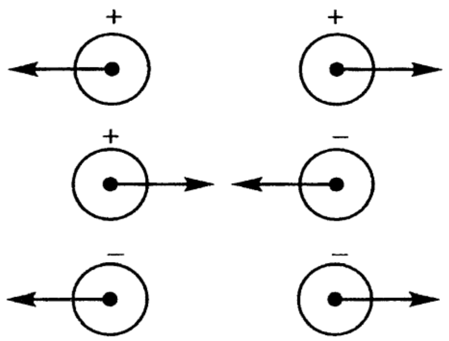
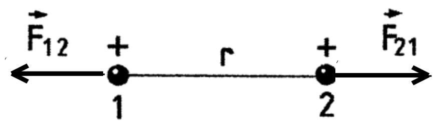
אלקטרודינמיקה

אלקטרודינמיקה חוקרת סוגים שונים של פעולות אלקטרו-מגנטיות, כגון : כוחות הפועלים בין גופים טעונים (נייחים ונעים יחסית למערכת ייחוס נייחת), מוליכים שבהם עוברים זרמי חשמל (המהווים מקרה פרטי של פעולות בין חלקיקים טעונים נעים), מגנטים בפעולות בינם לבין עצמם ובינם לבין מוליכים עם זרמי חשמל. כל סוגי הפעולות האלקטרו-מגנטיות מתרחשות באמצעות שדה אלקטרו-מגנטי.

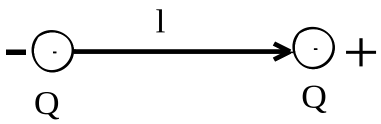
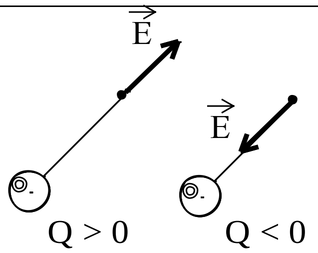
שדה חשמלי של מטענים נייחים (אלקטרוסטטיקה)

מטען חשמלי מטען הוא מקור השדה האלקטרו-מגנטי. קיימים שני סוגי מטענים חשמליים – חיוביים ושליליים. מטען חיובי הוא המטען מהסוג שנוצר על פני זכוכית לאחר שפשוף בעור. מטען שלילי הוא המטען מהסוג שנוצר על פני ענבר לאחר שפשוף בפרווה. גופים הטעונים במטענים זהים נדחים אחד מהשני ; גופים הטעונים מטענים נגדיים נמשכים.	
נושאי מטען	נושאי מטען בתווך יכולים להיות אלקטרונים חופשיים (למשל, במתכות), יונים – חלקי מולקולות או אטומים, בעלי מטען חיובי או שלילי (לדוגמה בתמיסות ובגזים), וחלקיקים אחרים.
חוק שימור מטען חשמלי הסכום האלגברי של כל המטענים במערכת מבודדת אינו תלוי בתנועתם של נושאי המטען וגם לא בבחירת מערכת ייחוס. לדוגמה, חימום של גוף הטעון מטען חשמלי אינו גורם לשינוי המטען ; גם תגובות כימיות וגרעיניות אינן משפיעות על המטען הכולל שבמערכת.	$\Sigma Q_i = \text{const}$

אלקטרוסטטיקה

מטען אלמנטרי גודלו של כל מטען הוא מכפלה של מטען האלקטרון (או פרוטון), שהוא המטען הקטן ביותר המצוי בטבע באופן חופשי. מטען האלקטרון הוא שלילי, ושל פרוטון – חיובי. **הערה** מטענים שהם כפולות של 1/3 ממטען אלקטרון קשורים בחלקיקים אלמנטריים הנקראים קווארקים, אולם אלה לא נמצאים בטבע באופן חופשי.	$e \approx 1.6 \cdot 10^{-19}\ C$
יחידת מטען	**קולון** (C) – הוא מטען העובר עם זרם חשמלי של 1A (אמפר אחד) דרך חתך המוליך בפרק זמן של שנייה אחת.
מטען נקודתי	זהו גוף טעון בעל מידות קטנות יחסית למרחק לנקודה שבה נחקרת השפעת המטען של הגוף.
חוק קולון כוח הפועל בין שני מטענים נקודתיים נייחים q_1 ו- q_2 (במערכת אינרציאלית כלשהי) הוא: כאשר r הוא המרחק בין המטענים, וגודל הקבוע k הוא: הכוח החשמלי מכוון לאורך הקו המחבר את המטענים, וכיוונו תלוי בסימן המכפלה q_1q_2 : סימן חיובי מסמן משיכה וסימן שלילי – דחייה. צורה אחרת של הקבוע בחוק קולון – באמצעות הקבוע הדיאלקטרי היחסי של התווך ε ושל הריק ε_0 :	 $F_{12} = k\frac{q_1q_2}{r^2}$ $k = 9 \cdot 10^9\ \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ $F_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2}$ $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}\ \frac{F}{m} = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}\ \frac{F}{m}$

אלקטרוסטטיקה (המשך)

דיפול חשמלי – שני מטענים שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם. תכונות הדיפול מוגדרות על ידי המומנט החשמלי: Q – גודל המטען $\vec{l}$ – ווקטור שגודלו שווה למרחק בין המטענים, וכיוונו בקו המחבר את המטענים, מהמטען השלילי אל המטען החיובי.	 $\vec{p}_1 = Q\cdot\vec{l}$
עוצמת השדה החשמלי – כוח הפועל על מטען נקודתי חיובי שגודלו קולון אחד. הגדרה אחרת: עוצמת השדה הוא ערך השווה ליחס של כוח חשמלי לגודל מטען: שדה הוא ערך ווקטורי, וכיוונו כמו כיוון הכוח הפועל על מטען חיובי. כאשר ידועה עוצמת השדה בנקודת מרחב כלשהי, אפשר לחשב את הכוח הפועל על מטען q הנמצא באותה נקודה:	 $\vec{E} = \dfrac{\vec{F}}{q}$ $\vec{F} = \vec{E}\cdot q$
עקרון הסופרפוזיציה אם מספר מטענים יוצרים שדות חשמליים $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ וכו׳ בנקודת מרחב כלשהי, אזי השדה השקול בנקודה זאת שווה לסכום הווקטורי של שדות כל המטענים:	$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots$
שדה של מטען נקודתי q_0 בנקודה הנמצאת במרחק r ממנו: כיוון השדה – בכיוון הקו המחבר את המטען עם הנקודה.	$E = k\dfrac{q_0}{r^2}$

אלקטרוסטטיקה (המשך)

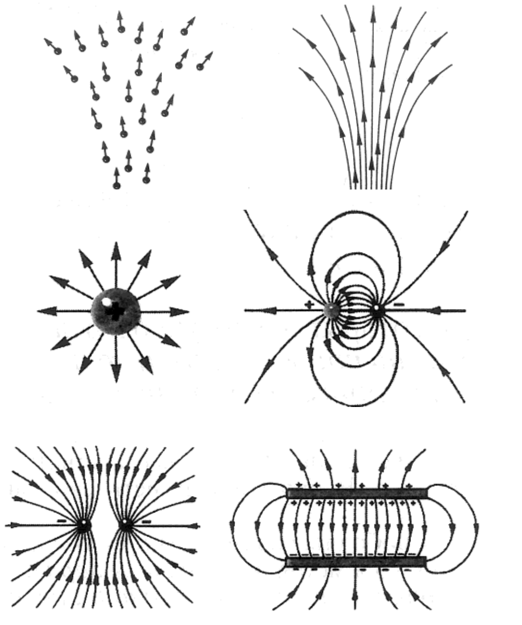
קו שדה אלקטרוסטטי –

קו דמיוני אשר בכל נקודה שבו כיוון וקטור השדה משיק לו.

קווי השדה אינם סגורים : הם מתחילים ונגמרים על מטענים.

קווי שדה אינם חוצים זה את זה.

צפיפות קווי שדה מסמנת את עוצמת השדה ; צפיפות אחידה (קווים מקבילים עם מרווחים שווים) מסמנת שדה אחיד (שבו עוצמת השדה שווה בכל נקודות המרחב), צפיפות גדולה יותר (ליד מטענים) מסמנת עוצמה גבוהה יותר.



שדה חשמלי של כדור מוליך טעון

המטען q מפוזר באופן אחיד על מעטפת חיצונית של הכדור ;

בתוך הכדור $(r < R)$ השדה שווה לאפס,

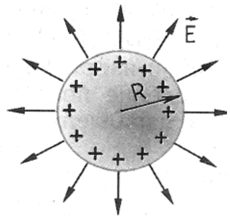
מחוץ לכדור $(r \geqslant R)$ צורת קווי השדה ועוצמתו הן כמו של מטען נקודתי q הנמצא במרכז הכדור :

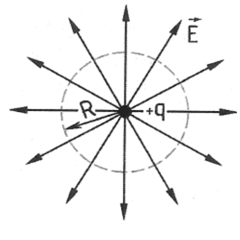
$$E = k\frac{q}{r^2}$$

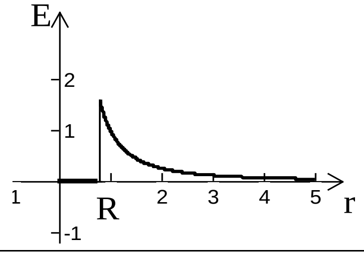
שדה חשמלי בתוך מוליך

כאשר המטענים החופשיים בתוך גוף מוליך נמצאים בשיווי משקל (אין תנועה מכוונת של המטענים), השדה החשמלי שווה לאפס.

קווי השדה שמחוץ לגוף ניצבים לפני הגוף בקרבת המשטח.







