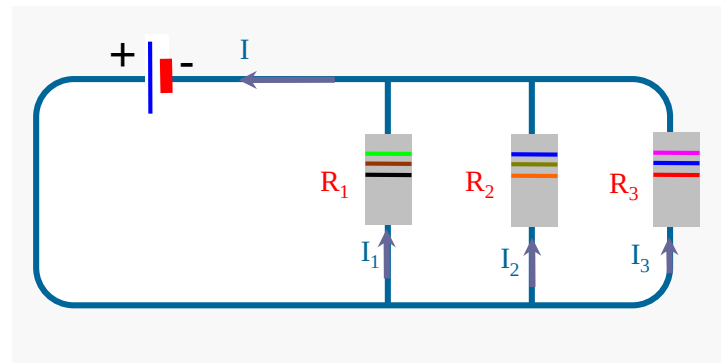
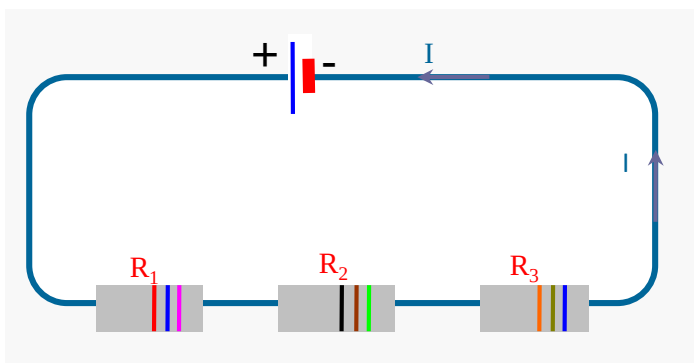


חשמל

המעגל החשמלי



- ▶ מוליכות והתנגדות חשמלית.
- ▶ חוק אום.
- ▶ במה תלויה התנגדותו של מוליך מתכתי?
- ▶ מעגלים טוריים, מקביליים ומעורבים.
- ▶ מדידות במעגל חשמלי: מד זרם ומד מתח.
- ▶ קצר, עומס יתר ונתיך.
- ▶ נגדים משתנים: פוטנציומטר וריאוסטט.

ציינו בשיעור הקודם, שמערך בו יש מקור מתח, תילים מוליכים וצרכנים (נורה, מכשיר חשמלי אחר) נקרא "מעגל חשמלי". נדון כעת במעגל חשמלי נתון, בו הזרם קבוע.

בפרק זה נבדוק במה תלוי זרם זה.

הניסיון מראה כי במקרים רבים, כאשר מפעילים מתח (V) מקבלים זרם (I), כשהקשר ביניהם הוא יחס ישר,

$$I \propto V$$

$$I = GV$$

מקדם הפרופורציה נקרא **מוליכות חשמלית** ומסומן ב-G. כך שניתן לרשום:

$$G = \frac{I}{V}$$

ערכו של G שונה עבור מוליכים שונים. ככל שערכו של G גדול יותר, נדרש מתח קטן יותר על מנת לקבל עוצמת זרם נתונה.

$$1 \text{ אמפר} = \frac{1 \text{ וולט}}{1 \text{ סימנס}}$$

יחידת המוליכות נקראת בשם **סימנס (Siemens)**, סימונה – S.

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{G}$$

הערך ההופכי של המוליכות G מבטא את ה**התנגדות** ומסומן באות R . נגדיר :

$$\frac{1}{G} = R$$

R נקרא **התנגדות** המוליך. ככל שהתנגדות המוליך גדולה יותר, דרוש מתח רב יותר כדי לקבל את אותו זרם במעגל. לכן נרשום:

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

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

הקשר הזה למעשה מגדיר ההתנגדות של מוליך כיחס בין המתח לזרם דרכו. מוליך, שמטרתו היא ליצור התנגדות במעגל חשמלי, נקרא "**נגד**".

היחס הישר בין המתח לזרם, הקובע את התנגדות הנגד, עשוי להשתנות עם שינוי הטמפרטורה (כתוצאה משינוי הזרם העובר דרכו). עם זאת, מתברר שבטווח טמפרטורות רחב מאוד (כלומר, בטווח מתחים וזרמים רחב), ההתנגדות נשארת קבועה בקירוב.

$$V = R \cdot I$$

נרשום:

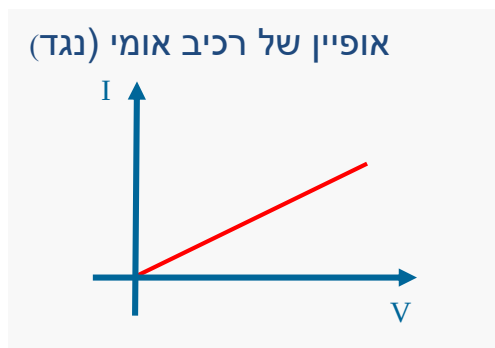
קשר זה ידוע בשם [חוק אום](#), האומר: הזרם הזורם במוליך נמצא ביחס ישר למתח בין קצותיו. קבוע הפרופורציה הוא התנגדות המוליך. קשר זה קובע גם את יחידת המידה של ההתנגדות.

$$[\Omega] = \frac{[V]}{[A]}$$

אם הפרש פוטנציאלים של 1V גורם לזרם בגודל של 1A, ההתנגדות של מוליך זה שווה ל-1[Ω].

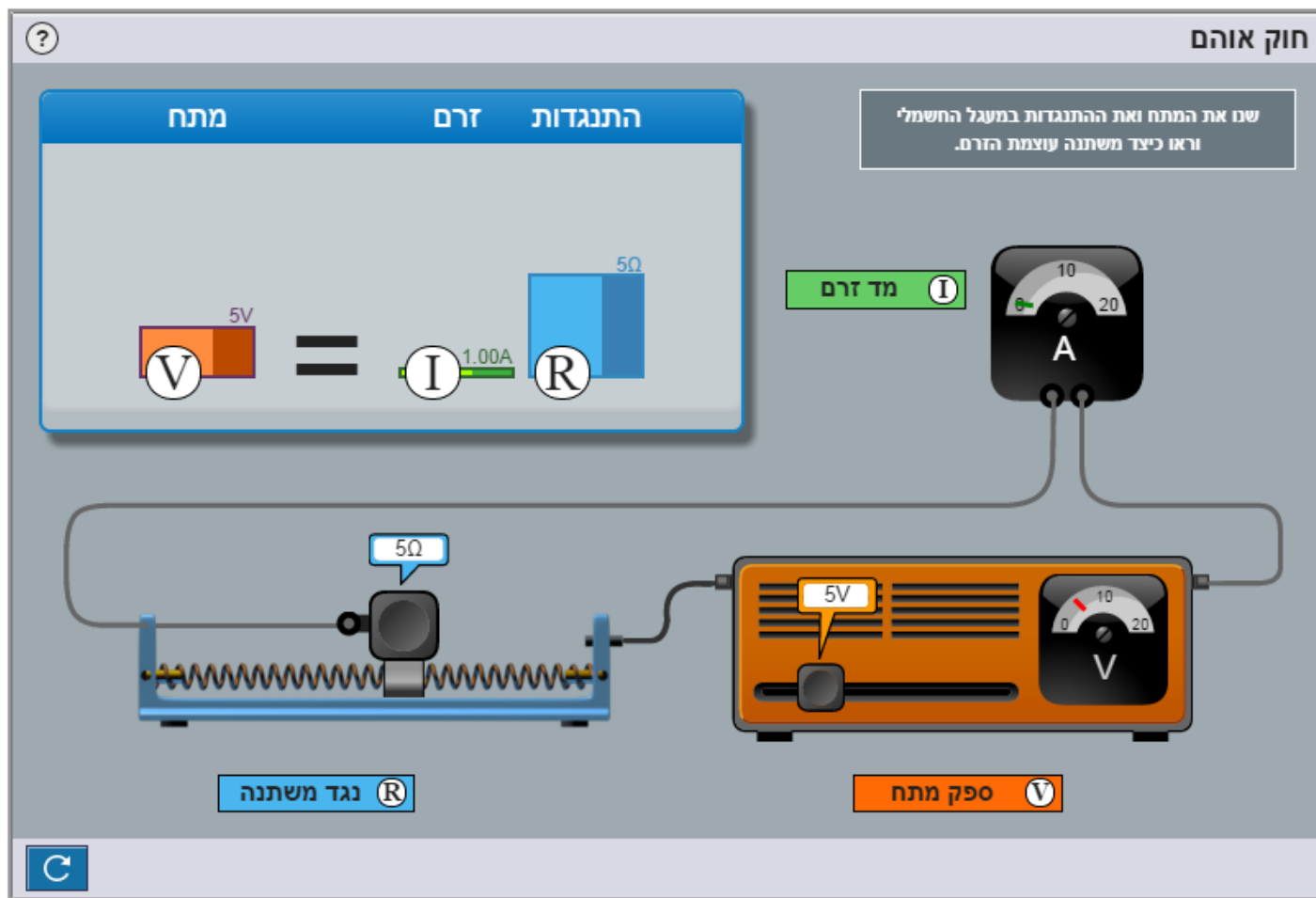
חוק אום הינו חוק אמפירי, שאינו מתקיים לכל החומרים או בכל טמפרטורה. למעשה, עם עליית הטמפרטורה של המוליך גוברות התנודות של אטומי הסריג, ובעקבות כך עולה התנגדותו לזרם. אך כאמור, בתחום רחב של טמפרטורות החוק עדיין מתקיים.

לכן חוק אום מהווה רק קירוב למצב האמיתי ואינו חוק טבע כמו חוק קולון או חוק הכבידה העולמי. בטמפרטורות גבוהות מאוד או נמוכות מאד, חוק אום אינו מתקיים, כי ההתנגדות משתנה באופן קיצוני. מוליך המקיים את חוק אום נקרא **נגד אוהמי**.



