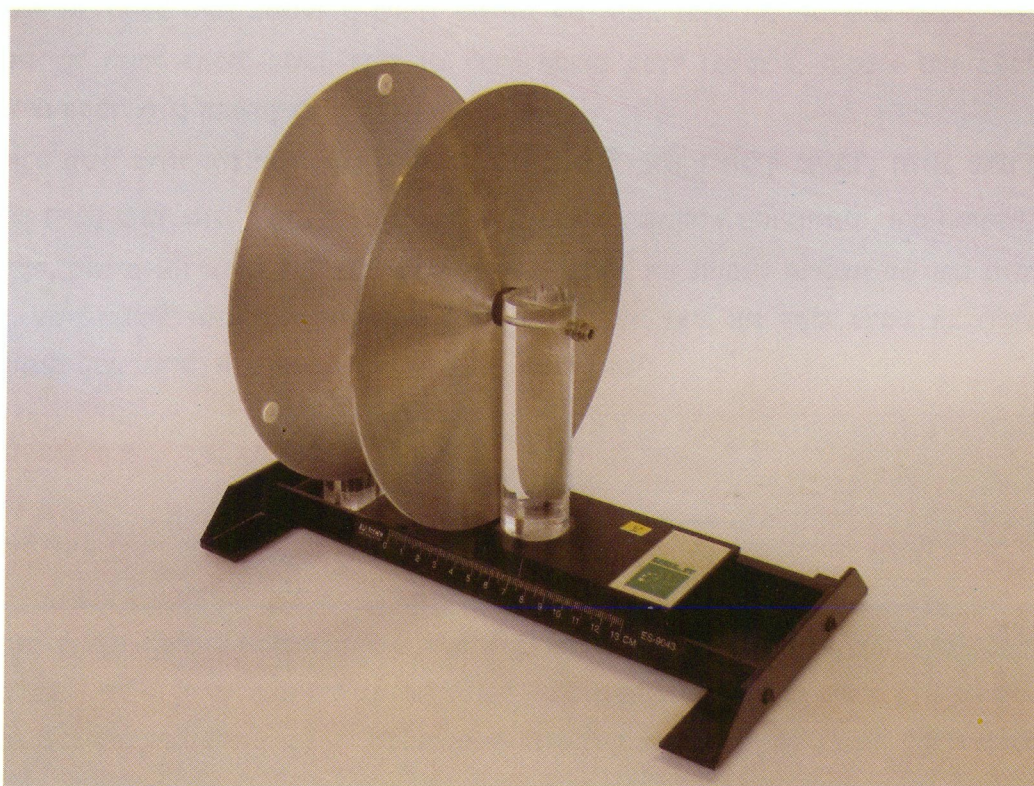


פרק 6 - קבלים

אפשר לאגור אנרגיה מכנית, למשל על ידי כך שמעלים מים לראש הר או על ידי כך שמותחים קפיץ.

הקבל הוא רכיב חשמלי שבו אפשר לאגור אנרגיה פוטנציאלית חשמלית. השימוש בקבלים נרחב ביותר: לב ליבו של המבזק במצלמה הוא קבל שמטענו נפרק בזמן קצר. הקבל הוא גם מרכיב חשוב במכשירי רדיו וטלוויזיה, ולמעשה, בכל מכשירי הקשר האלחוטיים. בנוסף, הקבל הוא מרכיב הכרחי במערכת ההצתה במנוע המכונית, ויש לו חשיבות רבה במעגלי זרם חילופין, ונעשה בו שימוש נרחב ומגוון באלקטרוניקה. בשבבים זעירים של מעבדי המחשבים האישיים מצויים אלפי רכיבים המתפקדים כקבלים.



איור 1 - בתצלום קבל לוחות משתנה המשמש ללימוד במעבדה.

6.1 הקבל

הקבל הוא זוג מוליכים מופרדים על ידי חומר מבודד. כפי שיוסבר בהמשך, קבל נטען כך שמטען כל אחד משני המוליכים זהה, אך מנוגד בסימנו. מסיבה זו, המטען הכולל על קבל הוא תקיד אפס. בהמשך משמעות האמירה "מטען הקבל" תהיה המטען q שעל פני אחד המוליכים, ומטעמי נוחות יהיה זה המטען על המוליך החיובי.