אלקטרוסטטיקה (המשך)

פוטנציאל של שדה אלקטרוסטטי - הערך השווה **לעבודת כוחות השדה** הדרושה כדי להעביר מטען נקודתי חיובי של 1 קולון מנקודה נתונה לאינסוף, או הערך השווה **לעבודת כוחות חיצוניים** הדרושה כדי להעביר את המטען מאינסוף לנקודה הנתונה: הפוטנציאל הוא גודל יחסי, ומותר לקבוע את רמת האפס שלו בכל נקודה. בפיזיקה, נקודת האפס של הפוטנציאל נקבעת בדרך כלל באינסוף. הפוטנציאל הוא אנרגיה פוטנציאלית של פעולה הדדית בין השדה החשמלי לבין מטען יחיד חיובי.	$\varphi = \frac{A_\varphi}{Q}$ A_φ – עבודת כוחות השדה Q – גודל המטען
הפרש פוטנציאלים בין שתי נקודות - עבודת כוחות השדה הדרושה כדי להעביר מטען נקודתי חיובי של 1 קולון מנקודה אחת לשנייה:	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q}$ A_{12} – עבודת כוחות השדה Q – גודל המטען
צפיפות סגולית של אנרגיית השדה החשמלי שדה חשמלי (כמקרה פרטי של שדה אלקטרו-מגנטי) נושא אנרגיה גם במקומות במרחב שבהם אין מטענים. אם האנרגיה הכלואה בנפח ΔV של המרחב שווה ל- ΔW, אזי הצפיפות הסגולית שווה ל- w:	$\lim_{\Delta V \to 0}\left(\frac{\Delta W}{\Delta V}\right) = \frac{dW}{dV} = w$ $w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$ E – עוצמת השדה
משטחים שווי פוטנציאל משטח שלכל הנקודות שבו פוטנציאל שווה נקרא משטח שווה פוטנציאל.	העבודה הדרושה להעברת מטענים מנקודה אחת לשנייה על פני שטחו אינה תלויה במקומן של הנקודות ובמסלול ביניהן, ושווה לאפס.

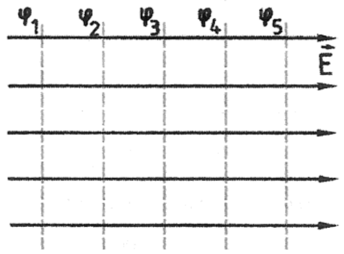
אלקטרוסטטיקה (המשך)

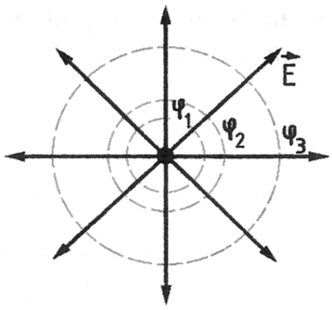
משטחים שווי פוטנציאל (המשך)

קווי שדה ניצבים למשטחים שווי פוטנציאל בכל נקודות המרחב.

משטחים שווי פוטנציאל של שדה אחיד הם מישורים, ושל שדה של מטען בודד – כדורים בעלי מרכז משותף.

משטחים שווי פוטנציאל מאפיינים את פילוג השדה במרחב; ווקטור השדה החשמלי ניצב למשטח שווה פוטנציאל, ומכוון בכיוון שבו הפוטנציאל הולך וקטן.





יחידות של פוטנציאל ועוצמת השדה

הפרש פוטנציאלים בין שתי נקודות שווה

ל- 1 **וולט**, אם העבודה הדרושה להעברת מטען של 1 קולון בין שתי הנקודות שווה ל- 1 ג׳אול:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$$

$$[U] = \frac{[A]}{[q]} = \frac{J}{C} = V$$

עוצמת השדה שווה ל- 1 כאשר הפרש פוטנציאלים בין שתי נקודות המרחק ביניהן 1 מטר, שווה לוולט אחד:

$$E = \frac{U}{\Delta d}$$

$$[E] = \frac{[U]}{[d]} = \frac{V}{m}$$

ליחידה זו אין שם מיוחד.

הקשר בין יחידת עוצמת השדה (**וולט למטר**) לבין יחידות אחרות:

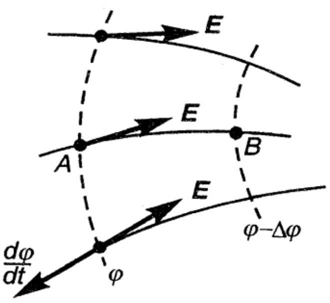
$$1\frac{V}{m} = 1\frac{J}{C}\cdot\frac{1}{m} = 1\frac{N\cdot m}{C}\cdot\frac{1}{m} = 1\frac{N}{C}$$

עוצמת השדה וגרדיאנט של פוטנציאל

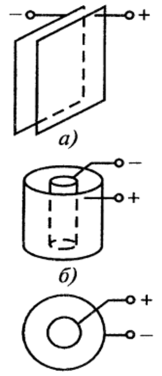
בשדה שאינו אחיד, הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות קרובות A ו- B שווה ל- $\Delta\varphi$

ועוצמת השדה E שווה לגרדיאנט של φ :

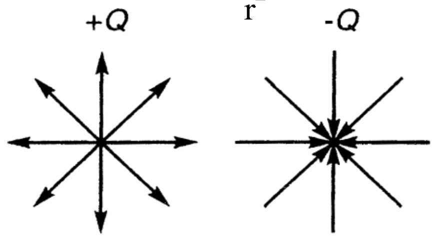
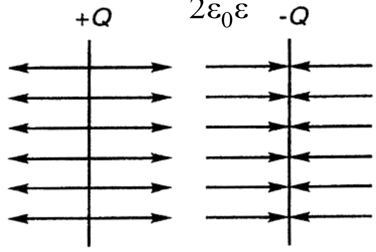
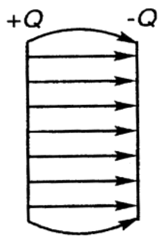
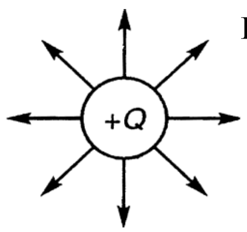
$$\vec{E} = -\lim_{\Delta l \to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = -\frac{d\varphi}{dl} = -\text{grad}\,\varphi$$



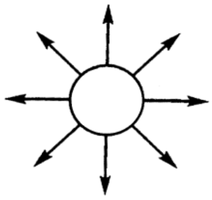
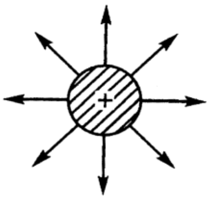
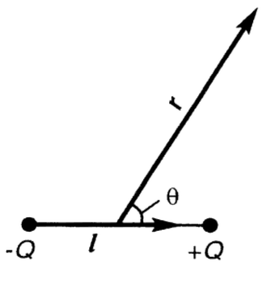
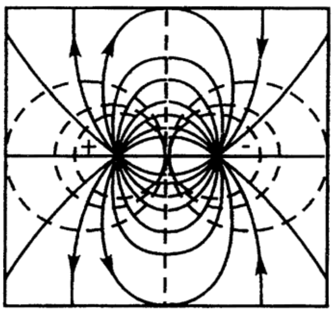
קבל וקיבול

קבל שני מוליכים בעלי פוטנציאלים שונים, המופרדים בשכבה דקה של מבודד מהווים **קבל**. שדה חשמלי של קבל כלוא ברובו בין המוליכים. מטעני המוליכים בקבל שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם. **קיבול** הקבל הוא ערך השווה ליחס המטען של אחד המוליכים להפרש הפוטנציאלים ביניהם: V – הפרש פוטנציאלים בין לוחות הקבל, הנקרא גם **המתח** בין הלוחות. לקבל צורות שונות לפי צורות המוליכים: קבל לוחות, קבל כדורי, קבל גלילי.	 $C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{V}$ $V = \varphi_1 - \varphi_2$
יחידות הקיבול קיבול של שני מוליכים שווה ל- 1 **פאראד**, אם הטעינה שלהם במטענים של 1 קולון גורמת להפרש פוטנציאלים של 1 וולט: פאראד היא יחידה גדולה מאוד. מקובל להשתמש ביחידות הנגזרות ממנה:	$1\ F = 1\frac{C}{V}$ מיקרופראד - $\mu F = 10^{-6}\ F$ נאנופראד - $nF = 10^{-9}\ F$ פיקופראד - $pF = 10^{-12} F$
אנרגיה של קבל טעון אנרגיית השדה הכלואה בין מוליכי הקבל שווה לעבודה הדרושה כדי להפריד את שני המוליכים הטעונים מטענים נגדיים (ולכן נמשכים אחד לשני) למרחק אינסופי. סוג האנרגיה – אנרגיה פוטנציאלית. צורות אחרות לנוסחת האנרגיה של קבל:	$W_p = \frac{qU}{2}$ U – הפרש פוטנציאלים q – מטען $W_p = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$

עוצמת השדה – סיכום

גוף טעון	נקודה במרחב	עוצמה, קווי שדה
מטען נקודתי Q	במרחק r מהנקודה	$E = k\frac{Q}{r^2}$ 
מישור טעון, מטען של יחידת שטח – σ	מכל צד של המישור	$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$ 
שני לוחות מקבילים הטעונים במטענים +Q ו- -Q בהתאם. מטען של יחידת שטח – σ	בין הלוחות מחוץ ללוחות	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$ $E = 0$ 
כדור מוליך בעל רדיוס R ומטען Q	מחוץ לכדור במרחק r מהמרכז ($r \geqslant R$) בתוך הכדור ($r < R$)	$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$ $E = 0$ 
מוליך ; מטען של יחידת שטח – σ	קרוב לפני השטח	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$

עוצמת השדה – סיכום (המשך)

גוף טעון	נקודה במרחב	עוצמה, קווי שדה
גליל חלול ארוך טעון באופן אחיד. τ – מטען של יחידת אורך של הגליל: $\tau = \dfrac{Q}{l}$ Q – מטען הגליל שאורכו – l.	מחוץ לגליל, במרחק r מהציר: בתוך הגליל:	$E = \dfrac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon r}$ $E = 0$ 
מוט ארוך טעון באופן אחיד. R – רדיוס החתך. τ – מטען של יחידת אורך של המוט: $\tau = \dfrac{Q}{l}$ Q – מטען הגליל שאורכו – l.	מחוץ למוט, במרחק r מהציר ($r \geqslant R$): בתוך הגליל ($r < R$):	$E = \dfrac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon r}$ $E = \dfrac{\tau r}{2\pi\varepsilon_0 R^2}$ 
דיפול חשמלי בעל מומנט $p = Ql$ θ – זווית בין הווקטורים p ו- r	במרחק $l << r$ 	$E = \dfrac{\sqrt{1 + 3\cos^2\theta}}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^3}\, p$ 

