להזיז מטען נגד הכוח החשמלי: $W = \Delta U = q\Delta\phi$
פוטנציאל של מטען נקודתי: $\phi = \frac{kq}{r}$

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 (בדרי"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 וכויל (בחירת נק' האפס).
 2. חלוקת הגוף לחתיכות קטנות, חישוב הפוטנציאל של כל חתיכה כמו גוף נקודתי $d\phi = \frac{k dq}{r}$ וסכימה. (הסבר על dq בחוק קולון)

דיפול חשמלי

דיפול חשמלי הוא זוג מטענים בעלי מטען זהה וסימון הפוך הנמצאים במרחק d זה מזה.
מומנט הדיפול: $\vec{p} = q\vec{d}$
 כיוונו מהמטען השלילי לחיובי.

הפוטנציאל שיוצר דיפול במרחק גדול $d \ll r$:
 $\phi = \frac{k(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3} = \frac{k(\vec{p} \cdot \hat{r})}{r^2}$
 $\vec{E} = \frac{k[3(\vec{p} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{p}]}{r^3}$
השדה של דיפול במרחק גדול:
מומנט דיפול של מערכת מטענים:

$p_x = \sum x_i q_i = \int x dq$
מומנט כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חשמלי חיצוני:
 $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$
אנרגיה פוטנציאלית של דיפול בשדה חיצוני:

$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$
כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חיצוני:
 $\vec{F} = (\vec{p} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E} = -\vec{\nabla}U$

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

מציאת התפלגות מטען

למצא צפיפות נפחית נעשה: $\rho = \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E}$

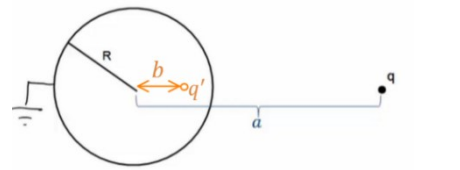
למצא צפיפות משטחית:

$\sigma = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$
 כאשר $\Delta E_{\perp}$ היא הקפיצה בשדה המאונך למשטח.
מטען נקודתי: אם יש שדה מהצורה $\vec{E} = \frac{\alpha}{r^2} \hat{r}$ (בקורדינטות 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 $\lambda = 2\pi\epsilon_0\alpha$.
אם נתון הפוטנציאל אז קודם נמצא את השדה באמצעות $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ (הנוסחאות של הגרדיאנט בפרק וקטורים)
אנרגיה הדרושה לבניית מערכת GOOL

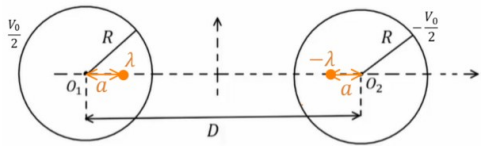
$U = \Sigma \frac{1}{2} \phi_i q_i = \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 dv$
 - הסכום הוא על כל המטענים כפול הפוטנציאל שהם נמצאים בו.
 - בנוסחה עם האינטגרל על השדה אפשר להשתמש רק אם אין מטענים נקודתיים או התפלגות קווית
 $\mu_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$ נקראת צפיפות האנרגיה החשמלית

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 דיפולים 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 κ - מקדם דיאלקטרי של החומר - תכונה של החומר בדרי"כ קבוע וידוע. $\epsilon_r > 1$ ו- $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני: $\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta \phi_{free}$
צפיפות המטען הכוללת: $\sigma_T = \epsilon_0 \Delta \phi_{\perp}$
צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת על שפת החומר הדיאלקטרי מהקישוב של הדיפולים:
 $\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$

$\vec{P} = \int \vec{p} dV$ וקטור הפולריזציה. צפיפות הדיפולים ליחידת נפח.
 $\vec{P} = N\vec{p}_1$ - מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.
N - מספר הדיפולים ביחידת נפח. יחידות של $\left[\frac{1}{m^3}\right]$.

מומנט הדיפול הכולל בחומר:

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: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$
חוק גאוס למטען החופשי:

$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_f \Leftrightarrow \oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{in f}$
בחומרים לינארים (בדרי"כ בשאלות): $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
חומר איזוטרופי: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$
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 של קבל לוחות: $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$
 A - שטח כל לוח. d - מרחק בין הלוחות, $d \ll \sqrt{A}$.

שדה בתוך קבל לוחות: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d}$
 σ - צפיפות המטען ליחידת שטח בכל לוח.
 V - המתח בין הלוחות. d - מרחק בין הלוחות.
קיבול של קבל גלילי: $C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}}$
 a ו-b - רדיוס הגליל הפנימי והחיצוני בהתאמה.
 L - אורך הגלילים, $a, b \ll L$.