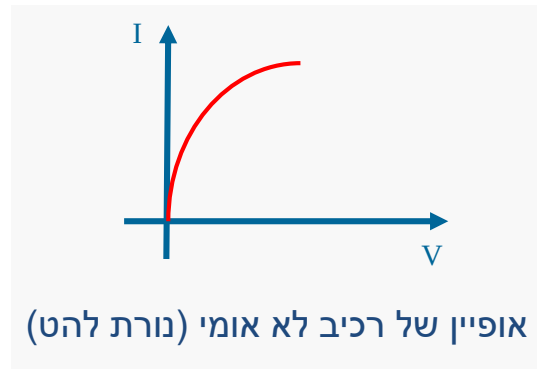
את תלות הזרם במתח נהוג לתאר בצורת גרף הנקרא **אופיין**. מחוק אום ברור כי אופיין של נגד הוא ישר, העובר דרך ראשית הצירים, כאשר שיפועו מתאר את **מוליכות** הנגד, והערך ההפוך של השיפוע מתאר את **התנגדות** הנגד.

◀ היכנסו לפריט שבתיקה: "חוק אוהם-הדמיה ומשימה" ובצעו אותו.



אחד הרכיבים השימושיים במעגלים חשמליים הוא נורת להט.

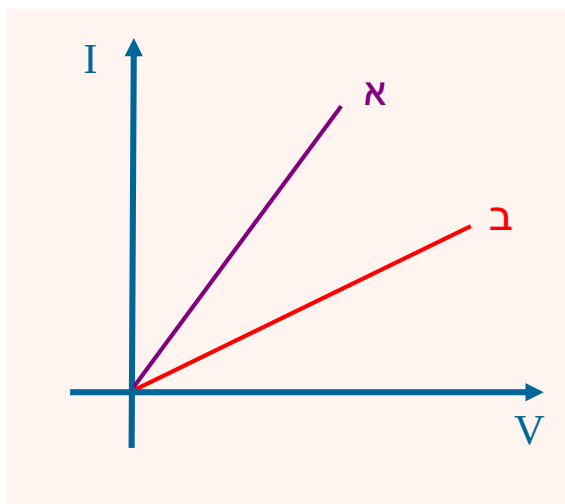
האופיין של נורת להט (שמושג באופן נסיוני) הוא :



כאמור, היחס הישר בין I ל- V מתקיים רק כאשר שינויי הטמפרטורה אינם גדולים וטמפרטורת הנגד נמוכה יחסית.

במקרים אחרים (למשל נורת להט), שינויי הטמפרטורה גדול (מגיע לכ-1500 מעלות צלסיוס) ומשפיע על היחס הזה. לכן חוט הלהט של הנורה אינו מקיים את חוק אום.

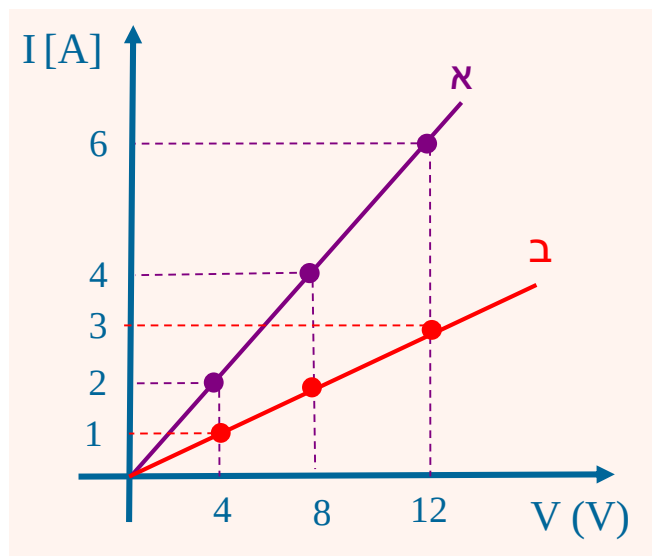
שני הגרפים (א' ו-ב' בשרטוט) מתאר את הזרם כפונקציה של המתח עבור שני מוליכים שונים.



האם נכון ש:

- ההתנגדות של מוליך א' גדולה יותר?
- ההתנגדות של מוליך ב' גדולה יותר?
- המוליכות של מוליך ב' גדולה יותר?
- לא ניתן לדעת, לאיזה מוליך ישנה מוליכות גדולה יותר?

הגרף הבא מתאר את הזרם כפונקציה של המתח עבור שני נגדים שונים.



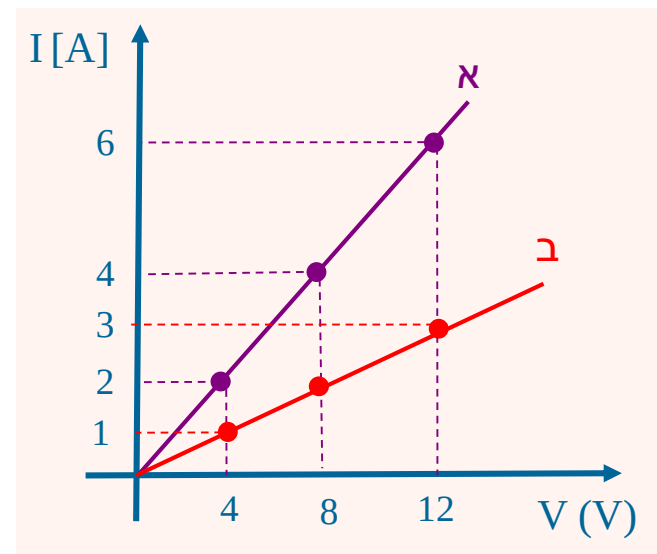
א. מצאו את המוליכות של כל אחד מהנגדים.

ב. מצאו את התנגדותו של כל אחד מהנגדים.

א. שיפוע הגרף שווה למוליכות, מכאן:

$$G_x = \frac{I}{V} = \frac{6}{12} = 0.5 [S]$$

$$G_2 = \frac{I}{V} = \frac{3}{12} = 0.25 [S]$$



ב. ההתנגדות שווה להופכי של המוליכות, מכאן:

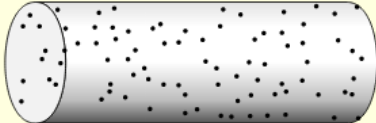
$$R_x = \frac{1}{G_x} = \frac{1}{0.5} = 2 [\Omega]$$

$$R_2 = \frac{1}{G_2} = \frac{1}{0.25} = 4 [\Omega]$$

במה תלויה התנגדותו של מוליך מתכתי?

- ◀ נבדוק במה תלויה התנגדותו של מוליך, העשוי מחומר אחיד.
- ◀ נבחן את התלות בשלושה פרמטרים: אורך המוליך, שטח החתך שלו והחומר ממנו הוא עשוי.
- ◀ ניסויים אלו תבצעו בבית בהמשך, באמצעות ערכת המעבדה המיועדת לכך.

$$R = \frac{\rho L}{A}$$



resistance = 0.80 ohm

ρ resistivity	L length	A area
		
0.57 Ωcm	10.79 cm	7.70 cm^2

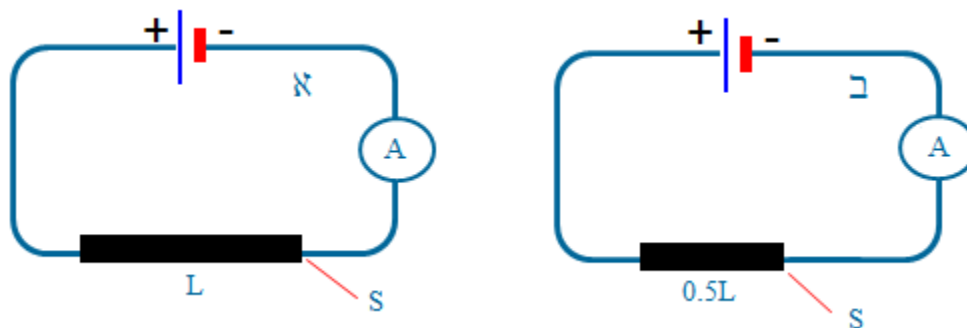


Resistance in a Wire
PIET

(1) השפעת אורך המוליך על ההתנגדות

כדי לבדוק את השפעת אורך המוליך (L) על התנגדותו, ניקח שני מוליכים בעלי אותו שטח חתך, כאשר אחד מהם ארוך פי 2 מהשני (תרשימים א' ו- ב').

נחבר כל אחד מהם למקור מתח (המקורות זהים ביניהם), ונקרא את קריאת מד הזרם.



במעגל, שבו מחובר המוליך הקצר פי 2, מתקבל זרם גדול פי 2.

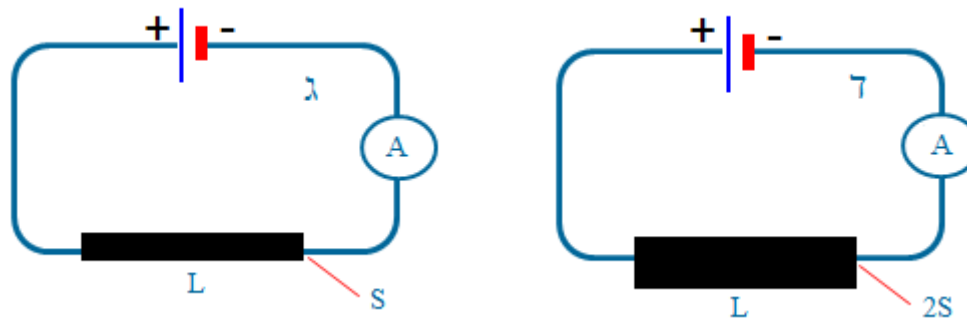
הסיבה: במתח קבוע, ככל שאורך התיל גדול יותר, כך גדל מספר ההתנגשויות של האלקטרונים החופשיים באטומים כלומר גם התנגדות המוליך גדלה.

אם נחזור על ניסוי זה עבור ערכים שונים (כפי שתעשו בניסוי בבית), נגיע למסקנה:

התנגדות המוליך נמצאת ביחס ישר לאורך המוליך.