קיבול קבלים ומוליכים – סיכום

<table>
<tr><th>קבלים או מוליכים</th><th>קיבול</th></tr>
<tr><td>

קבל לוחות

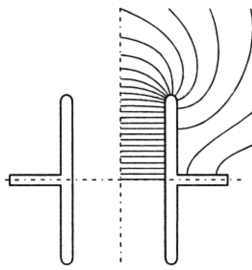
S – שטח אחד הלוחות

d – מרחק בין הלוחות

מפת קווי השדה (בקרבת החצי העליון של לוח ימין) :

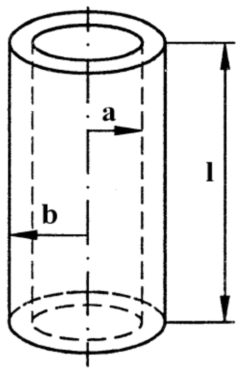
</td><td>

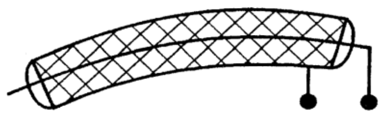
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$



</td></tr>
<tr><td>

קבל גלילי ; כבל קואקסיאלי





</td><td>

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln (b/a)}$$

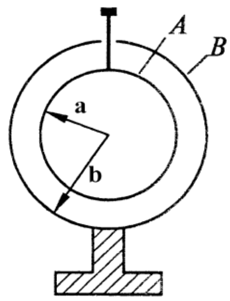
b – רדיוס המעטפת החיצונית

a – רדיוס המעטפת הפנימית

l – אורך (אורך) הגליל

</td></tr>
<tr><td>

קבל כדורי



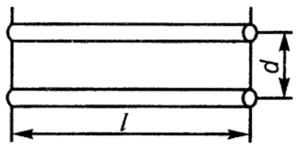
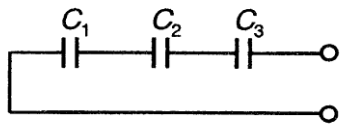
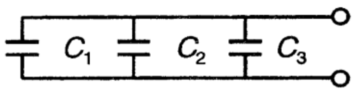
</td><td>

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)}$$

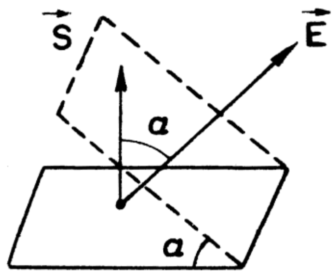
a, b – רדיוסי הקליפה הפנימית והחיצונית בהתאם

</td></tr>
</table>

קיבול קבלים ומוליכים – סיכום (המשך)

קבלים או מוליכים	קיבול
תיל דו-חוטי 	$C = \dfrac{\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln(d/a)}$ l – אורך התיל d – מרחק בין הצירים של המוליכים המקבילים a – רדיוס חתך של כל חוט
חיבור קבלים בטור 	$\dfrac{1}{C_\perp} = \dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \ldots + \dfrac{1}{C_n}$
חיבור קבלים במקביל 	$C_{\parallel} = C_1 + C_2 + \ldots + C_n$
תיל מוליך המקביל לפני כדור הארץ: h – גובה מעל הקרקע R – רדיוס חתך של התיל ($R << h$) l – אורך התיל	$C = \dfrac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln\left(\dfrac{2h}{R}\right)}$

שטף חשמלי

שטף חשמלי φ דרך שטח נתון S הוא מכפלה סקלרית של עוצמת השדה $\vec{E}$ ווקטור השטח $\vec{S}$ (כיוון $\vec{S}$ ניצב לפני השטח וגודלו שווה לגודל השטח). שטף חשמלי דרך משטח לא מישורי כלשהו שווה לאינטגרל משטחי של המכפלה הסקלרית: $\Phi = \int_S \vec{E} \cdot ds$	 $\varphi = \vec{E} \cdot \vec{S} = E \cdot S \cdot \cos\alpha$

שטף חשמלי ומשפט גאוס

משפט גאוס: שטף שדה חשמלי $\vec{E}$ דרך כל משטח סגור S הוא ביחס ישר לסכום אלגברי של כל המטענים בתוך המשטח.	$\Phi = \int \vec{E}\, dS = 4\pi k \cdot \Sigma q_i = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \Sigma q_i$

זרם חשמלי קבוע

זרם חשמלי	תנועה **מסודרת** של מטענים. **הערה** בתוך מוליך, בטמפרטורה גבוהה מאפס מוחלט, המטענים תמיד נמצאים בתנועה, אולם תנועה זאת אינה מסודרת.
עוצמת הזרם החשמלי עוצמת זרם קבוע: עוצמת זרם רגעית:	הגודל השווה למטען שעובר דרך חתך המוליך בשנייה אחת. $I = \frac{Q}{t}$ Q – מטען t – זמן $I = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$ ΔQמטען Δt- זמן
צפיפות הזרם (שטף) הערך הווקטורי שגודלו שווה ליחס של עוצמת הזרם לשטח החתך הניצב לכיוון התנועה המסודרת של המטענים. כיוונו של הווקטור $\vec{j}$ בכיוון ווקטור מהירות התנועה המסודרת של מטענים חיוביים.	$j = \frac{I}{S}$

זרם חשמלי

צפיפות הזרם (המשך)

צפיפות הזרם שווה:

$$\vec{j} = nq\vec{v}$$

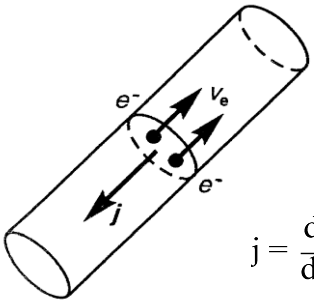
q – מטען אחד הנשאים

n – ריכוז (מספר הנשאים ביחידת נפח)

– מהירות ממוצעת של תנועה מסודרת

כאשר נשאי הזרם הם מטענים שליליים (לדוגמה, אלקטרונים במתכות), לווקטור צפיפות הזרם $\vec{j}$ ולווקטור המהירות $\vec{v}$ כיוונים מנוגדים.

באופן כללי, אפילו במקרה של זרם קבוע, צפיפות הזרם יכולה להיות שונה בנקודות שונות של חתך המוליך.



גודל צפיפות הזרם באופן כללי הוא:

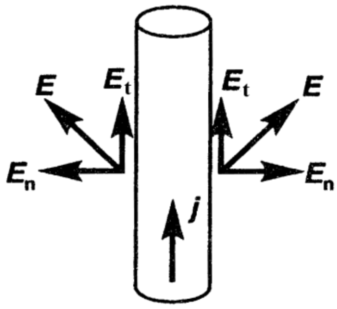
$$j = \frac{dI}{dS}$$

שדה חשמלי של מוליך עם זרם

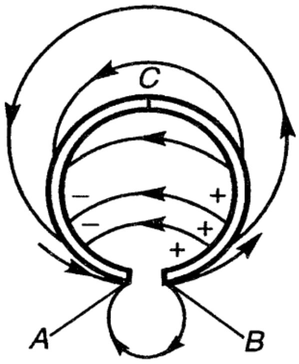
על פני המוליך שבו עובר זרם קבוע נוצרים מטענים. צפיפות של מטעני שטח כאלה שונה במקומות שונים על פני השטח.

מחוץ למוליך, בקרבת המשטח החיצוני שלו, לווקטור השדה שני רכיבים: המשיק לשטח E_t והניצב לו E_n. בתוך המוליך, הרכיב הניצב שווה לאפס: $E_n = 0$

והרכיב המשיק שווה לערכו מחוץ למוליך.



השרטוט משמאל מציג את מפת קווי שדה של מוליך טבעתי שבו עובר זרם קבוע:



בנקודה A נמצא הקוטב השלילי של מקור הזרם, בנקודה B – הקוטב החיובי.

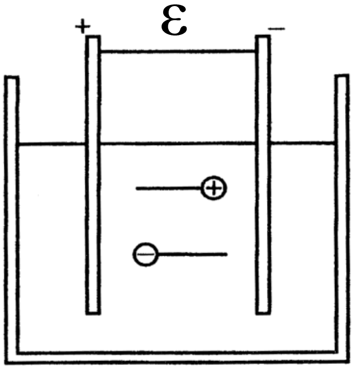
הצפיפות השטחית של מטעני שטח גדולה ביותר ליד הקטבים, והיא מתאפסת בנקודה C (אמצע המעגל).

זרם חשמלי (המשך)

כוחות זרים –

הכוחות שמעבירים את המטענים לקטבים המתאימים בתוך מקור זרם. מטעני יתר המצטברים על הקטבים של מקור הזרם גורמים לפילוג מטענים על פני המוליך המחובר למקור.

טבעם של הכוחות הזרים יכול להיות מסוגים שונים: שדה מערבולת במחוללי זרם, משיכה בין-אטומית על גבול מגע בין חומרים שונים (בתא גלווני ובמצבר) וכד'.



כוח אלקטרו-מניע (כא"מ) –

העבודה של כוחות זרים בהעברת מטען חיובי של 1 קולון.

הנוסחה לכא"מ:

$$\varepsilon = \frac{A_e}{Q}$$

A_e – עבודת כוחות זרים בהעברת מטען Q.

כא"מ שווה להפרש פוטנציאלים בין הדקי המקור כאשר המעגל פתוח.