הקבל הוא רכיב במעגל החשמלי שמסוגל לאגור אנרגיה פוטנציאלית חשמלית, המתלווה לכל קבוצת מטענים. יכולת זו, כפי שיתברר, תלויה בגאומטריה של הקבל, כלומר במידותיו ובצורתו, ובחומר המבודד שמפריד בין המוליכים. הקבל הוא גם האמצעי ליצור שדות חשמליים כולל יצירת שדה חשמלי אחיד. השדה החשמלי האחיד משמש, בין היתר, במכשירי חשמל בהם יש צורך לשלוט על מסלול תנועתם של חלקיקים טעונים.

הקבל יוצג כאן בשני רבדים:

* בחלק הראשון של הדיון נדון במצב "הסטציונרי" – זהו מצב עמיד, קבוע, שאין בו שינוי. במקרה זה, הקבל טעון במטען q שאינו משתנה עם הזמן. נברר את הגורמים המשפיעים על יכולתו של הקבל להכיל מטען, כיצד יש לצרף קבלים בטור ובמקביל, ולבסוף נדון באנרגיה שנאגרת בקבל. חלק זה שייך לדיון האלקטרו-סטטי.

* בחלק השני נייחד את הדיון לתהליך "הטרנזיאנטי" – זהו תהליך מעבר, והוא מתרחש בפרק הזמן שבו נאגר המטען בקבל או נפרק ממנו. בתהליך הטרנזיאנטי, זרם הטעינה, או הפריקה, משנים את ערכם בכל רגע. מבחינתו של הלומד, זהו המפגש הראשון עם זרם משתנה בזמן, עניין המציב אתגר מתמטי שיוצג בפרק זה. ולבסוף, נציג את הקבל כרכיב רב חשיבות ביישומים טכנולוגיים. חלק זה משתייך לדיון האלקטרו-דינמי.

6.2 הגדרת הקיבול של קבל

"קיבול" הוא ביטוי לשוני שאחת מהגדרותיו היא "נפח, חלל שניתן לקבל בתוכו משהו".¹

בהקשר לנושא הנלמד, הקיבול הוא גודל פיזיקלי שמציין יכולת להכיל מטען חשמלי. כאמור, הקבל עשוי זוג מוליכים מופרדים בחומר מבודד. אחד הקבלים הפשוטים ביותר הוא זוג לוחות מתכת מקבילים, המופרדים על ידי שכבת אוויר המשמשת כחומר מבודד, בדומה לקבל בתצלום

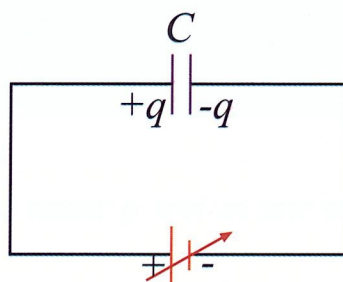
¹ המילון החדש, כרך ג', א. אבן שושן הוצאת קרית-ספר בע"מ, ירושלים.

שבעמוד 9. בהמשך הדיון נתמקד בקבל זה מטעמים של פשטות הדיון, אף על פי שהמסקנות נכונות לכל קבל. הסימון המוסכם לקבל:



איור 2: סימון מוסכם של קבל

באיור 3 מתואר קבל לוחות מקבילים מחובר למקור מתח משתנה שיוצר הפרש פוטנציאלים V בין הלוחות. הלוח השמאלי של הקבל נטען במטען $+q$, והלוח הימני, שמחובר להדק השלילי של הסוללה, נטען במטען $-q$. בהמשך נפרט את תהליך הטעינה, שם יובהר מדוע המטענים שווים בערכם המוחלט, אך שונים בסימנם.



איור 3: קבל מחובר למקור מתח משתנה

ראה הדגימה:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/capacitor/index.html>

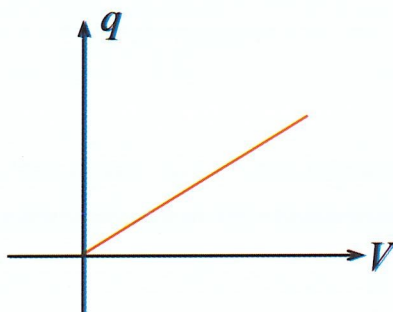
"Charging and Discharging a Capacitor"

בהדמייה שים לב לפרטים הבאים:

1. בתחילת הטעינה לוחות הקבל חסרי מטען עודף.
2. בתום הטעינה המטענים על הלוחות שוני סימן, אך כמותם שווה.
3. במשך הטעינה המטען עבר מלוח אחד אל הלוח השני דרך הסוללה.
4. כשהקבל מנותק, המטענים נשארים על הלוחות.
5. במעגל הפריקה עובר המטען דרך נגד וחוזר למצבו ההתחלתי.