(2) השפעת שטח החתך על ההתנגדות

כדי לבדוק את התלות של התנגדות המוליך בשטח החתך שלו, ניקח שני מוליכי נחושת בעלי אורך זהה, אך שטח חתך A שונה: האחד בעל שטח חתך כפול מהשני (תרשימים ג' ו-ד').
נרכיב שוב מעגלים בעלי מקורות מתח זהים, ונחזור על מדידות הזרם.

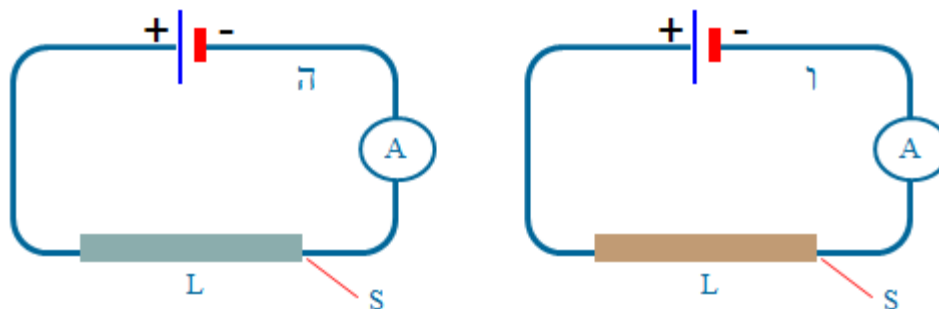


במעגל, בו היה מורכב המוליך בעל שטח החתך הכפול, מד הזרם מראה קריאה גדולה פי 2.
הסיבה: במתח קבוע, כששטח החתך גדול יותר, עוברים בו יותר אלקטרונים באותה יחידת זמן.
גם כאן, אם נחזור על הניסוי עבור ערכים שונים, נוכל להגיע למסקנה ש:

התנגדות המוליך היא ביחס הפוך לשטח החתך שלו.

כדי לבדוק את תלות התנגדות המוליך בחומר ממנו הוא עשוי, ניקח שני מוליכים, העשויים מחומרים שונים (למשל- האחד מאלומיניום והשני מנחושת), לשניהם אותו אורך ואותו שטח חתך (תרשימים ה' ו- ו').
נחבר אותם למקורות מתח זהים, ונראה קריאה שונה של עוצמת הזרם בכל מעגל.
הסיבה העיקרית: סוג החומר קובע את כמות האלקטרונים החופשיים הלוקחים חלק בזרם.
ניסויים בחומרים שונים יובילו למסקנה כי:

ההתנגדות תלויה בסוג החומר ממנו עשוי המוליך.



ניתן לאפיין חומרים שונים על ידי גודל שנקרא "**התנגדות סגולית**":

התנגדות סגולית היא ההתנגדות של מוליך מחומר נתון, בעל יחידת אורך אחת וחתך רוחב בעל יחידת שטח אחת.

את ההתנגדות הסגולית מסמנים באות היוונית - ρ .

נציג בטבלה את ערכי ההתנגדויות הסגוליות של חומרים נפוצים, בהם יש שימוש רב במעגלים חשמליים. הערכים המוצגים בה מתאימים לטמפרטורה של 20°C צלסיוס.

התנגדות סגולית [$\Omega \cdot m$]	החומר המוליך
$1.6 \cdot 10^{-8}$	כסף
$1.72 \cdot 10^{-8}$	נחושת
$2.7 \cdot 10^{-8}$	אלומיניום
$2.8 \cdot 10^{-8}$	זהב
$5.5 \cdot 10^{-8}$	טונגסטן
$1 \cdot 10^{-6}$	ניקל-כרום

לסיכום- הגורמים בהם תלויה התנגדות מוליך

לסיכום, ניתן לכלול את שלושת הגורמים, הקובעים את גודל ההתנגדות של המוליך, בביטוי אחד:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$[\Omega \cdot m] \cdot \frac{[m]}{[m^2]} = [\Omega]$$

* כאמור גורם נוסף, שבו תלויה התנגדותו של מוליך, היא **הטמפרטורה**. במתכות, למשל, ההתנגדות גדלה עם עליית הטמפרטורה, ואילו בתמיסות, במוליכים למחצה ובחומרי בידוד ההתנגדות יורדת, כאשר הטמפרטורה עולה.

תרגיל: חישוב התנגדות סגולית

נתון תיל מוליך שאורכו 1 מטר, ושטח חתך הרוחב שלו 0.4 ממ"ר.
כאשר המתח בין קצותיו של התיל הוא 6 וולט, זורם דרכו זרם של 4 אמפר.



- חשבו את התנגדותו של התיל.
- חשבו את התנגדותו הסגולית של התיל.
- מה יהיה הזרם אם יחברו בהמשכו של התיל הנתון, תיל נוסף זהה?



- מה יהיה הזרם אם יחברו בצמוד לתיל הנתון, תיל נוסף זהה?



א.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6}{4} = 1.5 [\Omega]$$

ב.

$$R = \rho \frac{L}{A} \Rightarrow \rho = \frac{R \cdot A}{L} = \frac{1.5 \cdot \frac{0.4}{10^6}}{1} = 6 \cdot 10^{-7} [\Omega \cdot m]$$

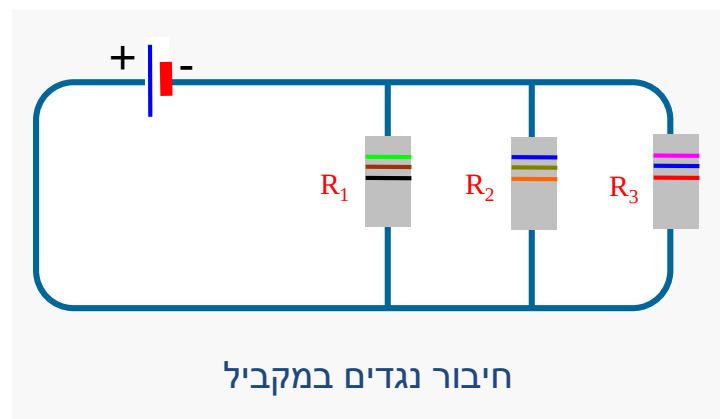
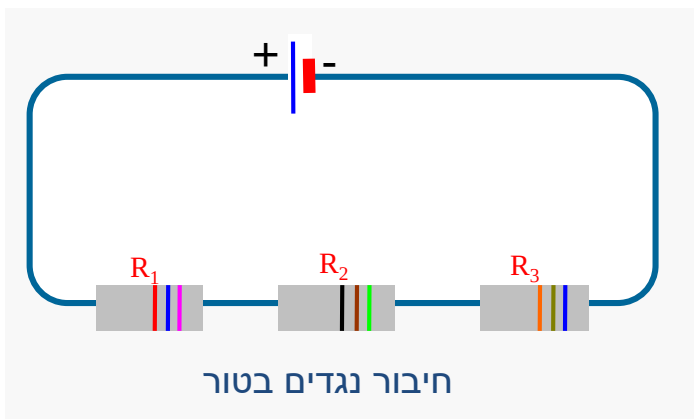
ג. כאשר האורך גדל פי 2 ההתנגדות גדלה פי 2 , ולכן הזרם קטן פי 2 (יהיה שווה ל- 2A).

ד. כאשר השטח גדל פי 2 ההתנגדות קטנה פי 2 , ולכן הזרם גדל פי 2 (יהיה שווה ל- 8A).

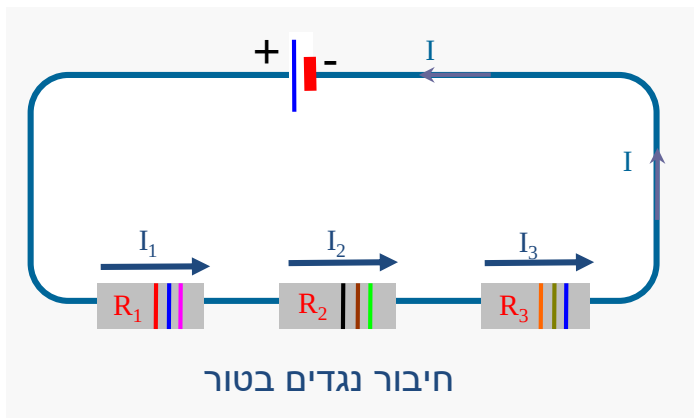
לעיתים יש יותר מצרכן אחד במעגל בצירופים שונים. במקרה זה אפשר לחשב את ההתנגדות השקולה שלהם, R_T :

נגד שקול (בעל התנגדות שקולה) יכול להחליף צירוף של נגדים מבלי לשנות את עוצמת הזרם, העובר דרך יתר חלקי המעגל.

נכיר שני סוגים בסיסיים של צירופי נגדים אומיים - חיבור **טורי** וחיבור **מקבילי**.



במקרה של חיבור בטור, זורם דרך כל הנגדים אותו הזרם, מכיוון שאין הצטברות מטען לאורך המעגל.



$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

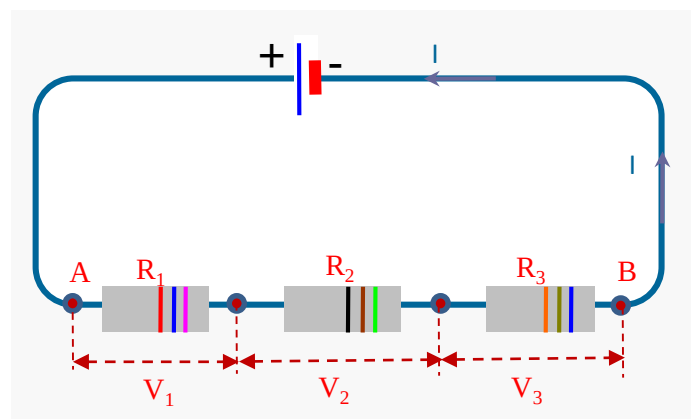
כאן I_1, I_2, I_3 מסמנים את הזרמים דרך הנגד המתאים, ו- I מסמן את הזרם הכללי במעגל שבתרשים.