חוק אום

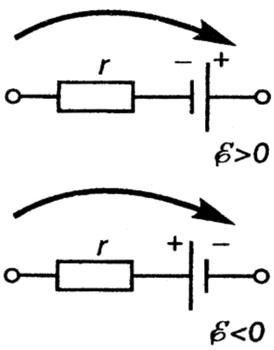
עוצמת הזרם בקטע המעגל שלא כולל מקור זרם היא ביחס ישר להפרש פוטנציאלים בקצותיו:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r}$$

בקטע המעגל שבו יש מקור זרם:

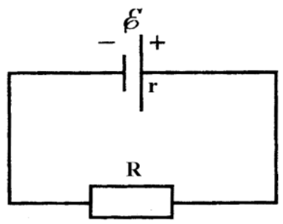
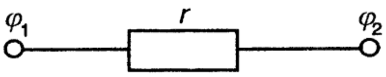
$$I_\varepsilon = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{r}$$

r – התנגדות של המוליך (הנגד)



ε – כא"מ של מקור הזרם

זרם חשמלי (המשך)

בחישובים, קובעים את סימן הכא"מ כחיובי כאשר בחלק של המעגל שבו נמצא מקור זרם, עוברים מקוטב שלילי לקוטב חיובי **בתוך המקור**. במעגל סגור $\varphi_1 = \varphi_2$ ולפי חוק אום: $I = \frac{\varepsilon}{R_e} = \frac{\varepsilon}{R + r}$ כאשר R_e היא התנגדות של כל המעגל, כולל את ההתנגדות הפנימית של מקור הזרם:	 $R_e = R + r$
חוק אום בצורה הדיפרנציאלית $\vec{j}$ – צפיפות הזרם γ – מוליכות סגולית $\vec{E}$ – עוצמת השדה $\vec{E}_{ext}$ – עוצמת השדה של כוחות זרים	$\vec{j} = \gamma\left(\vec{E} + \vec{E}_{ext}\right)$
המתח – עבודת כוחות חשמליים וכוחות זרים בהעברת מטען של 1 קולון בקטע מעגל נתון:	$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon = I \cdot r$
מפל מתח – מכפלת $I \cdot r$ נקראת מפל מתח. כאשר קטע המעגל אינו כולל מקורות זרם, מפל המתח שווה להפרש הפוטנציאלים בין קצותיו של הקטע:	$U = \varphi_1 - \varphi_2$
התנגדות חשמלית של מוליך – הערך שגודלו שווה להפרש הפוטנציאלים בין קצוות המוליך כאשר עובר בו זרם של 1 אמפר.	

זרם חשמלי (המשך)

התנגדות חשמלית של מוליך (המשך) $U = \varphi_1 - \varphi_2$ – הפרש פוטנציאלים I – זרם התנגדות של מוליך בעל חתך קבוע: כאשר ρ – התנגדות סגולית, השווה להתנגדות מוליך בצורת קובייה עם אורך צלע של 1 מטר l – אורך המוליך S – שטח החתך	$r = \frac{U}{I}$ $r = \rho\frac{l}{S}$

יחידות

התנגדות	**1 אום**. זוהי התנגדות של מוליך שבו עובר זרם של 1 אמפר כאשר הפרש פוטנציאלים בין קצותיו שווה ל- 1 וולט: $1\ \Omega = 1\frac{V}{a}$
התנגדות סגולית היחידה: 1 אום-מטר.	$\rho = \frac{R \cdot S}{l}$ $[\rho] = \frac{[R]\cdot[S]}{[l]} = \frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m$

התנגדות סגולית של חומרים שונים

חומר	ρ, $\Omega \cdot m$
זכוכית	$10^9 - 10^{12}$
גומי	$4 \cdot 10^{11}$
אלומיניום	$2.8 \cdot 10^{-8}$
נחושת	$1.75 \cdot 10^{-8}$
כסף	$1.59 \cdot 10^{-8}$

זרם חשמלי (המשך)

מוליכות סגולית –

הערך ההפוך להתנגדות סגולית :

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

תלות ההתנגדות בטמפרטורה

בקירוב, התנגדות סגולית נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה :

$$\rho_T = \rho_0\,(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

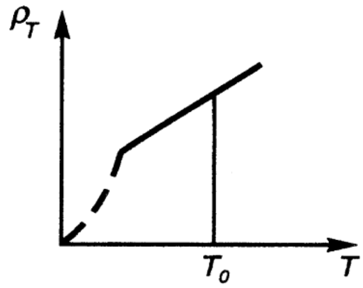
כאשר

ρ_T – התנגדות בטמפרטורה T

ρ_0 – התנגדות בטמפרטורה $T_0 = 0°\,C$

$$\Delta T = T - T_0$$

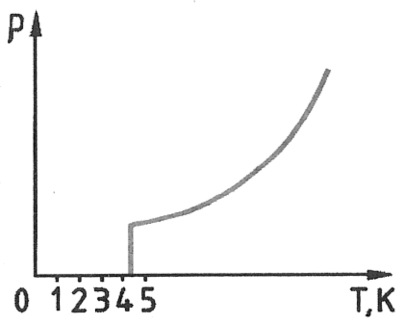
α – מקדם השווה למהירות השינוי :



$$\alpha = \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}$$

על-מוליכות

התנגדותם של חומרים מסוימים בטמפרטורות הקרובות לאפס המוחלט ($-273°C$) יורדת לאפס, ואינה משתנה בתחום טמפרטורות מסוים.
ב- 1986 התגלתה על-מוליכות בתרכובות של באריום ולאנטאן גם בטמפרטורות גבוהות יחסית (כ- $100°K$).

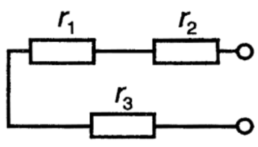


חיבור נגדים

חיבור נגדים בטור –

המעגל אינו מתפצל, וכל הנגדים מחוברים אחד אחרי השני בטור.

התנגדות שקולה של n נגדים המחוברים בטור :



$$R = \Sigma R_i, \qquad i = 1, 2, ..., n$$

חיבור נגדים (המשך)

חיבור נגדים בטור (המשך)

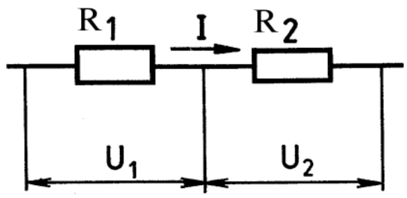
במקרה של שני נגדים המחוברים בטור:

$$I_1 = I_2 = I$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

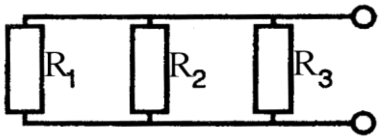
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$



חיבור נגדים במקביל

את ההתנגדות השקולה של n נגדים המחוברים במקביל אפשר לחשב לפי הנוסחה:

$$\frac{1}{R} = \Sigma \frac{1}{R_i}, \quad i = 1, 2, ..., n$$



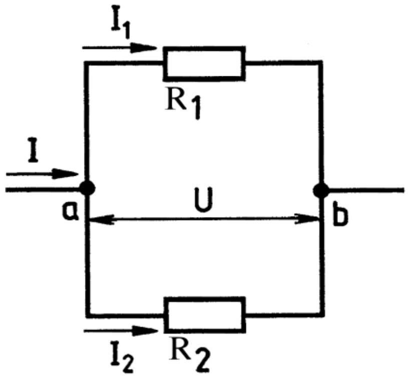
במקרה של שני נגדים המחוברים במקביל:

$$I = I_1 + I_2$$

$$U_1 = U_2 = U$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



עבודה והספק של זרם קבוע

זרם חשמלי נושא אנרגיה, שאפשר להפוך אותה לכל צורה אחרת ולנצל.

עבודת השדה החשמלי בהעברת מטענים נושאי זרם במשך הזמן Δt שווה:

$$A = \Delta q \cdot U = I \cdot U \cdot \Delta t$$

צורות אחרות של הנוסחה:

$$A = I^2 R \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t$$

עבודה והספק של זרם קבוע (המשך)

חוק ג׳אול

כמות החום שאותו פולט נגד שבו עובר זרם חשמלי בפרק זמן Δt היא:

$$Q = I^2 R \cdot \Delta t$$

הספק הזרם

הספק הזרם שווה ליחס העבודה שאותה ביצע זרם בפרק זמן Δt לפרק זמן זה:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = I \cdot U$$

צורות אחרות של הספק:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

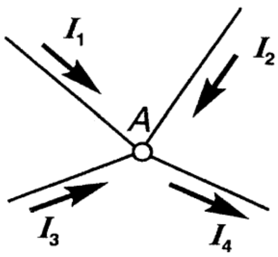
יחידות של הספק: ואט (W)

מעגלי זרם קבוע - חוקי קירכהוף

בחוקי קירכהוף נעזרים בחישובי זרמים ומתחים במעגלי זרם מפוצלים. הנקודה שבה נפגשים לא פחות משלושה מוליכים נקראת **צומת**.

החוק הראשון של קירכהוף

הסכום האלגברי של כל זרמים הנפגשים בצומת שווה לאפס (הזרמים הנכנסים לצומת נחשבים חיוביים ואלה היוצאים מהצומת – שליליים).

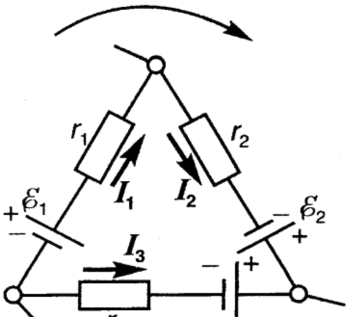


$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

החוק השני של קירכהוף

בכל מעגל סגור הנבחר בתוך מעגל מפוצל, הסכום האלגברי של מכפלות הזרם בהתנגדות המוליך שבו הוא עובר, שווה לסכום כל ערכי הכא״מ במעגל זה.

בחישוב הביטוי, הזרם נחשב חיובי אם כיוונו הוא בכיוון המעבר במעגל (הנבחר באופן שרירותי).