כאשר מבצעים ניסוי בו מודדים ישירות את הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הקבל ואת גודל המטען q שנאגר בקבל, מתברר שקיים יחס ישר בין שני גדלים אלה. ניתן להציג תוצאה ניסויית זו בגרף הבא:



איור 4: גרף מטען הקבל q כפונקציה של המתח V בין לוחותיו

יחס ישר זה מאפשר להגדיר את ה"קיבול".

הגדרה

הגדרת הקיבול של קבל לוחות:

הקיבול C הוא היחס בין גודל המטען q שעל כל אחד מהלוחות לבין המתח ΔV בין

$$C = \frac{q}{V}$$

הלוחות:

יחידת הקיבול היא פארד, והיא נקראת כך על שמו של פאראדיי.

$$1F = \frac{1C}{1V}$$

משמעות יחידה זו: הקיבול של קבל הוא $1F$, אם מטענו הוא $1C$ כאשר המתח בין לוחותיו $1V$.

יחידת הפארד- F גדולה מאוד, לכן תת-היחידות של הפארד נפוצות מאוד.

סימון	כינוי	ערך
mF	מיליפארד	$10^{-3}F$
μF	מיקרופארד	$10^{-6}F$
nF	ננופארד	$10^{-9}F$
pF	פיקופארד	$10^{-12}F$

² בהמשך הפרק נסמן "V".

זהירות, מכשלה!

- * הנוסחה שמגדירה את ערך הקיבול מכילה שלושה גדלים פיזיקליים: כמות המטען q , המתח בין לוחות הקבל V והקיבול C .
- * הקיבול של קבל, כפי שנראה בהמשך, הוא גודל קבוע לקבל נתון.
- * משמעות הדברים היא שאם המתח בין לוחות הקבל גדל, גדל גם מטען הקבל, ולהיפך, אם המתח קטן, קטן גם המטען הנאגר בקבל, אך קיבול הקבל אינו מושפע ממטענו או מהמתח בין לוחותיו.



האם קיימת דוגמה אחרת בתחום הפיזיקה שעשויה להמחיש את מושג הקיבול? במובן מסוים, אגירת מטען בקבל דומה למתיחת קפיץ או לדחיסת אוויר לצמיג ריק של מכונית או לכדור שאינו מנופח. נתאר לעצמנו שמנפחים צמיג ריק. פעולה זו נעשית בתחנת הדלק במספר שלבים:

- מכוונים את המשאבה הדוחסת ללחץ 30 PSI^3 - אלה הוראות יצרן הצמיגים;
- מחברים את הצינור לפיית הצמיג;
- המשאבה דוחסת אוויר לצמיג, בהתחלה בקצב מהיר, אחר כך בקצב הולך וקטן, עד אשר "הצמיג מנופח", במצב זה זרם האוויר מהמשאבה לצמיג נפסק מאליו.



איור 5: צמיג הוא "קבל" שניתן לאגור בו אוויר בכמויות משתנות, לפי לחץ האוויר בו

³ PSI - יחידת לחץ שמתאימה לכוח המופעל על ידי 1 pound ליחידת שטח 1 inch^2 .

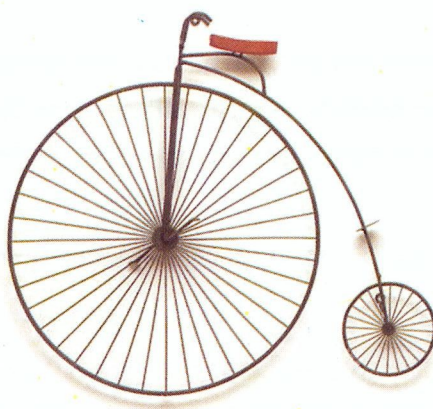
א. מדוע זרם האוויר מהמשאבה אל הצמיג הולך וקטן?

ג. מה עלינו לעשות אם ברצוננו לדחוס לתוך הצמיג מסה גדולה יותר של אוויר?

ד. הגדר את "הקיבול של הצמיג C".

ה. נתאר לעצמנו 2 צמיגים: האחד קיבולו C, וצמיג שני קיבולו 2C. במה בעיקר נבדלים שני הצמיגים זה מזה?