בחיבור טורי נשמר הזרם דרך הנגדים.

ומה קורה למתח על פני הנגדים?

על כל נגד קיים מתח השווה למכפלת הזרם (הקבוע) בהתנגדות של אותו נגד (על פי חוק אוהם).
סך כל הפרשי הפוטנציאלים (המתחים) על הנגדים שווה למתח שבין שתי נקודות הקצה B-A.

$$V_{AB} = V_1 + V_2 + V_3$$



כאשר V_1, V_2, V_3 מסמנים את המתחים על הנגדים המתאימים ו- V_{AB} שווה למתח הכולל על 3 הנגדים.

בחיבור טורי סכום מפלי המתח על כל אחד מהנגדים שווה למתח הכולל.

כלל זה נקרא **חוק המתחים של קירכהוף (Kirchhoff)** והוא מבטא את **שימור האנרגיה**.

נבטא את המתח על כל אחד מהנגדים בעזרת חוק אוהם ונקבל:

$$V = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3$$

נשתמש גם בידע עבור הזרם במעגל, נקבל:

$$V = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3)$$

ומכאן:

$$\frac{V}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

היחס $\frac{V_T}{I_T}$ מבטא את ההתנגדות השקולה של צירוף טורי של נגדים, כלומר:

$$R_T = \frac{V}{I}$$

מכאן מקבלים עבור התנגדות שקולה של הנגדים R_T :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

או, באופן כללי עבור n נגדים שונים המחוברים בטור:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

בחיבור טורי התנגדות שקולה של הנגדים היא סכום ההתנגדויות שלהם.

$$R_T = n \cdot R$$

ברור, שכאשר מדובר בנגדים זהים, מקבלים עבור ההתנגדות השקולה:

הואיל ומפלי המתח על הנגדים הם לפי חוק אום:

$$V_2 = I \cdot R_2$$

$$V_1 = I \cdot R_1$$

נקבל:

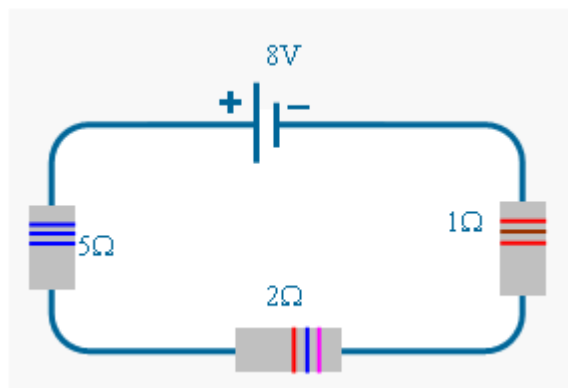
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

בחיבור טורי יחס המתחים על הנגדים

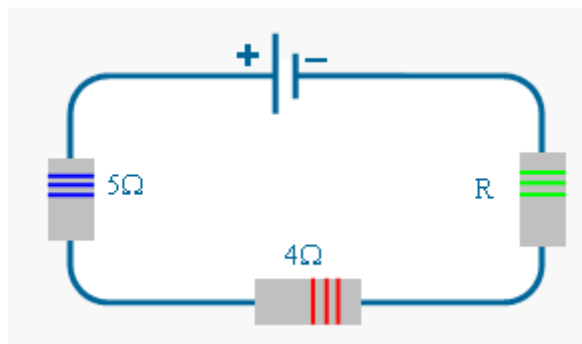
הוא כמו יחס ההתנגדויות של הנגדים המתאימים.

כלומר, על הנגד שהתנגדותו גבוהה יותר ייפול יותר מתח.

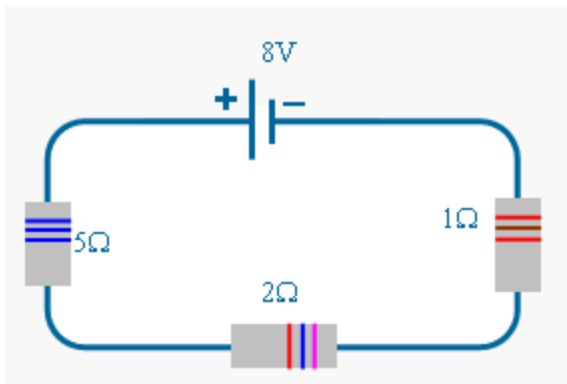
א. חשבו את עוצמת הזרם, העובר דרך כל אחד מהנגדים, ואת המתח בכל אחד מהם.



ב. חשבו את מתח המקור V ואת התנגדות הנגד R , אם ידוע שהמתח בנגד שהתנגדותו 5Ω הוא $10V$, והמתח בנגד R הוא $8V$.



א. במקרה של חיבור בטור, זורם דרך כל הנגדים אותו הזרם, מכיוון שאין הצטברות מטען לאורך המעגל.



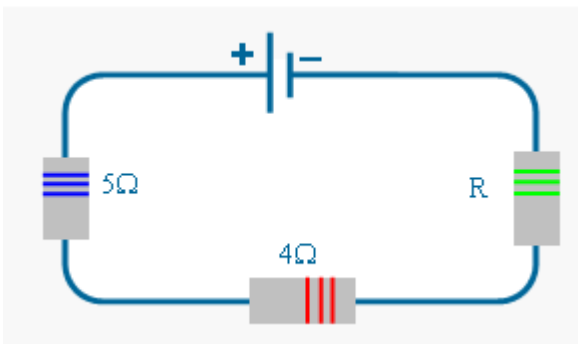
$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 5 + 2 + 1 = 8[\Omega]$$

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{8}{8} = 1[A]$$

$$V_1 = I_1 \cdot R = 1 \cdot 5 = 5[V] \quad V_2 = I_2 \cdot R_2 = 1 \cdot 2 = 2[V] \quad V_3 = I_3 \cdot R_3 = 1 \cdot 1 = 1[V]$$

ב.



$$V_5 = I \cdot R_5 \Rightarrow I = \frac{V_5}{R_5} = \frac{10}{5} = 2[A]$$

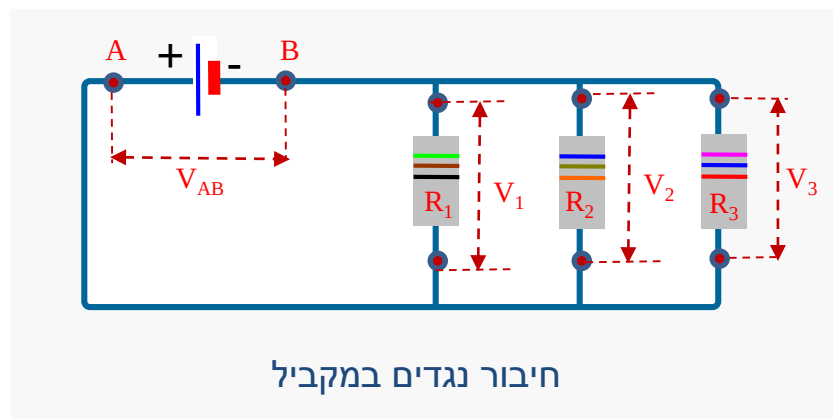
$$V_R = I \cdot R \Rightarrow R = \frac{V_R}{I} = \frac{8}{2} = 4[V]$$

$$V_4 = I \cdot R_4 = 2 \cdot 4 = 8[V]$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 10 + 4 + 8 = 20[V]$$

חיבור מקבילי של נגדים (1)

בסוג זה של צירוף הנגדים מחוברים כך, שלמעשה כולם קשורים בין שתי נקודות.
זאת משום שהנחנו, שניתן להזניח את התנגדויות החוטים.



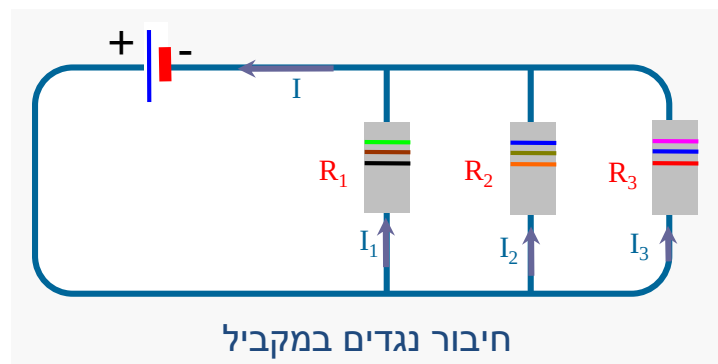
במצב זה המתח בין קצוות שלושת הנגדים זהה:

$$V_{AB} = V_1 = V_2 = V_3$$

בחיבור מקבילי, המתח על כל אחד מהנגדים הוא זהה.

חיבור מקבילי של נגדים (2)

חוק שימור המטען קובע כי כמות המטען הכללי במעגל נשמרת.



מכאן נוכל להסיק כי סכום הזרמים העוברים דרך כל הנגדים שווה לזרם הכללי:

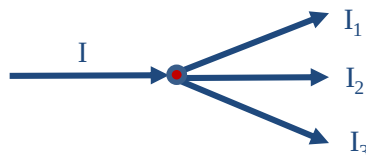
$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

בחיבור מקבילי, הזרם הכללי שווה לסכום הזרמים דרך כל אחד מהנגדים.

כלל זה נקרא **חוק הזרמים של קירכהוף** ומתבסס על **חוק שימור המטען**.

כל נקודה במעגל, שבה זרם מתפצל לשניים או יותר, נקראת "**צומת**". על כן, מקובל לנסח את חוק קירכהוף גם באופן הבא:

סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים ממנו.