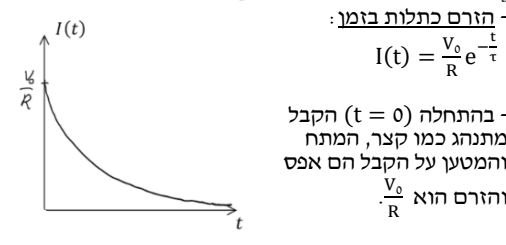
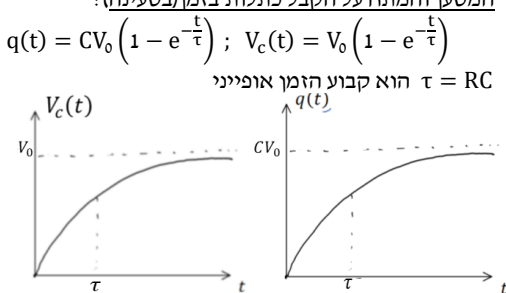
הקיבול של קבל המלא בחומר דיאלקטרי אחיד: $C' = \kappa C_0$ (או ϵ_r) - המקדם הדיאלקטרי של החומר.
 C_0 - הקיבול ללא החומר הדיאלקטרי.
חיבור קבלים בטור (קבלים עם מטען זהה):

$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
 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 (בדרי"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 (זוה 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:
משוואות המתחים:
 $V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$
 $I = \frac{dq}{dt}$
המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בטעינה):

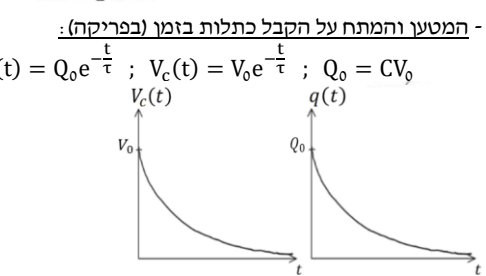


הזרם כתלות בזמן: $I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$
 בהתחלה ($t = 0$) הקבל מתנהג כמו קצר, המתח והמטען על הקבל הם אפס והזרם הוא $\frac{V_0}{R}$

לאחר זמן רב ($t > 5\tau$) הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמרחק קבועים והזרם מתאפס.
מעגל פריקה:
 משוואת המתחים:

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

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



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

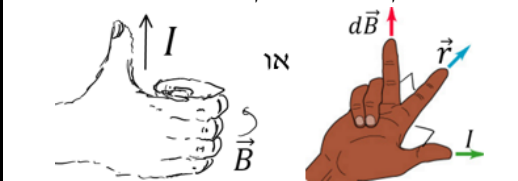
הכוח המגנטי - חוק לורנץ
חוק לורנץ - הכוח המגנטי:
 ניתן לחשב את הכוח בשתי דרכים.
 - דרך דטרמיננטה (ראו מכפלה וקטורית בוקטורים).
 - דרך גודל וכיוון בנפרד, הגודל הוא: $F_B = qvB \sin \alpha$
 כאשר α היא הזווית בין המהירות לשדה. וכיוון לפי כלל יד ימין:
 - שימו לב שאתם עם יד ימין!
 - כיוון הכוח הוא עבור מטען **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
חוק הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך dl עם זרם I
הנמצאות 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 לכוו הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

חוק ביו-סבר
חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

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

$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \frac{L}{((\frac{L}{2})^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$ (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 תילים 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
 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{in}$; $I_{in} = \int \vec{J} \cdot d\vec{s}$
 - כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיק של B לאורך מסלול סגור. בדרכי נבחר מקרים בהם B אחיד 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:
 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
חוק אמפר דיפרנציאלי:
 $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$
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.
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. נווה לשדה של תיל אינסופי ($\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$) ונקבל

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

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

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

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



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

שדות משתנים בזמן חרם העתקה
משוואות 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 פאראדיי ובמקום הכא"מ נחשב את האינטגרל כאשר בדרכי יש סימטריה גלילית והאינטגרל הופך ל $E 2\pi r$
אם נתון שדה חשמלי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה המגנטי אז: נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר
 רק שבמקום זרם יש $\epsilon_0 \frac{dE}{dt}$ (או במקום צפיפות זרם $\epsilon_0 \frac{dE}{dt}$) שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

מומנט דיפול מגנטי
דיפול מגנטי הוא לולאת זרם סגורה.
מומנט הדיפול המגנטי ($\vec{\mu}$ לפעמים מסומן ב- $\vec{m}$):

$$\vec{\mu} = IA \hat{n}$$
 - הזרם I - A - $\hat{n}$ - השטח הסגור על-ידי הלולאה.
 כיוון במואנך 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:
 $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

