עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 3, סתיו

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם קורס סמסטריאלי לשנה ב' בניתוח מעגלים עם מעבדה. הוא מבוסס על הנושאים והעומק של MIT 6.002 Circuits and Electronics (חינמי ב-MIT OpenCourseWare), Georgia Tech ECE 2040 Circuit Analysis ו-Purdue ECE 20001 Electrical Engineering Fundamentals I, ועל ספר הלימוד החינמי OpenStax University Physics Volume 2 וסימולציות PhET, שאליהם אנו מקשרים כשהם עוזרים. אף אחד מהמחברים או המוסדות האלה אינו תומך בדף זה.

מה שאנחנו מוסיפים: כל יחידה מקושרת לעבודה אמיתית באנרגיה נקייה עם מקור ציבורי מצוטט (תאורת LED, פאנלים סולאריים וממירים, אגירה בסוללות, טעינת רכבים חשמליים, מרכזי נתונים ורשת החשמל), כל מספר בדף מחושב מחדש על ידי סקריפט בדיקה לפני שהוא עולה לאוויר, ולכל מעבדה יש סימולציית PhET חינמית או גרסה ביתית בטוחה במתח נמוך.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

מעגלים הם הדרך שבה אנרגיה נקייה מגיעה לאנשים. פאנלים סולאריים מפיקים זרם ישר שממירים הופכים לזרם חילופין, סוללות אוגרות אותו, שנאים וקווי חשמל מובילים אותו, ותאורה, מנועים ומטענים יעילים משתמשים בו.

כל אחוז של הפסד בחוט, בשנאי או בממיר הוא אנרגיה שהיה צריך לייצר במקום כלשהו. הניתוח בקורס הזה הוא מה שמהנדסים משתמשים בו כדי לצמצם את ההפסדים האלה. כל יחידה מסתיימת בפרק קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (ENGR 214 + ENGR 214L).

- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.
- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- פיזיקה II: מטען, שדה חשמלי, פוטנציאל, זרם, התנגדות, קיבול, השראות וחוק פאראדיי.
- חדו״א I ו-II: נגזרות ואינטגרלים; יחידות 7 ו-8 פותרות משוואות דיפרנציאליות מסדר ראשון ושני.
- מספרים מרוכבים (חזרה ביחידה 9) לפאזורים; אלגברה ליניארית עוזרת במשוואות הצמתים והחוגים.
- את משוואות דיפרנציאליות אפשר ללמוד במקביל לקורס הזה.