מציאת ההתנגדות השקולה במעגל מקבילי

על סמך חוק אום נציב את הביטוי עבור הזרמים דרך כל אחד מהנגדים ונקבל:

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

או:

$$\frac{I}{V} = \frac{I}{R_1} + \frac{I}{R_2} + \frac{I}{R_3}$$

על סמך הגדרה של ההתנגדות השקולה $R_T = \frac{V_T}{I_T}$ נקבל:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

במקרה של n נגדים שונים המחוברים במקביל:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

בחיבור במקביל, סכום הערכים ההופכיים של התנגדויות הנגדים

שווה לערך ההופכי של ההתנגדות השקולה של כל הנגדים.

$$R_T = \frac{R}{n}$$

כאשר כל הנגדים המחוברים במקביל הם בעלי אותה התנגדות R, ההתנגדות השקולה היא:

$$S_T = nS$$

במקרה זה המוליכות הכללית שווה לסכום המוליכויות.

על סמך חוק אום נוכל לרשום:

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

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

מכאן היחס בין הזרמים הוא:

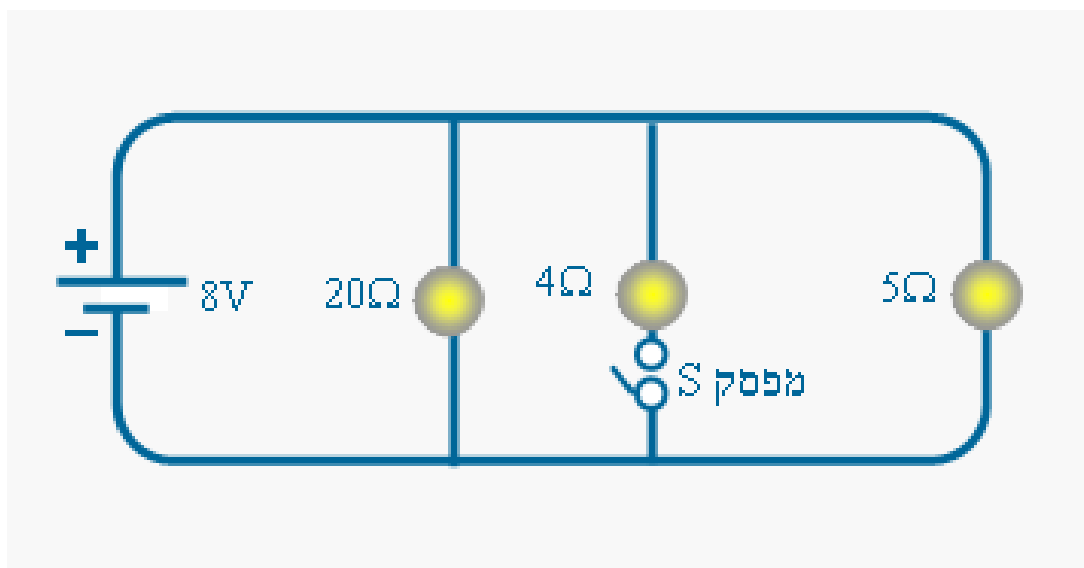
**בחיבור נגדים במקביל, היחס בין הזרמים דרך הנגדים
הפוך ליחס בין ההתנגדויות שלהם.**

מכאן ברור, שבחיבור במקביל, יזרום זרם קטן יותר דרך הנגד שהתנגדותו גדולה יותר.

מצאו את הזרם דרך כל נורה ודרך המקור במעגל החשמלי שלפניכם:

א. כשהמפסק פתוח.

ב. כשהמפסק סגור.



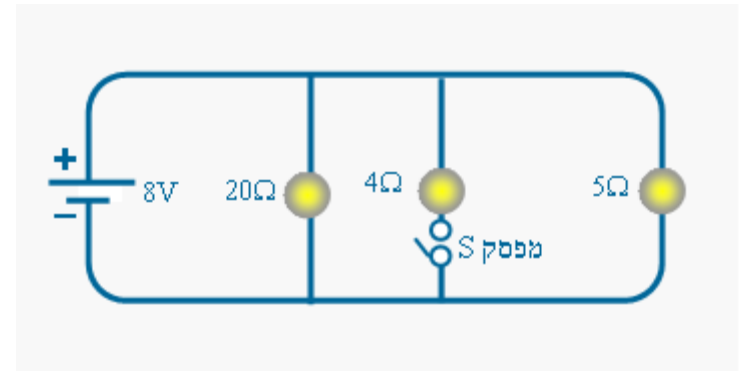
א. כאשר המפסק פתוח:

על סמך חוק אום נציב את הביטוי עבור הזרם דרך כל אחד מהנגדים, ונקבל:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{8}{20} = 0.4[A]$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{8}{5} = 1.6[A]$$

$$I = I_1 + I_3 = 0.4 + 1.6 = 2[A]$$



ב. כאשר המפסק סגור:

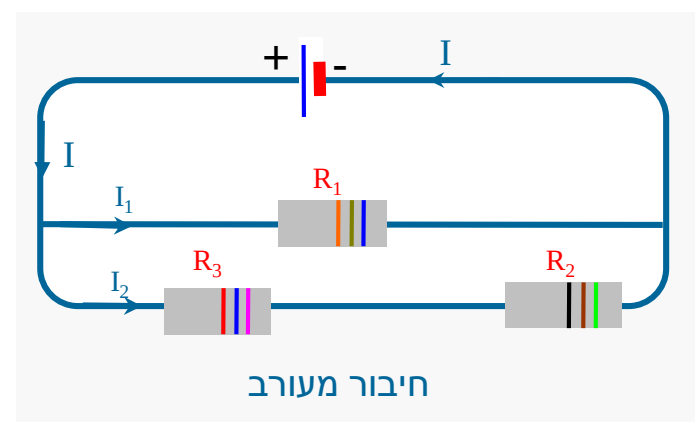
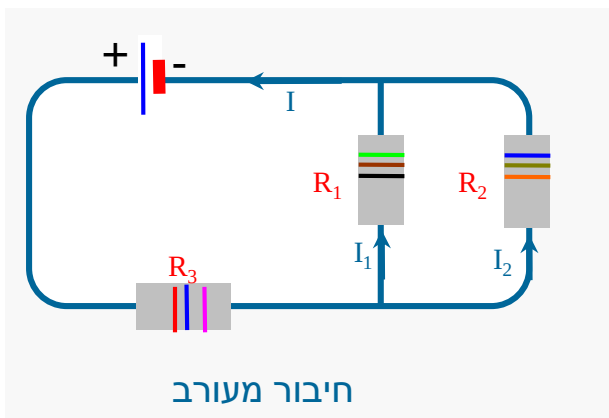
$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{8}{20} = 0.4[A]$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{8}{2} = 2[A]$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{8}{5} = 1.6[A]$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 0.4 + 2 + 1.6 = 4[A]$$

עד כה עסקנו בחיבור נגדים בטור או במקביל. כאשר נתונים שלושה נגדים לפחות, ניתן לחבר את הנגדים גם בצורות נוספות.

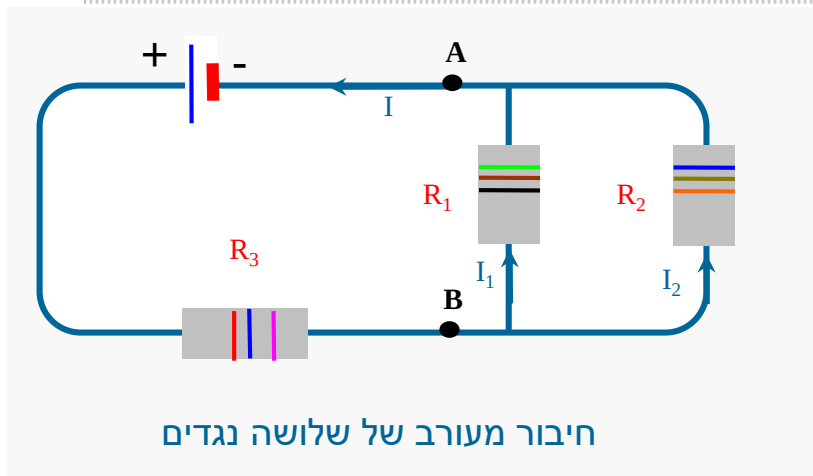


מעגלים כדוגמת שני מעגלים אלה, הם **מעגלים מעורבים**.

כדי לפתור מעגל, הכולל חיבורים מעורבים, יש לאתר קבוצות שונות של נגדים המחוברים בטור, ולייצג כל קבוצה על ידי נגד שקול. דבר דומה יש לעשות לגבי נגדים המחוברים במקביל, ולהמשיך בתהליך זה, עד שכל הנגדים במעגל יוחלפו בנגד שקול יחיד. נדגים זאת לגבי המעגל השמאלי.

מציאת ההתנגדות השקולה במעגל מעורב (א)

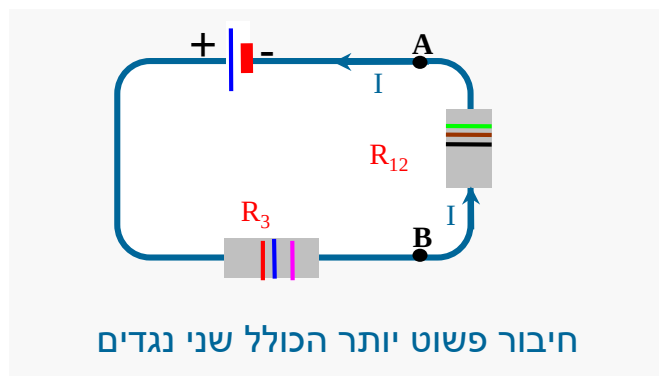
נחשב את ההתנגדות השקולה של המעגל:



שלב א:

את הנגדים R_1 ו- R_2 המחוברים במקביל נחליף בנגד $R_{1,2}$:

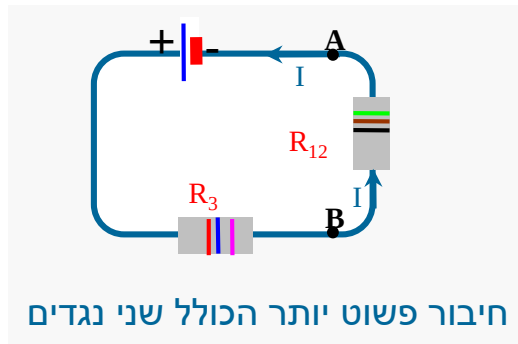
$$\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{1,2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



קיבלנו מעגל שקול, עם שני נגדים בטור:
שני המעגלים שקולים זה לזה. כלומר, בשניהם עוצמת הזרם שווה.