הפוטנציאל הוקטורי
חומרים פאראמגנטיים: חומרים המחזקים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים בעלי אטומים עם מס אלק' לא זוגי, לאטומים אלו דיפול מגנטי כתוצאה מסיבוב האלקטרון ה"נוסף".
חומרים דיאמגנטיים: חומרים המחזקים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים ללא מומנט דיפול טבעי של האטומים. נוכחות השדה החיצוני גורמת ליצירת מומנט דיפול הפוך לשדה הקיים (על ידי שינוי מהירות הסיבוב של האלקטרון) ובכך להחלשת השדה החיצוני.
חומרים פרומגנטיים: חומרים בהם הקיטוב המגנטי נשמר גם כאשר השדה החיצוני נפסק. הקיטוב תלוי "בהיסטוריה" של החומר.
אפקט פרומגנטי << דיאמגנטי >> פאראמגנטי.
וקטור המגנטיזציה $\vec{M}$: מומנט דיפול ליחידת נפח בחומר (יחידות של מומנט דיפול מגנטי חלקי נפח).

$$\vec{M} = N \vec{m}_1$$
 N הוא מספר הדיפולים ליחידת נפח בחומר.

$$\vec{m}_1$$
 הוא מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.
מומנט הדיפול הכולל של החומר:

$$\vec{m} = \int \vec{M} dV$$
צפיפות זרם קשורה: ניתן לחשב את השדה המגנטי שיוצרים הדיפולים באמצעות חישוב השדה של צפיפות זרם קשורה.

$$\vec{j}_b = \vec{\nabla} \times \vec{M}$$
 ; $\vec{k}_b = \vec{M} \times \hat{n}$
 $\hat{n}$ - 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 חופשיים לזוז בחומר ו- $\vec{j}_b$ נובעת מהמגנטיזציה.
חוקטור $\vec{H}$:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$
 - חוקטור $\vec{H}$ מקיים את חוק אמפר עבור הזרמים החופשיים:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{in, free}$$
 ; $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}_{free}$
דיברגנט של $\vec{H}$:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$$

חומרים לינארים:

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

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

GOOL **השראות הדדית**

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

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 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.

GOOL **משוואות מקסוול**

הצורה הדיפרנציאלית ; הצורה האינטגרלית:

1. חוק גאוס $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho$; $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\varepsilon_0} \int \rho dV$
2. $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$; $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
3. $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$; $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$
4. $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$; $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \varepsilon_0 \int \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$

מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי $\varepsilon = -\dot{\Phi}_B$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

כאשר χ_m היא הסוסטביליות 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. $\vec{H}_{2\parallel} - \vec{H}_{1\parallel} = \vec{k}_{free} \times \hat{n}_{1 \rightarrow 2}$
3. $B_{2\perp} = B_{1\perp}$
4. $\vec{B}_{2\parallel} - \vec{B}_{1\parallel} = \vec{k}_T \times \hat{n}_{1 \rightarrow 2}$

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, משוואות לפלאס או כל שיטה אחרת), כאשר "המטען" המגנטי הוא: $\rho_m = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$

- משוואות 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 **השראות**

השראות ברכיב: $L = \frac{\Phi_B}{I}$

Φ_B הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב.

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

חישוב השראות לפי הגדרה:

1. נניח שזרם 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):

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

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).

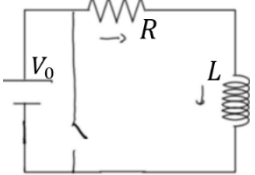
- ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).

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

הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

GOOL **מעגלי RL**

טעינה:



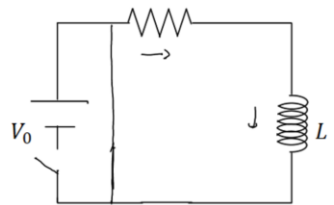
$V_0 - IR - L\dot{I} = 0$

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

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

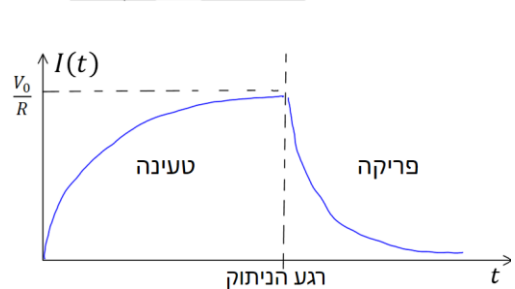
- סליל (או משרך) מתנהג בהתחלה כמו נתק ולאחר זמן רב כמו קצר.

פריקה:



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

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



חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:

בטור: $L_T = L_1 + L_2 + \dots$

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

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