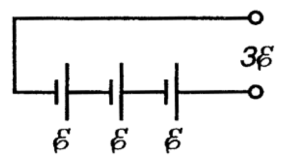


$$I_1 r_1 + I_2 r_2 - I_3 r_3 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

מעגלי זרם קבוע (המשך)

חיבור מקורות זרם

כאשר מחברים n מקורות זרם זהים ב**טור**, מתקיים השוויון הבא:



$$I\left(nr_i + r\right) = n\,\varepsilon_i$$

כאשר:

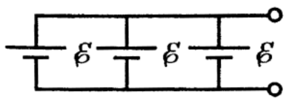
n – מספר המקורות

r_i – התנגדות פנימית של כל מקור

ε_i – כא״מ של כל מקור

r – ההתנגדות השקולה של כל הנגדים במעגל

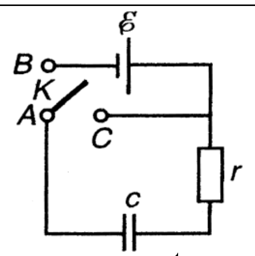
כאשר מחברים אותם המקורות **במקביל**, מתקיים:



$$I\left(r + \frac{r_i}{n}\right) = \varepsilon_i$$

טעינה ופריקת קבל

זרם העובר דרך קבל במשך זמן טעינה (מצב B של המפסק) הולך וקטן עם הזמן לפי הנוסחה:



$$I = I_0\, e^{-\frac{t}{rC}}$$

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{r}$$

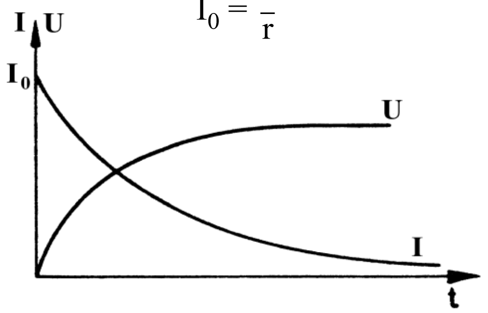
כאשר

I_0 – עוצמת הזרם ברגע התחלת הטעינה

C – קיבול של הקבל

r – התנגדות הנגד

ε – כא״מ של מקור הזרם



כאשר מעבירים את המפסק K למצב C, מתחילה הפריקה, והמתח על הקבל הולך וקטן על פי הנוסחה:

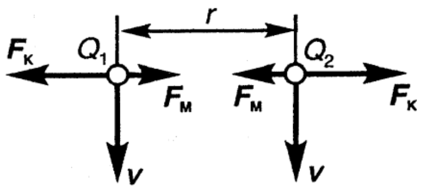
$$U = U_0\, e^{-\frac{t}{rC}}$$

U_0 – מתח על הקבל ברגע $t = 0$

השדה המגנטי

כוחות מגנטיים

הכוחות הפועלים בין שני מטעינים שנמצאים בתנועה, שונים מכוחות שהיו פועלים בין אותם המטענים אילו הם היו נייחים במערכת ייחוס אינרציאלית.
כאשר שני מטענים שליליים Q_1 ו- Q_2 נעים במקביל אחד לשני במהירויות שוות v , אזי הכוח הפועל ביניהם שווה:



$$F_v = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\left(1 - \beta^2\right) = F_Q\left(1 - \beta^2\right)$$

כאשר

$$\beta = \frac{v}{c}$$

c – מהירות אור בריק

F_Q – כוח קולון.

הכוח F_v קטן מכוח קולון בערך של:

$$F_m = F_Q\,\beta^2$$

הכוח הנוסף F_m במקרה פרטי זה נקרא **הכוח המגנטי**.

כוחות מגנטיים תלויים במהירויות של מטענים, שיכולות להיות שונות הן בגודלן והן בכיוונן. אם מהירות אחד המטענים שווה לאפס, אזי גם הכוחות המגנטיים שווים לאפס במערכת ייחוס זאת:

כוחות מגנטיים תלויים במערכת ייחוס.

באופן כללי, הכוח F_{12} הפועל על המטען Q_2, הנע בשדה חשמלי של מטען נע אחר Q_1, אינו שווה בגודלו לכוח F_{21} הפועל על המטען Q_1 הנמצא בתנועה בשדה חשמלי של המטען הראשון Q_2, וכיווני הכוחות אינם בכיוון הקו המחבר את המטענים!

השדה המגנטי

זהו שדה של כוחות מגנטיים, שמקורם – מטענים חשמליים הנמצאים בתנועה.

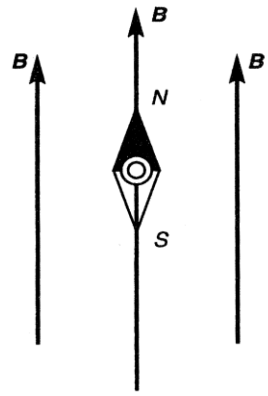
השדה המגנטי (המשך)

השדה המגנטי

באמצעות השדה המגנטי פועלים בינם לבין עצמם מוליכים נושאי זרם, זרמים ומגנטים קבועים וגם מגנטים בינם לבין עצמם.

אחד הערכים המאפיינים את השדה המגנטי הוא – עוצמת השדה (או השדה).

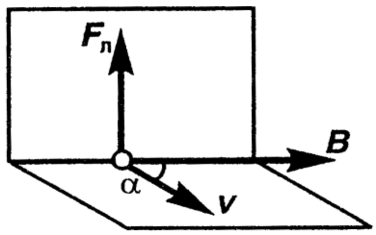
את כיוונו של ווקטור השדה $\vec{B}$ ניתן לגלות בעזרת מחט מגנטית: אם המחט נמצאת בשדה מגנטי, אזי הקוטב הצפוני של המחט מצביע בכיוון הווקטור $\vec{B}$.



כוח לורנץ

זהו כוח הפועל על מטען שנמצא בתנועה בשדה מגנטי (שמקורו – מטענים נעים אחרים).

כוח לורנץ הוא ווקטור השווה למכפלה ווקטורית של שני הווקטורים – מהירות המטען והשדה המגנטי:



$$\vec{F}_L = Q\,[\vec{v}\,\vec{B}] = Q\,\vec{v} \times \vec{B}$$

גודלו של הווקטור $\vec{F}_L$:

$$F_L = Q\cdot v\cdot B\cdot \sin\alpha$$

כאשר:

Q – מטען

v – מהירות המטען

B – שדה

α – זווית בין הווקטורים $\vec{v}$ ו- $\vec{B}$.

הכוח הוא מקסימלי כאשר המהירות ניצבת לשדה:

$$F_{L\,max} = Q\cdot v\cdot B \quad \Longleftarrow \quad \vec{v} \perp \vec{B}$$

כאשר המהירות מקבילה לשדה, כוח לורנץ מתאפס:

$$F_L = 0 \quad \Longleftarrow \quad \vec{v} \parallel \vec{B}$$

השדה המגנטי (המשך)

חוק אמפר

כוח הפועל על תיל מוליך נושא זרם שווה לסכום ווקטורי של כוחות לורנץ הפועלים על כל המטענים הנעים בתוך המוליך (דהיינו, אלקטרונים);

כוח זה נקרא **כוח אמפר**.

כוח אמפר הפועל על קטע קטן Δl של התיל שווה:

הערך הווקטורי $I\cdot\Delta\vec{l}$ נקרא זרם אלמנטרי.

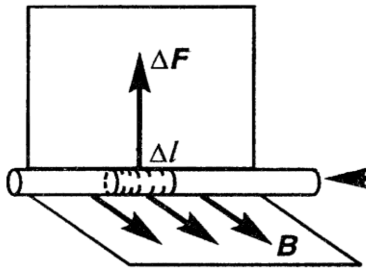
כדי לגלות את כיוונו של כוח אמפר משתמשים ב**כלל היד השמאל**:

מניחים את כף יד שמאל כך שקווי השדה ייכנסו בה, והאצבעות יהיו בכיוון הזרם; האגודל יצביע בכיוון הכוח.

הערה

אם כיוון השדה אינו בזווית ישרה לכיוון הזרם, מפרקים את ווקטור השדה לשני הרכיבים, המקביל והניצב לשדה, ומשתמשים ברכיב הניצב.

כוח אמפר הוא מקסימלי כאשר כיוון הזרם ניצב לכיוון השדה $\Delta\vec{l} \perp \vec{B}$:



$$\Delta\vec{F} = I\cdot \Delta\vec{l} \times \vec{B}, \quad \Delta F = I\cdot\Delta l\cdot B\cdot\sin\alpha$$

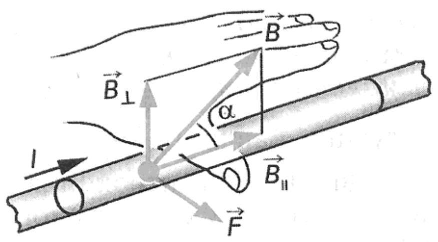
כאשר:

I – זרם

B– שדה מגנטי

α – זווית בין הווקטורים $\Delta\vec{l} \cdot \vec{B}$

כיוונו של הווקטור $\Delta\vec{l}$ הוא כיוון של ווקטור צפיפות הזרם $\vec{j}$



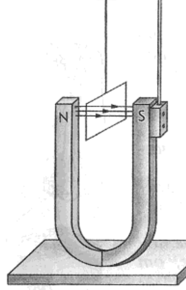
$$\Delta F_{max} = I\cdot B\cdot\Delta l$$

סליל נושא זרם בשדה מגנטי.

מומנט מגנטי.

על סליל שטוח קטן נושא זרם ונמצא בשדה מגנטי מופעל מומנט כוח M:

$$\vec{M} = I\cdot S\cdot \vec{n} \times \vec{B}$$



השדה המגנטי (המשך)

סליל נושא זרם בשדה מגנטי.

מומנט מגנטי (המשך).

גודלו של המומנט M :

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \sin\alpha$$

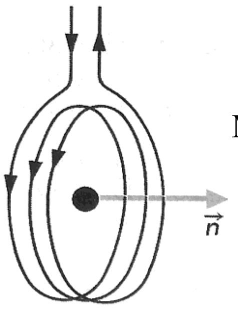
I – זרם

S – שטח הסליל

B – שדה מגנטי

α – זווית בין ניצב למישור הסליל לבין וקטור השדה

$\vec{n}$ – וקטור הנורמל

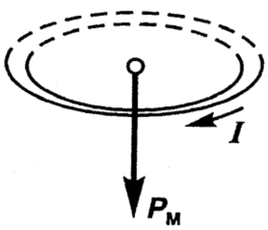


הערך הווקטורי $\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}$

נקרא **המומנט המגנטי** של הסליל.