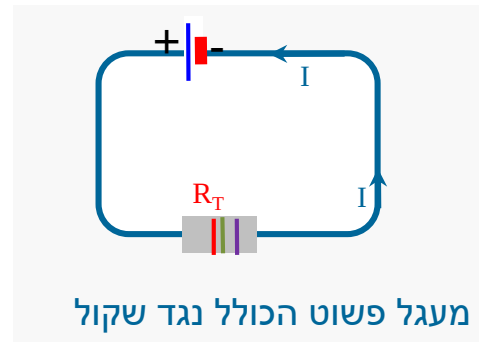
מציאת ההתנגדות השקולה במעגל מעורב (ב)

נמשיך לפשט את המעגל.



נחשב את השקול של שני הנגדים המחוברים בטור, R_T :

$$R_T = R_{1,2} + R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

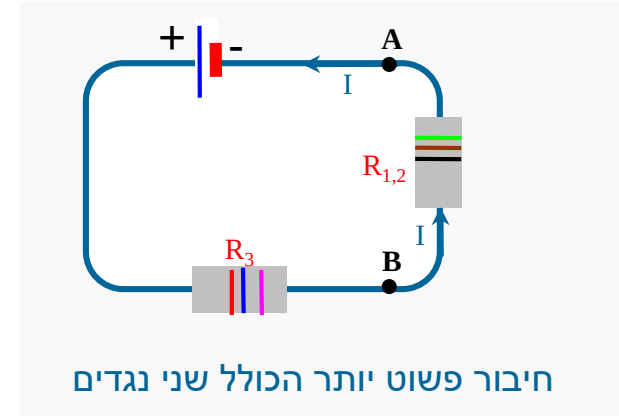
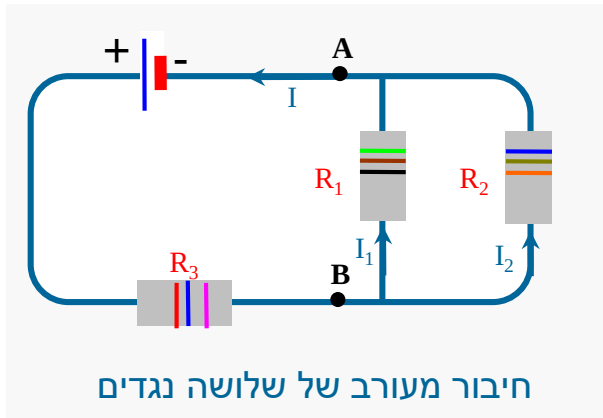


ונקבל את המעגל השקול:

הזרם במעגל:

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3}$$

נחשב את הזרם בכל נגד:



הזרם בנגד R_3 שווה לזרם הראשי I אותו חישבנו.

המתח בין הנקודות A ו-B :

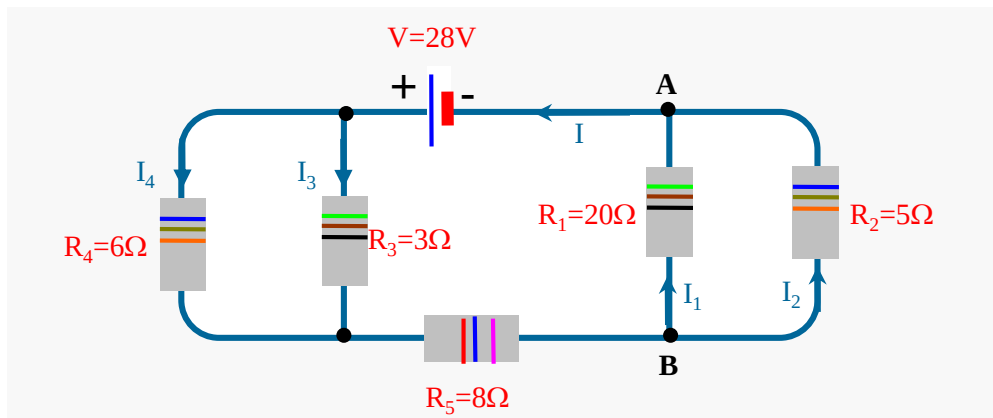
מתח זה שווה למתח על כל אחד מהנגדים R_1 ו- R_2 .

$$V_{AB} = I \cdot R_{1,2} = I \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

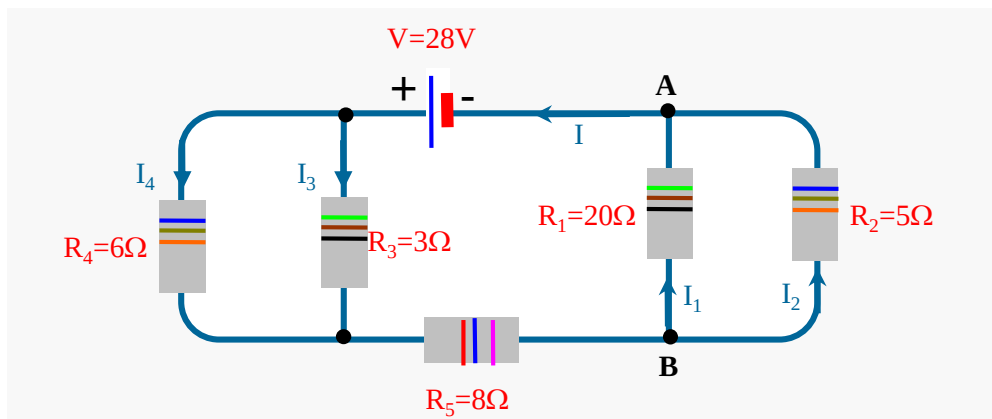
$$I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2}$$

כדי לחשב את הזרם בנגדים R_1 ו- R_2 נשתמש בחוק אוהם:

נתון המעגל החשמלי הבא:



- א. חשבו את ההתנגדות השקולה.
- ב. חשבו את הזרם הזורם דרך מקור המתח.
- ג. חשבו את המתח על פני כל אחד מהנגדים.
- ד. חשבו את הזרם הזורם דרך כל אחד מהנגדים.



א. ההתנגדות השקולה:

$$R_{AB} = \frac{5 \cdot 20}{5 + 20} = 4\Omega \quad R_{CD} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2\Omega$$

$$R_T = R_{AB} + R_{CD} + R_5 = 4 + 2 + 8 = 14\Omega$$

ב. הזרם הזורם דרך מקור המתח:

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{28}{14} = 2A$$

ג. המתח על פני כל אחד מהנגדים:

$$V_{AB} = V_1 = V_2 = R_{AB} \cdot I = 4 \cdot 2 = 8V$$

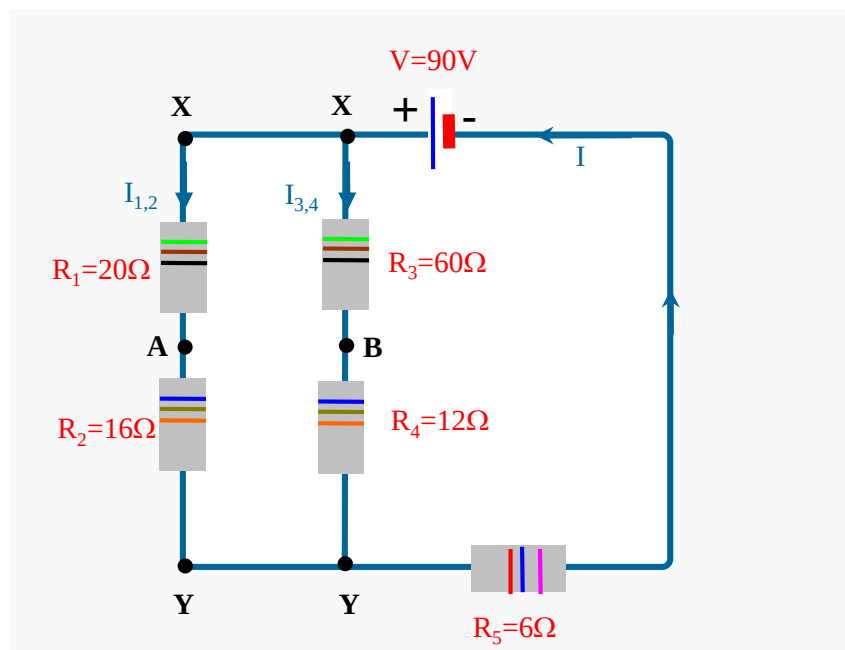
$$V_{CD} = V_3 = V_4 = R_{CD} \cdot I = 2 \cdot 2 = 4V$$

$$V_5 = R_5 \cdot I = 8 \cdot 2 = 16V$$

ד. הזרם הזורם דרך כל אחד מהנגדים:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{8}{20} = 0.4A \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{8}{5} = 1.6A \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{4}{3} = 1.3333A \quad I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{4}{6} = 0.666A \quad I_5 = I = 2A$$

נתון המעגל החשמלי הבא:



- חשבו את ההתנגדות השקולה.
- חשבו את הזרם הזורם דרך מקור המתח.
- חשבו את המתח על פני כל אחד מהנגדים.
- חשבו את הזרם הזורם דרך כל אחד מהנגדים.
- חשבו את המתח V_{AB} .