אם תתקשה, ראה תשובות במהופך.



ሁሉም ሰላም ይገኛል፡፡

אָבער: אַלע אַרבעטן זענען געווען געמאכט מיט אַ פּאַרצעל פּאַפּיר, און אַלע אַרבעטן זענען געווען געמאכט מיט אַ פּאַרצעל פּאַפּיר.

[illegible]

מולקולות של סחבת הם m ושא $C = m / P$, וקשר זה לא יצא לי קיבלת מא אסד זל. ניתן

[illegible][illegible]

ՌԼԼԼ ԱԼԱՌՈՒՄԸ ՀԵՄԻՆ

[illegible]

אָדער אַזוי ווי ער האט געוואלט זיין פארמאגן, און ער האט דאס געוואלט.

6.3 חישוב הקיבול של קבל לוחות קבילים

נסמן:

- שטח כל לוח A (למעשה, זהו שטח החפיפה של שני לוחות הקבל).
- המרחק בין הלוחות d.
- הקבל טעון, מטענו q.

בפרק 4 הדן בשדה החשמלי, מצאנו שעוצמת השדה החשמלי בין זוג לוחות מקבילים מיוצגת על ידי הביטוי:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

כאשר σ - מבטא את צפיפות המטען ליחידת שטח על כל אחד מלוחות הקבל, יחידותיו $[C/m^2]$.

ϵ_0 הוא קבוע המוגדר על ידי הקשר $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות מקיים:

$$V = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d = \frac{\frac{q}{A} d}{\epsilon_0} = \frac{qd}{\epsilon_0 A}$$

נציב את הביטוי המגדיר את הקיבול:

$$C = \frac{q}{V}$$

$$C = \frac{q}{\frac{qd}{\epsilon_0 A}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

הביטוי האחרון מתאר את הגדלים שקובעים את ערך קיבולו של קבל לוחות מקבילים:

- הקיבול נמצא ביחס ישר לשטח הלוחות.
- הקיבול נמצא ביחס הפוך למרחק d שבין הלוחות.
- הקיבול תלוי בסוג החומר הנמצא בין הלוחות הקבל. אם הלוחות נמצאים בריק או באוויר, ערכו של הקבוע הינו ϵ_0 .

- מהביטוי האחרון ניתן לראות את ערכו של קבוע הפרופורציה ϵ_0 באופן הבא:
- אם בקבל המרחק בין הלוחות הוא $d = 1\text{m}$, ושטח כל לוח הוא 1m^2 , ואם בין הלוחות שורר ריק, אז קיבולו של קבל זה הוא $8.85 \cdot 10^{-12}\text{F}$.

בהמשך נרחיב את הדיון לחומרים מבודדים נוספים שעשויים למלא את המרווח בין הלוחות.

קבל ג'סתנה

קבל משתנה הוא רכיב חשוב במקלטי רדיו. כאשר "מחפשים תחנה" מסובבים כפתור המשנה את ערך הקיבול של קבל לוחות (או מספר קבלים מחוברים ביניהם). הקיבול תלוי בשטח חפיפת לוחותיו. הגודל A המופיע בביטויים מציין את שטח חפיפת הלוחות.

ראה הדגימה:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/varcapacitor/index.html>

"Variable Capacitor"

ובאותו מקום גם:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/radio/index.html>

"Tuning A Radio Receiver"



דוגמה 1

חשב את הקיבול של זוג לוחות מקבילים אם ידוע ששטח כל לוח 10cm^2 , והמרחק ביניהם 5mm .

פתרון:

לפי הגדרת היחידות של הקבוע ϵ_0 , יש להציב ערכים ביחידות SI עבור ממדי הקבל, כדי שהתוצאה תתקבל ביחידות F, ולכן:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1.77 \cdot 10^{-12} F$$

דוגמה 2

מעוניינים לבנות קבל שקיבולו $0.1F$ משני לוחות מקבילים הנמצאים באוויר במרחק 1cm זה מזה. חשב את שטחו של כל לוח.

פתרון:

$$A = \frac{Cd}{\epsilon_0} = \frac{10^{-1} \cdot 10^{-2}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 1.13 \cdot 10^8 m^2$$

המספר שהתקבל הוא מספר עצום! אם הלוח ריבועי, אורך צלע הריבוע הוא כ- 10.6 km . ברור שפתרון זה אינו אפשרי מבחינה טכנולוגית. בהמשך, בסעיף 6.8 נראה כיצד ניתן לייצור קבלים בעלי קיבול נדרש באמצעות לוחות בגודל סביר.