גודלו : $p_m = I \cdot S$

כיוון המומנט המגנטי נקבע בעזרת **כלל הבורג** : כאשר מסובבים בורג בכיוון הזרם בסליל, אזי כיוון התקדמותו יהיה כיוונם של וקטור המומנט $\vec{p}_m$ ושל וקטור הנורמאל $\vec{n}$.



יחידות השדה –

עוצמת השדה המגנטי האחיד שבו על קטע של תיל נושא זרם של 1 אמפר בעל אורך של 1 מטר פועל כוח מקסימלי של 1 ניוטון.

יחידה זאת נקראת 1 **טסלה**.

$$F_{max} = I \cdot \Delta l \cdot B$$

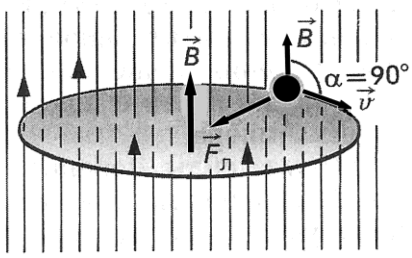
$$B = \frac{F_{max}}{I \cdot \Delta l}$$

$$[B] = \frac{[F]}{[I] \cdot [\Delta l]} = \frac{N}{A \cdot m} = \text{Tesla}$$

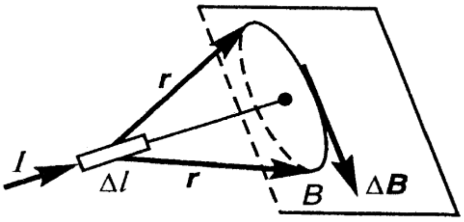
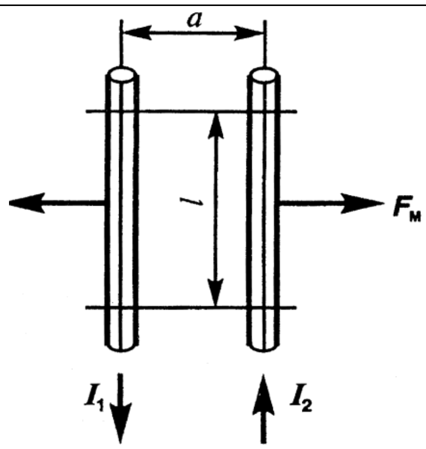
תנועת חלקיק טעון בשדה מגנטי אחיד

מסלול החלקיק בעל מטען q הנכנס לשדה מגנטי אחיד B במהירות v בכיוון ניצב לשדה, ינוע במסלול מעגלי בעל רדיוס

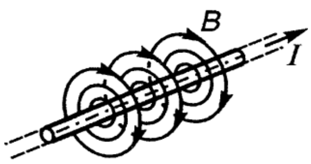
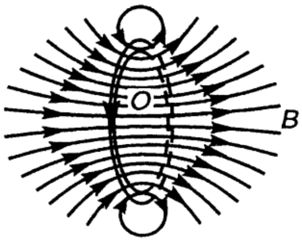
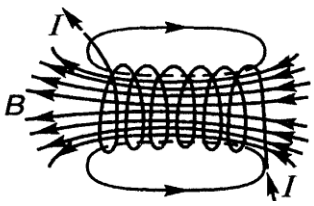
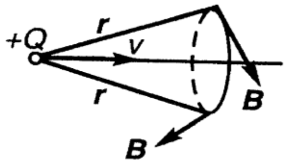
$$r = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}$$

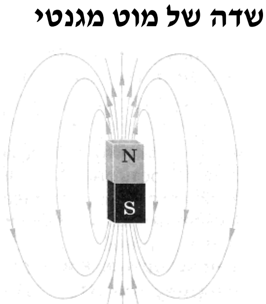
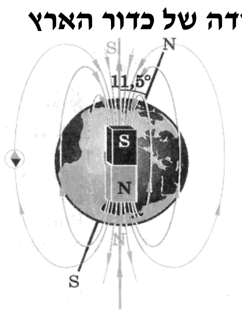


השדה המגנטי (המשך)

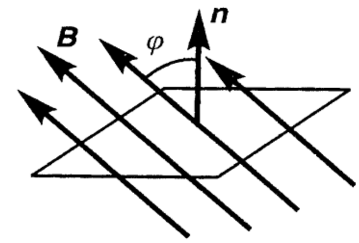
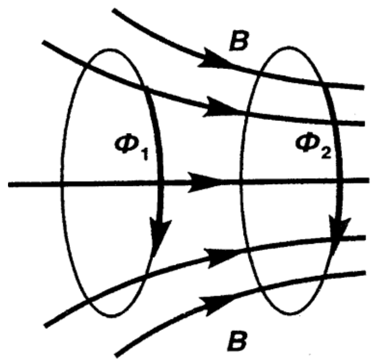
חוק ביו-סוואר קטע הזרם האלמנטרי מהווה מקור שדה מגנטי, שעוצמתו במרחב החיצוני שווה: כאשר μ_0 – הקבוע המגנטי: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{Hn}{m}$ μ – קבוע מגנטי של התווך	 $\Delta\vec{B} = \frac{\mu_0\mu I}{4\pi r^3}\,\Delta\vec{l} \times \vec{r}$
עוצמת השדה המגנטי בריק - הערך הווקטורי השווה לעוצמת השדה $\vec{B}$ חלקי הקבוע המגנטי μ_0 נקרא עוצמת השדה בריק: עוצמת השדה המגנטי בתווך היא: כאשר μ – קבוע מגנטי יחסי של התווך	$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$ $\vec{H}_\mu = \frac{\vec{B}}{\mu_0\mu}$
כוחות הפועלים בין שני תילים **מקבילים נושאי זרם –** הכוחות הם כוחות מגנטיים, הנוצרים בין המטענים הנעים. הכוחות החשמליים (כוחות קולון) במקרה זה שווים לאפס, מכיוון שהמטען הכולל של כל תיל שווה לאפס. שני תילים ארוכים, ישרים ומקבילים נמשכים אחד לאחר כאשר הזרמים באותו הכיוון, ונדחקים כאשר הזרמים מנוגדים. גודלו של הכוח המגנטי שווה: a – מרחק בין התילים I_1, I_2 – זרמים L – אורכו של כל תיל	 $F = \frac{\mu_0\mu\, I_1 I_2 l}{2\pi a}$

שדה מגנטי של זרמים ומגנטים קבועים

מוליך נושא זרם	קווי שדה	עוצמת השדה
תיל גלילי ישר וארוך בעל חתך מעגלי עם רדיוס R.		$B = \frac{\mu_0\mu I}{2\pi r}, \quad r \geqslant R$ $B = \frac{\mu_0\mu I r}{2\pi R^2}, \quad r < R$ r – מרחק מציר התיל
סליל מעגלי בעל רדיוס R		$B_0 = \frac{\mu_0\mu I}{2R}$ B_0 – עוצמת השדה במרכז הסליל O
סילונית ישרה באורך l ורדיוס הסלילים R : ($l >> R$)		$B_s = \frac{\mu_0\mu NI}{l}$ N – מספר הסלילים I – זרם
חלקיק טעון מטען Q הנע במהירות v ($v << c$).		$B_Q = \frac{\mu_0\mu Q}{4\pi r^3}[\vec{v} \times \vec{r}]$

שדה של מוט מגנטי	שדה של כדור הארץ
	

השראה אלקטרומגנטית

שטף מגנטי- מכפלת עוצמת השדה B , שטח משטח S הכלוא בתוך מסלול סגור, וקוסינוס הזווית בין ווקטור השדה $\vec{B}$ לבין ווקטור נורמל $\vec{n}$ הניצב למשטח: בתור מסלול אפשר להשתמש בכל קו סגור דמיוני המקיף חלק מהשטח. אם נחליף את המסלול הדמיוני במוליך אמיתי (לדוגמה, בתיל דק), אזי מסלול זה ייקרא מסלול **מוליך**.	 $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\varphi$
עבודת כוחות אמפר בסליל מוליך תוך כדי העתקת סליל סגור שבו עובר זרם קבוע בשדה מגנטי חיצוני, כוחות אמפר מבצעים עבודה: כאשר $A = I\left(\Phi_2 - \Phi_1\right)$ Φ_1 – שטף מגנטי דרך הסליל בהתחלת התנועה Φ_2 – שטף מגנטי דרך הסליל בסוף התנועה	
אנרגיה של שדה מגנטי	במרחב מסביב למוליך שבו עובר זרם I מפוזרת אנרגיה: $W_m = \frac{LI^2}{2}$ כאשר L היא **השראתו** של המוליך.
צפיפות האנרגיה של שדה מגנטי – זוהי אנרגיה הכלואה ביחידת נפח: צפיפות האנרגיה w תלויה בעוצמת השדה B ובתכונות מגנטיות של התווך:	$w = \lim\limits_{\Delta V \to 0}\left(\frac{\Delta W_m}{\Delta V}\right) = \frac{dW_m}{dV}$ $w = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}$

השראה אלקטרומגנטית (המשך)

שדה מערבולת חשמלי

בסליל סגור המקיף משטח שדרכו עובר שטף מגנטי משתנה, נוצר שדה חשמלי **מושרה** שבו קווי השדה סגורים (שדה מערבולת). אם הסליל הוא מוליך, ייווצר בו זרם חשמלי, הנקרא **זרם מושרה**.