א. ההתנגדות השקולה:

$$R_T = \frac{(20+16) \cdot (60+12)}{(20+16) + (60+12)} + 6 = 30\Omega$$

ב. הזרם הזורם דרך מקור המתח:

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{90}{30} = 3A$$

ג. הזרם הזורם דרך כל אחד מהנגדים:

$$V_{XY} = R_{XY} \cdot I = 24 \cdot 3 = 72V$$

$$I_{1,2} = \frac{V_{XY}}{R_{1,2}} = \frac{72}{36} = 2A$$

$$I_{3,4} = \frac{V_{XY}}{R_{3,4}} = \frac{72}{72} = 1A$$

$$I_5 = I = 3A$$

ד. המתח על פני כל אחד מהנגדים:

$$V_2 = R_2 \cdot I_{1,2} = 16 \cdot 2 = 32V$$

$$V_1 = R_1 \cdot I_{1,2} = 20 \cdot 2 = 40V$$

$$V_5 = R_5 \cdot I = 6 \cdot 3 = 18V$$

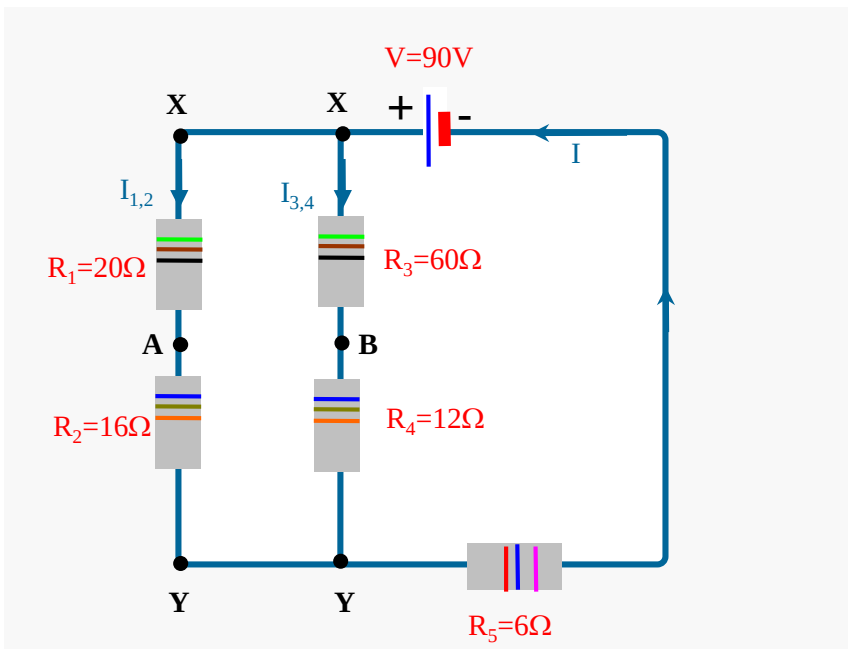
$$V_4 = R_4 \cdot I_{3,4} = 12 \cdot 1 = 12V$$

$$V_3 = R_3 \cdot I_{3,4} = 60 \cdot 1 = 60V$$

ה. המתח V_{AB} :

$$V_{AB} = V_1 - V_3 = 40 - 60 = -20V$$

הפוטנציאל בנק' B גבוה מהפוטנציאל בנק' A ב- 20V .



כיצד פועלים מכשירי המדידה החשמליים?

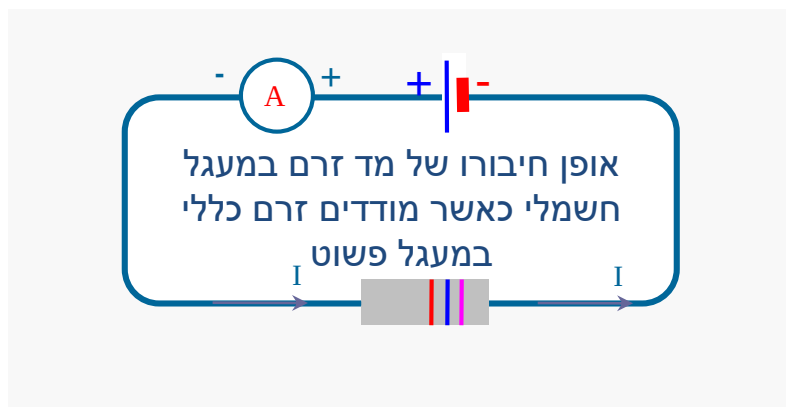
אופן פעולת מכשירי המדידה מבוסס על ידע מתקדם בתורת האלקטרומגנטיות שאותו נלמד בהמשך (כיום מרבית המכשירים הם אלקטרוניים). משום כך, בהסבר שלנו על המעגל החשמלי נאלץ להתייחס אל מכשירי מדידה כאל **"קופסא סגורה"** בעלת תכונות מיוחדות.

בפרט נכיר את מד הזרם (אמפרמטר) ואת מד המתח (וולטמטר)

למידדת עוצמת הזרם משתמשים במד זרם. למד זרם של זרם, שאינו משנה את כיוונו (זרם ישר), שני הדקים: חיובי (+) ושלילי (-).

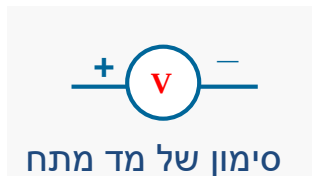


מד הזרם מודד רק את הזרם שזורם דרכו. לכן מחברים מד זרם במעגל **בטור** במקום בו רוצים למדוד את הזרם.

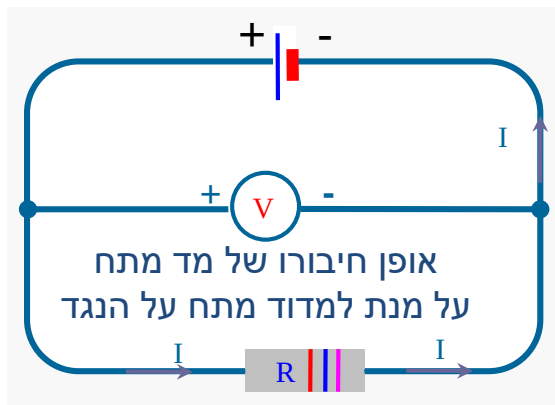


לאחר חיבור מד זרם למעגל חשמלי, הוא יהווה חלק מהמעגל, ויעיד על הזרם שעובר דרכו. כדי שהשפעת מד הזרם עצמו על המעגל החשמלי, בו הורכב, תהיה מינימאלית, מד הזרם הוא בעל **התנגדות קטנה מאד** לעומת התנגדויות יתר חלקי המעגל. במצב זה מניחים כי מד הזרם הוא "אידיאלי", כלומר, אינו משנה דבר עקב נוכחותו במעגל.

את המתח בין שתי נקודות במעגל חשמלי מודדים באמצעות "מד מתח".
את שני ההדקים של מד-המתח מחברים אל שתי נקודות במעגל כדי למדוד את המתח ביניהן.



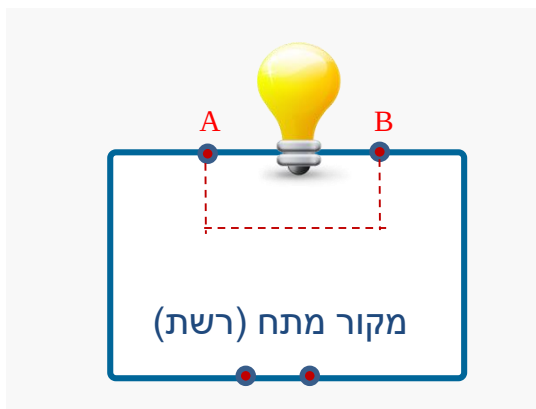
גם דרך מד-המתח זורם זרם. על מנת שהשפעת מד-המתח תהיה זניחה (כלומר, שלא יעבור דרכו זרם שהיה אמור לעבור דרך הנגד המקביל לו), יש לדאוג לכך שהתנגדותו תהיה גדולה בהרבה מהתנגדותם של יתר חלקי המעגל.



כאשר זרם חשמלי זורם בתיל מתכתי עולה הטמפרטורה של התיל. אם מסיבה כלשהי יעלה הזרם מעל לעוצמה המרבית שהתילים יכולים לשאת הם יתחממו ועלולים להתלקח. שתי סיבות עיקריות עשויות לגרום לעליה גדולה בעוצמת הזרם במעגל: קצר ועומס-יתר.

א. קצר

מצב בו יש חיבור ישיר של תיל אל מקור מתח, למשל כששני תילי הולכה המחוברים מכשיר למקור נוגעים זה בזה נקרא **קצר**.



אם ייווצר מגע בין הנקודות A - B תקטן התנגדות המעגל במידה ניכרת ועוצמת הזרם בו תעלה בצורה ניכרת.

עומס יתר מתרחש כאשר מחברים במקביל אל מקור מספר רב של מכשירים (צרכנים). לכל אחד מן המכשירים התנגדות משלו כך שבמתח נתון זורם בו זרם מסוים. מספר רב של מכשירים גורם לכך שעוצמת הזרם הכולל במעגל גדלה בצורה ניכרת. (ההתנגדות השקולה של נגדים המחוברים במקביל קטנה ככל שמתווספים נגדים, והזרם הכולל גדל).



כדי להגן על המעגל החשמלי מפני הסכנות הכרוכות במצבי קצר ועומס יתר מחברים למעגל **בטור** **נתיך** (fuse) שתפקידו לפתוח את המעגל ברגע שהזרם בו עולה מעל למותר. הנתיך אינו אלא תיל קצר ודק הניתך ברגע שעוצמת הזרם מגיעה לערכה המכסימלי המותר והמעגל ניפתח.



כיום נפוץ השימוש במפסקים "אוטומטיים" הפותחים את המעגל החשמלי ברגע שעוצמת הזרם בו מגיעה לערך מסוכן. פעולתם של מפסקים אלה מבוססת בדרך כלל על התופעה המגנטית של הזרם החשמלי.



שאלה: ברשת החשמל הביתית הצרכנים מחוברים במקביל זה לזה. ציינו שתי סיבות לכך!

במעגלים חשמליים רבים יש צורך לשנות את עוצמת הזרם או המתח במעגל כולו או בחלקים ממנו. לצורך זה משתמשים בנגדים שהתנגדותם ניתנת לשינוי. עקרונית, נגד כזה הוא תיל מוליך בעל אורך קבוע, לאורכו ניתן להניע גרר כך שעל ידי התחברות לאחת מקצות התיל ולגרר ניתן לשנות את ההתנגדות.