דוגמה 3

הקיבול של קבל לוחות הוא $1\mu F$, המרווח בין הלוחות 1cm , והמתח ביניהם 100V .

א. חשב את המטען על כל אחד מהלוחות.

ב. חשב את עוצמת השדה החשמלי בין הלוחות.

פתרון:

א. מהביטוי להגדרת הקיבול ניתן לרשום:

$$q = CV = 10^{-6} \cdot 100 = 10^{-4} \text{ C}$$

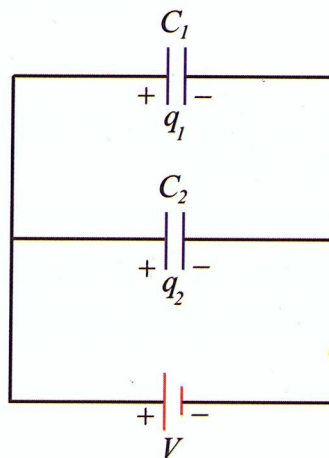
ב. עוצמת השדה החשמלי היא היחס בין המתח לבין המרווח בין הלוחות:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{100}{0.01} = 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

6.4 צירוף קבלים - חיבור קבלים במקביל

באיור מתוארים שני קבלים C_1 ו- C_2 מחוברים במקביל למקור מתח. במעגל זה המתח על כל אחד מהקבלים זהה למתח המקור V .

$$V_1 = V_2 = V$$



איור 6: שני קבלים מחוברים במקביל למקור מתח

תהליך הטעינה והפריקה של הקבל יפורט בהמשך בסעיף 6.9. למרות זאת, משיקולים של ראיית התמונה הכוללת, נביא כאן תיאור מתומצת של תהליך הצטברות המטענים בקבל. כאשר הקבלים חוברים למעגל, הקבלים נטענו. בתהליך זה אלקטרונים נגרעו מלוח הקבל המחובר להדק החיובי של הסוללה והתווספו ללוח המחובר להדק השלילי של הסוללה. בסוף תהליך הטעינה, על הלוח הימני הצטבר מטען שלילי, ועל הלוח השמאלי הצטבר מטען חיובי.

כמות המטען על כל לוח היא q . מקור האנרגיה לפעולת הטעינה הוא בתהליך הכימי שמתרחש בסוללה. בתהליך זה מומרת אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית, וזו הופכת לאנרגיה פוטנציאלית של המטענים המופרדים בקבל. זרם המטענים במעגל נפסק עקב שוויון המתחים, כלומר המתח V בין לוחות הקבל משתווה למתח הדקי הסוללה. זהו המצב שהקבל מכיל על כל לוח את כמות המטען המרבית שסוללה זו מסוגלת לאגור בו.

למעשה, מטען חשמלי עבר מלוח אחד לשני בחוטים המוליכים המחברים את לוחות הקבל, אך יש לשים לב לכך שבמרווח שבין לוחות הקבל לא היה זרם בזמן טעינתו הודות לחומר המבודד שבין הלוחות.⁴

נסמן את מטעני הקבלים ב- q_1 ו- q_2 בהתאמה. הכמות הכוללת של המטען הנאגר בקבלים היא:

$$q_{TOTAL} = q_1 + q_2$$

המטען הכולל של קבלים מחוברים במקביל הוא סכום המטען שנאגר בכל אחד מהקבלים. עקב שוויון המתחים על הקבלים, המטען על הקבלים מקיים:

$$q_1 = C_1 V$$

$$q_2 = C_2 V$$

אפשר להחליף את שני הקבלים **בקבל שקול** יחיד- C_T שתפקידו במעגל יהיה זהה לתפקידם של שני הקבלים, כלומר הוא יכיל מטען q_{TOTAL} כאשר המתח עליו הוא V .

$$q_{TOTAL} = C_T V$$

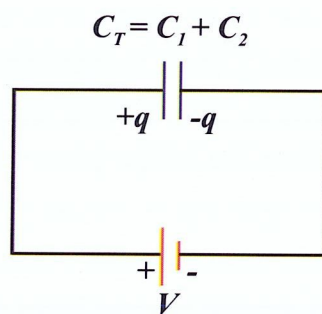
המטען על הקבל השקול שווה בערכו לסכום המטענים של הקבלים, לכן:

$$C_T V = C_1 V + C_2 V$$

ומכאן מתקבל הביטוי לקיבולו של הקבל השקול:

$$C_T = C_1 + C_2$$

⁴ החומר המבודד לעתים יהיה ריק או אוויר, בהמשך נתייחס לחומרים מבודדים נוספים.