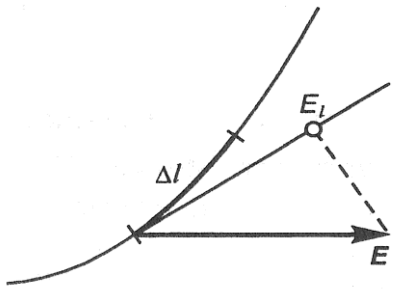
כא"מ מושרה

המאפיין העיקרי של השדה המושרה הוא **כא"מ** (כוח אלקטרו-מניע) **מושרה** השווה לעבודת כוחות שדה המערבולת בהעברת מטען חיובי של 1 קולון לאורך המסלול:

כאשר

$E_l \cdot \Delta l_i$ – עבודת שדה מערבולת חשמלי בקטע אלמנטרי של המסלול

E_l – היטל ווקטור השדה $\vec{E}$ בכיוון המשיק למסלול בנקודה נתונה.



$$\varepsilon = \Sigma\, E_l \cdot \Delta l_i$$

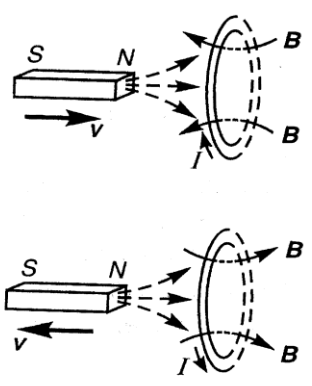
ההקפה של ווקטור השדה

סכום כל העבודות האלמנטריות של ווקטור השדה במסלול סגור נקרא ההקפה של ווקטור השדה $\vec{E}$ במסלול L :

$$\oint_L E_l\, dl = \varepsilon$$

חוק לנץ

כיוונו של זרם מושרה הוא כזה שהשטף המגנטי הנוצר על ידו פועל בניגוד לשינוי השטף היוצר את הזרם המושרה.



השראה אלקטרומגנטית (המשך)

חוק פאראדי

הניסויים מוכיחים שכא"מ מושרה שווה לקצב השינוי בשטף המגנטי דרך המשטח המוגבל על ידי סליל:

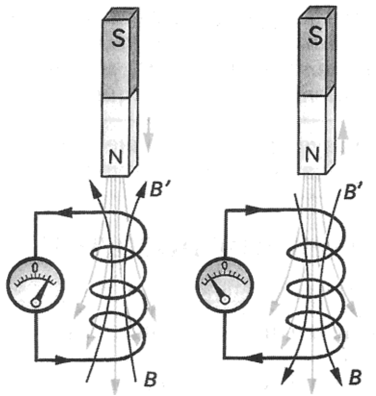
$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

או בצורה מדויקת יותר:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

הסימנים של ε ושל $\frac{d\Phi}{dt}$ הם נגדיים.

מכיוון ששטף מגנטי מוגדר על ידי מכפלת שלושת הערכים: B, S ו $\cos\varphi$, גם שינוי השטף עצמו תלוי בערכים אלה.



באיורים מוצגים קווי השדה המושרה B הנוצר עקב התקרבות או התרחקות של מוט מגנטי המלווה בשינוי השטף המגנטי דרך הסליל.

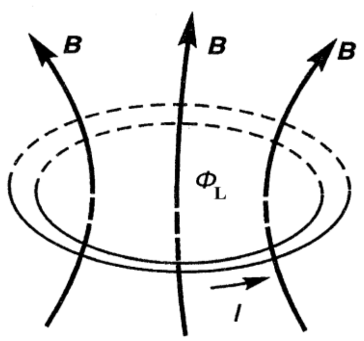
השראה עצמית

זרם משתנה העובר במוליך גורם לשינוי שטף השדה המגנטי שנוצר על ידי הזרם. שינוי זה גורם להיווצרות כא"מ מושרה. התופעה נקראת השראה עצמית.

כא"מ של ההשראה העצמית שווה:

כאשר

Φ_I – שטף מגנטי הנוצר על ידי הזרם העובר דרך הסליל. השטף הזה נקרא: **השטף של ההשראה העצמית**.



$$\varepsilon_I = -\frac{d\Phi_I}{dt}$$

השראות של סליל

זהו הערך השווה לשטף מגנטי של השראה עצמית דרך משטח המוגבל על ידי סליל מוליך כאשר עובר בו זרם של 1 אמפר.

השראה אלקטרומגנטית (המשך)

השראות של סליל (המשך)

השראות של הסליל שווה:

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

כאשר

Φ – שטף מגנטי העובר בתוך סליל

I – זרם

אם הקבוע המגנטי של התווך אינו משתנה, והסליל לא מעוות את צורתו, אזי ההשראות L אינה תלויה בזרם;
במקרה זה הכא"מ של ההשראה העצמית שווה:

$$\varepsilon_L = -L\frac{dI}{dt}$$

$\frac{dI}{dt}$ – קצב שינוי הזרם בסליל.

כא"מ מושרה במוליך הנע בשדה מגנטי

במוט מוליך ישר באורך l הנע בשדה מגנטי B במהירות v, נוצר כא"מ מושרה שגודלו:

$$\varepsilon_I = B\cdot l\cdot v\cdot \sin\alpha$$

כאשר α היא זווית בין כיוון המהירות לבין כיוון השדה. אם המוליך הוא חלק ממעגל סגור, אזי ייווצר זרם מושרה:

$$I = \frac{\varepsilon_I}{R}$$

זרם פתיחת המעגל וסגירתו

בפתיחת המעגל הכולל נגד וסליל המחוברים בטור (מעגל RL), הזרם הולך ונחלש לפי הנוסחה:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$

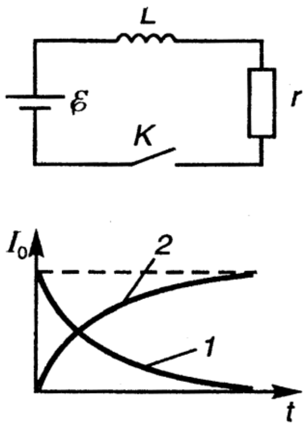
כאשר

I_0 – זרם ברגע הניתוק

כאשר סוגרים מעגל, הזרם הולך וגדל:

$$I = I_0\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

כאשר I_0 הוא ערך הזרם המקסימלי

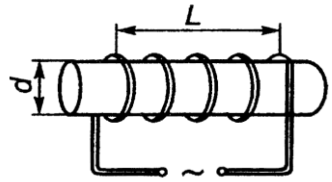


$t \to \infty$

השראות של מוליכים שונים

<table>
<tr><th>צורת המוליך</th><th>השראות</th></tr>
<tr><td>

סילונית עם ליבה



</td><td>

$$L = \frac{k\mu_0\mu N^2 S}{l}$$

N – מספר ליפופים

S – שטח החתך של הסילונית

l – אורך הסילונית

k – מקדם התלוי ביחס $\frac{l}{d}$ (d – קוטר)

μ – קבוע מגנטי יחסי של הליבה

l/d	0.1	0.5	5	10
k	0.2	0.5	0.6	1.0

</td></tr>
<tr><td>

תיל ישר בודד בעל חתך עגול, העשוי מחומר שאינו פרומגנטי ($\frac{l}{r} < 10$)

</td><td>

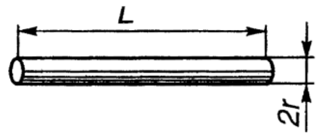
$$L = \frac{\mu_0 l\left(\ln\frac{2l}{r} - \frac{3}{4}\right)}{2\pi}$$

l – אורך התיל

r – רדיוס החתך

</td></tr>
<tr><td>

תיל ארך בעל חתך עגול הנמצא בגובה h במצב אופקי מעל הקרקע



l – אורך התיל

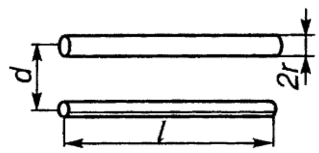
</td><td>

$$L = \frac{\mu_0 l\left(\ln\frac{2h}{r} - 1\right)}{2\pi}, \quad h >> l$$

$$L = \frac{\mu_0 l \cdot \ln\frac{2h}{r}}{2\pi}, \quad h << l$$

</td></tr>
<tr><td>

תיל כפול באוויר



</td><td>

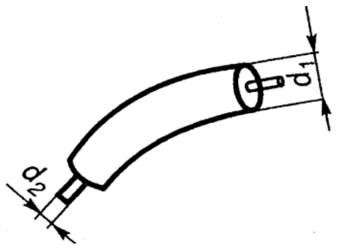
$$L = \frac{\mu_0 l\left(\ln\frac{d}{r} + \frac{1}{4}\right)}{\pi}$$

d – מרחק בין צירי התילים

l – אורך הקו

</td></tr>
</table>

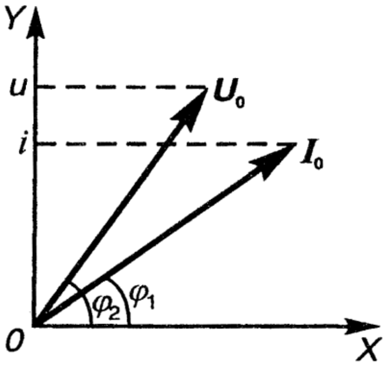
השראות של מוליכים שונים (המשך)

צורת המוליך	השראות
כבל קואקסיאלי  	$$L = \frac{\mu_0 \mu l \left(\ln\frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{4}\right)}{2\pi}$$ d_1 – קוטר עטיפה מוליכה חיצונית d_2 – קוטר התיל המוליך l – אורך הכבל μ – קבוע מגנטי יחסי של התווך שבין התיל המרכזי לבין העטיפה
יחידות ההשראות מכיוון שכא״מ מושרה מתבטא באמצעות ההשראות וקצב שינוי הזרם, אפשר להגדיר את יחידת ההשראות כמו השראות של מוליך שבו נוצר כא״מ מושרה של 1 וולט כאשר הזרם העובר בו משתנה ב-1 אמפר בזמן של שנייה אחת. שם היחידה – הנרי :	$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$ $$L = \frac{\varepsilon}{\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)}$$ $$1\ H = \frac{1V}{1\frac{A}{sec}} = 1\frac{V \cdot sec}{A}$$