השימוש הנפוץ ביותר בנגד משתנה הוא **פוטנציומטר**. שימוש נוסף, נפוץ פחות, הוא **ריאוסטט**.

את קצות הנגד המשתנה מחברים אל מקור המתח.

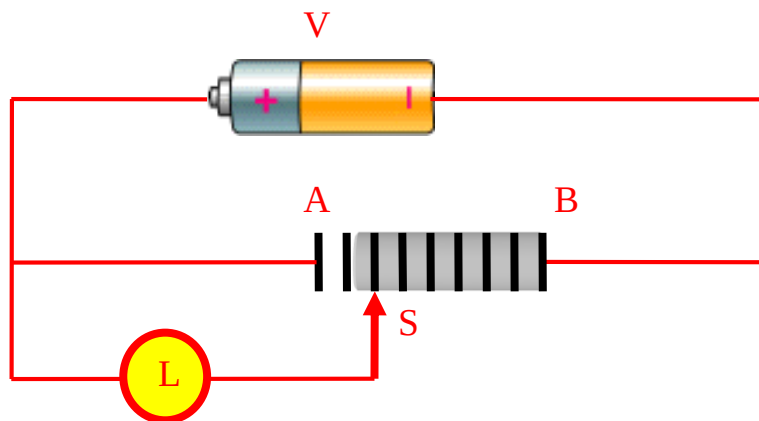
מאחד הקצוות והגררה מחברים אל הרכיב שאת המתח עליו רוצים לשנות.

מאחר וההתנגדות של חלק הנגד AS היא חלק מההתנגדות הכוללת AB, יהיה המתח בין S ל-A חלק

מהמתח בין B ל-A.

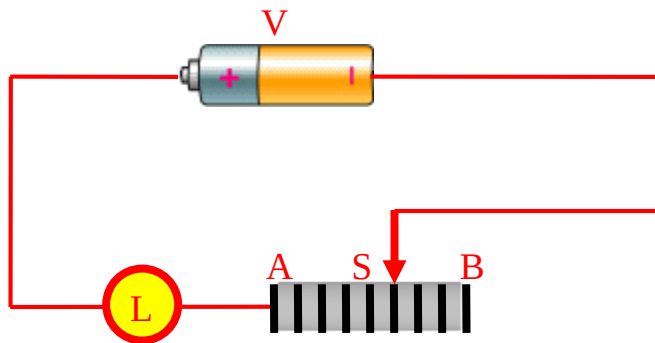
בצורה זו ניתן לשנות את המתח בין קצות הרכיב ממתח הקרוב למתח המקור V (כאשר הגררה S נמצאת

סמוך לקצה B) ועד לאפס (כאשר הגררה נמצאת סמוך לקצה A).



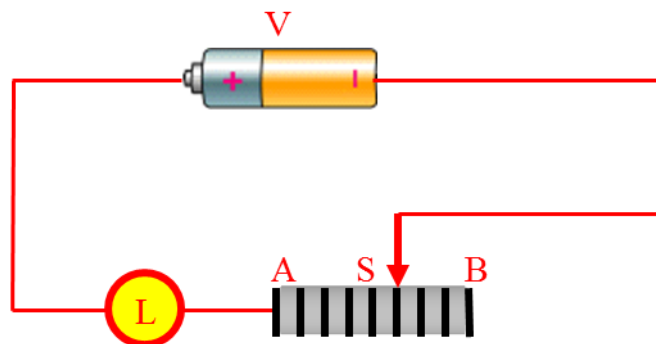
בחיבור זה מחברים את הנגד המשתנה **בטור** לרכיב המעגל בו רוצים לשנות את עוצמת הזרם. במקרה זה החיבור לנגד המשתנה הוא אל אחד מקצותיו ואל הגררה, קצה שני של הנגד המשתנה אינו מחובר.

כאשר הגררה S מוזזת מן הקצה המחובר (A) של הנגד המשתנה לכיוון הקצה שאינו מחובר (B), גדלה התנגדות המעגל ועוצמת הזרם בו יורדת, ולהיפך.

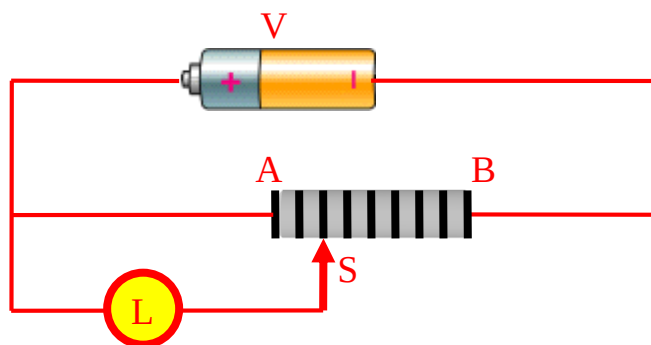


לרשותו של תלמיד נורה שרשום עליה $6V$, $0.2A$, מקור מתח של $6V$ ונגד משתנה שהתנגדותו המרבית היא 5Ω . התלמיד רוצה לווסת את אור הנורה.

א. התלמיד מחבר את הנגד המשתנה בחיבור ריאוסטטי. מהו תחום השתנות הזרם בחיבור זה?



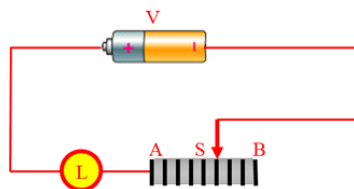
ב. התלמיד מחבר את הנגד המשתנה בחיבור פוטנציומטרי. מהו תחום השתנות הזרם בחיבור זה?



ג. באיזה חיבור ניתן לעמעם את אור הנורה, ואף לכבותה?

א. נחשב תחילה את התנגדות הנורה על פי הרשום עליה לפי חוק אום:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6}{0.2} = 30\Omega$$



כאשר הגרר S של הנגד המשתנה תימצא בקצה B של הנגד המשתנה התנגדותו היא מרבית,

כלומר 5Ω . עוצמת הזרם במקרה זה תהיה מינימאלית:

$$I_{\min} = \frac{V}{R_T} = \frac{6}{5 + 30} = 0.17A$$

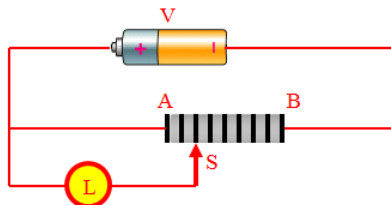
כאשר הגרר תימצא סמוך לקצה A של הנגד המשתנה התנגדותו תהיה אפס ועוצמת הזרם תהיה

מקסימאלית:

$$I_{\max} = \frac{V}{R_T} = \frac{6}{30} = 0.2A$$

ב. כאשר הגרר S תימצא בקצה B של הנגד המשתנה יהיה המתח על הנורה $6V$ והזרם בה:

$$I_{\max} = \frac{V}{R_T} = \frac{6}{30} = 0.2A$$



כאשר הגרר תימצא סמוך לקצה A של הנגד המשתנה יהיה המתח על הנורה 0 , והזרם דרכה אפס.

$$I_{\min} = 0A$$

ג. בחיבור הפוטנציומטרי ניתן גם לעמם את אור הנורה, וגם לכבותה.

$$G = \frac{I}{V}$$

◀ כאשר מפעילים מתח (V) מקבלים זרם (I), שהקשר ביניהם הוא יחס ישר. מקדם הפרופורציה נקרא **מוליכות חשמלית** ומסומן ב- G.

$$\frac{1}{G} = R$$

◀ הערך ההופכי של המוליכות G מבטא את **ההתנגדות** ומסומן ב- R.

$$V = R \cdot I$$

◀ **חוק אום:** הזרם הזורם במוליך נמצא ביחס ישר למתח בין קצותיו. קבוע הפרופורציה הוא התנגדות המוליך.

◀ את תלות הזרם במתח נהוג לתאר בצורת גרף הנקרא אופ"ן.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

◀ התנגדות המוליך נמצאת: ביחס ישר לאורך המוליך, ביחס הפוך לשטח החתך שלו, ותלויה בסוג החומר ממנו עשוי המוליך.

◀ התנגדות סגולית ρ היא ההתנגדות של מוליך מחומר נתון, בעל יחידת אורך אחת וחתך רוחב בעל יחידת שטח אחת.

◀ בחיבור טורי נשמר הזרם דרך הנגדים, סכום מפלי המתח על כל אחד מהנגדים שווה למתח הכולל, וההתנגדות השקולה של הנגדים היא סכום ההתנגדויות שלהם.

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

◀ בחיבור מקבילי, המתח על כל אחד מהנגדים הוא זהה, הזרם הכללי שווה לסכום הזרמים דרך כל אחד מהנגדים, וסכום הערכים ההופכיים של התנגדויות הנגדים שווה לערך ההופכי של ההתנגדות השקולה של כל הנגדים.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$V_{AB} = V_1 = V_2 = V_3$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

◀ מחברים מד זרם במעגל **בטור** במקום בו רוצים למדוד את הזרם. ניתן להניח שמד הזרם הוא "אידיאלי", כאשר הוא בעל התנגדות קטנה מאד לעומת התנגדויות יתר חלקי המעגל.

◀ מחברים מד מתח אל שתי נקודות במעגל כדי למדוד את המתח ביניהן. ניתן להניח שמד המתח הוא "אידיאלי", כאשר הוא בעל התנגדות הגדולה בהרבה מהתנגדותם של יתר חלקי המעגל.

◀ **קצר:** מצב בו שני תילי הולכה המחברים מכשיר למקור נוגעים זה בזה.

◀ **עומס יתר:** מתרחש כאשר מחברים במקביל אל מקור מספר רב של מכשירים.

◀ בעזרת **נגד משתנה** המחובר בחיבור **פוטנציומטרי** או **ריאוסטטי**, ניתן לשנות את עוצמת הזרם