איור 7: הקבל השקול לקבלים C_1 ו- C_2 המחוברים במקביל למקור מתח

ובהכללה, עבור n קבלים מחוברים במקביל מתקבל:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

אם הקבלים זהים מתקבל:

$$C_T = nC$$

סיכום חיבור קבלים בקביל

- הקיבול השקול הוא סכום כל אחד מקיבולי הקבלים שחוברו במקביל, לכן הקיבול השקול גדול מהקיבול של כל קבל יחיד במערך הקבלים.
- המתח על כל הקבלים זהה.
- המטען על הקבלים שחוברו במקביל נמצא ביחס ישר לקיבול, כלומר:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

דוגמה 4

שני קבלים שקיבולם $C_1 = 2\mu F$ ו $C_2 = 4\mu F$ מחוברים במקביל למקור מתח של 12V.

א. חשב את מטענו של כל קבל.

ב. חשב את קיבולו של הקבל השקול, את המתח עליו ואת מטענו.

פתרון:

א. המטענים על הקבלים הם:

$$q_1 = C_1 V = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 24\mu C$$

$$q_2 = C_2 V = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 48\mu C$$

ב. ערך הקיבול השקול הוא:

$$C_T = C_1 + C_2 = 6\mu F$$

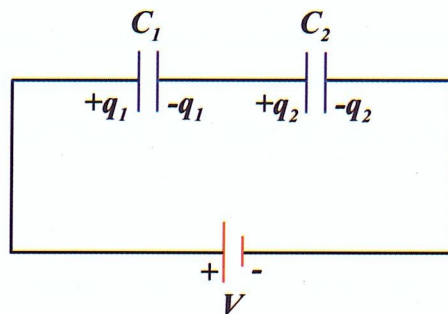
המתח על הקבל השקול זהה למתח על כל אחד מהקבלים, 12V.

המטען על הקבל השקול הוא:

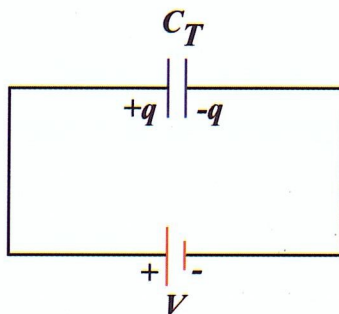
$$q_T = q_1 + q_2 = 72\mu C$$

6.5 צרף קבלים - חיבור קבלים בטור

באיור 8 משורטט מעגל חשמלי הכולל סוללה וזוג קבלים המחוברים בטור, ובאיור 9 משורטט המעגל השקול.



איור 8: שני קבלים מחוברים בטור למקור מתח



איור 9: המעגל השקול של המערכת באיור 8

במקרה זה, הלוח השמאלי של הקבל C_1 מחובר להדק החיובי של סוללה, והלוח הימני של הקבל C_2 מחובר להדק השלילי של הסוללה. שני הלוחות האחרים, הפנימיים, של הקבלים מחוברים ביניהם, אך הם מנותקים ממקור המתח. כתוצאה מכך מטענם הכולל יהיה אפס גם בסוף תהליך הטעינה, כפי שהיה בתחילה, בעת שצורפו למעגל. נעקוב אחר טעינת הקבלים מרגע סגירת המעגל, כאשר לוחות הקבלים ריקים ממטען עודף, עד אשר מסתיים תהליך הטעינה:

- עם סגירת המעגל נוצר הפרש פוטנציאלים בין לוחות הקבל, והתוצאה - אלקטרונים עוברים מהלוח השמאלי של C_1 ללוח הימני של C_2 דרך הסוללה, עד שהפרש הפוטנציאלים בין לוחות אלה משתווה למתח הסוללה. הלוח השמאלי של C_1 נטען במטען $+q$, והלוח הימני של C_2 נטען במטען $-q$.
- בין שני הלוחות הללו נוצר שדה חשמלי שכיוונו ימינה: מהלוח השמאלי של C_1 אל הלוח הימני של הקבל C_2 .