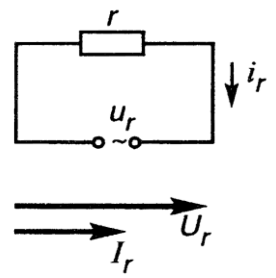
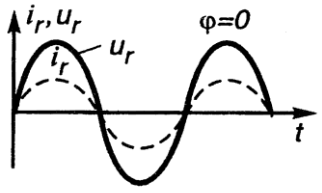
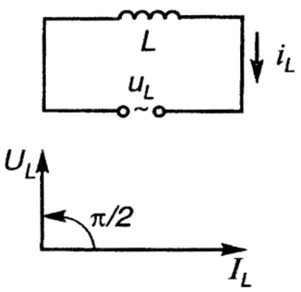
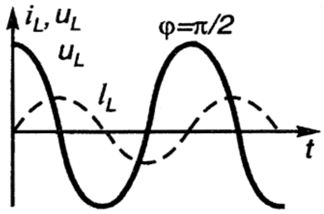
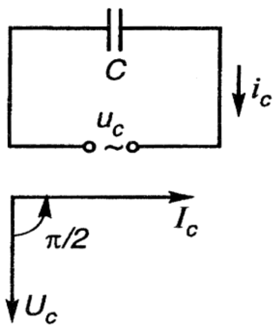
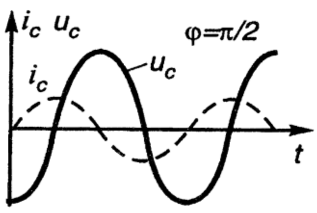
זרם חילופין

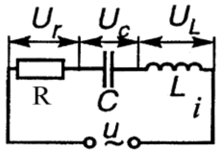
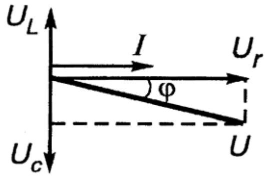
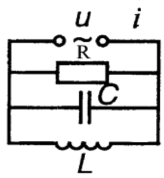
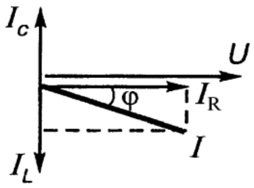
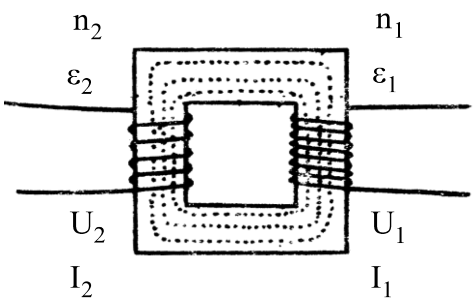
ערך הזרם הרגעי במעגל זרם חילופין גודל הזרם אינו קבוע. בכל רגע נתון אפשר להגדיר את הערך הרגעי :	$$i = \lim_{\Delta t \to 0}\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)$$ ΔQ – מטען העובר במעגל בזמן Δt
ערכי זרם ומתח חילופין רגעיים המשתנים לפי פונקציית סינוס.	$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi_1)$$ $$u = U_0 \sin(\omega t + \varphi_2)$$ I_0, U_0 האמפליטודות, φ_1, φ_2 המופעים ההתחלתיים

זרם חילופין (המשך)

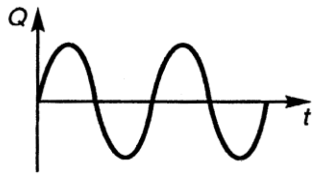
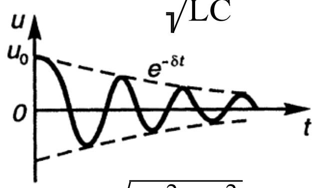
הערך הפעיל של זרם חילופין – הערכים המתאימים של זרם קבוע אשר בנגד הנתון מפיק אותו ההספק שמפיק בו זרם חילופין. עבור זרם המשתנה לפי חוק הרמוני הערכים הפעילים הם :	$I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}\,,\ U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ $I_0,\ U_0$ – האמפליטודות של מתח וזרם
הספק ממוצע של זרם חילופין	$P = U{\bullet}I{\bullet}\cos\varphi$ $\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ – הפרש מופעים $\cos\varphi$ – מקדם ההספק
דיאגרמת מופעים הערכים האופייניים של זרם חילופין הרמוני ניתנים להצגה על ידי דיאגרמות וקטוריות (אף שערכי זרם ומתח אינם ערכים וקטוריים!). דיאגרמות מסוג זה מציגות את האמפליטודות $I_0,\ U_0$ כחצים מכוונים שאורכם שווה לגודלן של האמפליטודות, וכיוונם (זווית בין החץ לבין ציר ה- x) שווה למופעים התחלתיים. מניחים, שהחצים מסתובבים נגד מגמת השעון במהירות זוויתית ω השווה לתדירות הזרם. הערכים הרגעיים i ו- u של זרם ומתח מיוצגים על ידי הרכיבים של $I_0,\ U_0$ בציר ה- Y.	

נוסחאות בסיסיות
לחישוב מעגלי זרם חילופין

מעגל ודיאגרמת המופעים	התנגדות כוללת	גרפים של זרם ומתח, הפרש מופעים
מעגל עם נגד בלבד 	$R = \frac{U_r}{I_r}$ R – התנגדות אקטיבית	 $\varphi = 0$
מעגל עם סליל בלבד 	$R_L = \frac{U_L}{I_L} = \omega L$ R_L – התנגדות השראתית	 $\varphi = -\frac{\pi}{2}$
מעגל עם קבל בלבד 	$R_C = \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{\omega C}$ R_C – התגדות קיבולתית	 $\varphi = +\frac{\pi}{2}$

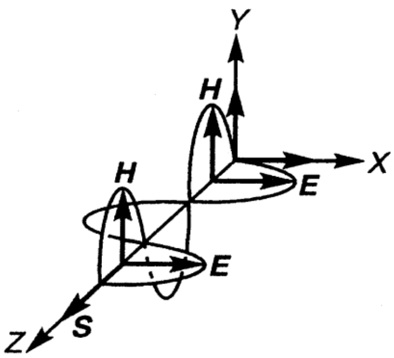
<table>
<tr><th colspan="3">נוסחאות בסיסיות לחישוב מעגלי זרם חילופין (המשך)</th></tr>
<tr><th>מעגל ודיאגרמת המופעים</th><th>התנגדות כוללת (עכבה)</th><th>גרפים של זרם ומתח, הפרש מופעים</th></tr>
<tr><td>מעגל טורי

</td><td>$Z = \frac{U}{I} =$
$= \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}$
במצב תהודה:
$R_L = R_C$
וההתנגדות הכוללת Z
מקבלת ערך מינימלי.</td><td>$tg\,\varphi = \frac{R_L - R_C}{R}$
$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 > 0,$
כאשר $R_L > R_C$
$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 < 0,$
כאשר $R_L < R_C$
במצב תהודה: $\varphi = 0$</td></tr>
<tr><td>מעגל מקביל

</td><td>$\frac{1}{Z^2} = \frac{I^2}{U^2} = \frac{1}{R^2} +$
$+\left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_C}\right)^2$
במצב תהודה:
$R_L = R_C$
וההתנגדות הכוללת Z
מקבלת ערך מקסימלי.</td><td>$tg\,\varphi = R\left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_C}\right)$
במצב תהודה: $\varphi = 0$</td></tr>
<tr><th colspan="3">שנאי</th></tr>
<tr><td colspan="2">$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}$
$R \approx 0 \rightarrow |U_1| \approx |\varepsilon_1|$
$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = K$
$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2}$</td><td></td></tr>
</table>

תנודות חשמליות

תנודות חשמליות	– שינויים מוגבלים של ערכים חשמליים (כמו : מטען, זרם, מתח), שחוזרים על עצמם באופן מלא או חלקי, סביב ערך ממוצע. זרם חילופין מהווה אחת מהצורות של תנודות חשמליות.
מעגל תנודות – מעגל חשמלי סגור הכולל סליל בעל השראות L וקבל בעל קיבולת C. תדירות התנודות (ללא דעיכה) : תנודות עם דעיכה : תדירות התנודות : מחזור התנודות (**נוסחת תומפסון**) :	 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ $\delta = \frac{R}{2L}$ $T = 2\pi\sqrt{LC}$
האנרגיה האגורה במעגל חשמלי האנרגיה האגורה בקבל בעל קיבול C : האנרגיה האגורה בשדה מגנטי של סליל : **משוואת התנודות** החופשיות במעגל :	$U_C = \frac{q^2}{2C}$ q – מטען הקבל $U_L = \frac{LI^2}{2}$ I – זרם העובר דרך הסליל L – השראות של הסליל $q'' + \frac{1}{LC} q = 0$

<table>
<tr><th colspan="2">גלים אלקטרומגנטיים</th></tr>
<tr><td>שדה אלקטרו-מגנטי

מערכת שדות חשמליים ומגנטיים משתנים הקשורים אחד לשני נקראת שדה אלקטרומגנטי. גל אלקטרומגנטי הוא שדה אלקטרומגנטי משתנה המתפשט במרחב.

וקטורי השדה החשמלי E והמגנטי H בגל המתפשט במרחב אינסופי הם ניצבים אחד לשני, וכיוון ההתפשטות ניצב למישור שבו שני הווקטורים נמצאים.</td><td>
</td></tr>
<tr><td>משוואת גל מישורי הרמוני

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – מספר גל
λ – אורך גל
ω – תדירות
הגל מתפשט בכיוון החיובי של ציר OZ
E_0, H_0 – אמפליטודות של E ו- H</td><td>$E = E_0 \cos(\omega t - kz)$
$H = H_0 \cos(\omega t - kz)$
$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \ \frac{N}{A^2}$
$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \ \frac{C^2}{N \cdot m^2}$</td></tr>
<tr><td>מהירות גל אלקטרומגנטי בריק

המהירות c לא תלויה באורך הגל.

מהירות גלים אלקטרומגנטיים בסוגי תווך אחרים קטנה ממהירותם בריק:</td><td>$c = 2.997925 \cdot 10^8 \ \frac{m}{sec}$
$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$
$c_1 = \frac{c}{n}$

n – מקדם שבירה יחסי של תווך</td></tr>
</table>