איך ללמוד

- שרטטו ותייגו קודם את המעגל: מתחי צמתים, זרמי ענפים עם חצים, וסימני קוטביות על כל רכיב.
- השתמשו במוסכמת הסימן הפסיבית: זרם הנכנס בהדק + פירושו שהרכיב צורך הספק.
- כתבו את חוק הזרמים של קירכהוף בצמתים או את חוק המתחים לאורך החוגים, ספרו נעלמים ומשוואות, ואז פתרו (ביד עבור 2×2, במטריצות למעלה מזה).
- בדקו כל תשובה: ההספק הנצרך חייב להיות שווה להספק המסופק, והגבולות ($t = 0$, $t \to \infty$, $\omega \to 0$ או ∞) חייבים להיות הגיוניים.
- השתמשו ביחידות SI: V, A, Ω, W, F, H, s, ושימו לב לתחיליות (mA, kΩ, μF, mH).
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציות PhET החינמיות (הן רצות בדפדפן).
- מולטימטר דיגיטלי (דגמים זולים מודדים V, A ו-Ω).
- מטריצת חיבורים ללא הלחמה, חוטי גישור, תושבת סוללות AA × 2 (3 V) וסוללות AA.
- נגדים (100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ), קבל 1000 μF המדורג ל-6.3 V לפחות, ונורות LED.
- רשות: מד הספק לשקע להשוואת נורות ומכשירים (הוא מתחבר לשקע בקיר; אל תפתחו אותו).
- משקפי מגן, שעון עצר או טלפון, ותוכנת גיליון אלקטרוני.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	משתני מעגל ורכיבים: מטען, זרם, מתח, הספק, אנרגיה וחוק אוהם	מטען, זרם, מתח, הספק, מוסכמת סימן, מקורות	MIT 6.002; OpenStax UP2 9.4
2	משתני מעגל ורכיבים: מטען, זרם, מתח, הספק, אנרגיה וחוק אוהם	חוק אוהם, התנגדות סגולית, אנרגיה ב-kWh; מעבדה A	UP2 9.4, 10.1
3	חוקי קירכהוף, נגדים בטור ובמקביל, ומחלקי מתח וזרם	חוקי הזרמים והמתחים, טור ומקביל, מחלקים, מכשירי מדידה; מעבדה B	UP2 10.2–10.3
4	ניתוח שיטתי: שיטת מתחי הצמתים ושיטת זרמי החוגים	שיטת מתחי הצמתים וסופר-צמתים	MIT 6.002
5	ניתוח שיטתי: שיטת מתחי הצמתים ושיטת זרמי החוגים	שיטת זרמי החוגים, סופר-חוגים, מקורות תלויים	MIT 6.002; UP2 10.3
6	משפטי מעגלים: ליניאריות, סופרפוזיציה, המרת מקורות, תבנין, נורטון והעברת הספק מרבית	סופרפוזיציה, המרת מקורות, תבנין, נורטון, הספק מרבי; מעבדה C	MIT 6.002
7	מגברי שרת	מגברי שרת; תרגול לבוחן אמצע	MIT 6.002
8	קבלים וסלילים	קבלים, סלילים, אנרגיה, אינטגרטורים	UP2 8.1, 14.2
9	מעגלים מסדר ראשון: מעברים במעגלי RC ו-RL	תגובות טבעיות ותגובות מדרגה של RC ו-RL	UP2 10.5, 14.4
10	מעגלים מסדר ראשון: מעברים במעגלי RC ו-RL	בעיות מיתוג ואנרגיית מיתוג דיגיטלי; מעבדה D	MIT 6.002
11	מעגלים מסדר שני: תגובה טבעית ותגובת מדרגה של מעגלי RLC	RLC בטור ובמקביל, ריסון, תנודת LC	UP2 14.5–14.6
12	מצב מתמיד סינוסי: פאזורים ואימפדנס	סינוסואידות, פאזורים, אימפדנס	UP2 15.2–15.3
13	מצב מתמיד סינוסי: פאזורים ואימפדנס	ניתוח צמתים, חוגים ותבנין בזרם חילופין, מסננים; מעבדה E	MIT 6.002; UP2 15.3, 15.5
14	הספק בזרם חילופין, מקדם הספק, תהודה, שנאים ומערכות תלת-פאזיות	הספק בזרם חילופין, מקדם הספק, שנאים, תלת-פאזי; מעבדה F	UP2 15.4–15.6
15	חזרה	חזרה וסדרת תרגול מסכמת	כל היחידות

ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

יחידות

משתני מעגל ורכיבים: מטען, זרם, מתח, הספק, אנרגיה וחוק אוהם

מטען וזרם, מתח כאנרגיה ליחידת מטען, הספק ואנרגיה, מוסכמת הסימן הפסיבית, מקורות אידיאליים בלתי תלויים ותלויים, התנגדות והתנגדות סגולית, חוק אוהם והספק בנגדים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- קשרו בין מטען, זרם, מתח, הספק ואנרגיה ביחידות הנכונות.
- הפעילו את מוסכמת הסימן הפסיבית כדי לקבוע אם רכיב צורך הספק או מספק אותו.
- השתמשו בחוק אוהם וב-R = ρL/A.
- חשבו צריכת אנרגיה ב-kWh והשוו בין מכשירים.

מושגי מפתח

- זרם הוא קצב זרימת המטען, i = dq/dt, באמפר (1 A = 1 C/s). מתח הוא אנרגיה ליחידת מטען בין שתי נקודות, בוולט (1 V = 1 J/C).
- הספק p = vi. לפי מוסכמת הסימן הפסיבית (הזרם נכנס בהדק +), p > 0 פירושו שהרכיב צורך הספק ו-p < 0 שהוא מספק הספק. בכל מעגל, סך ההספק הנצרך = סך ההספק המסופק.
- מקור מתח אידיאלי שומר על המתח שלו בכל זרם; מקור זרם אידיאלי שומר על הזרם שלו בכל מתח. מקורות תלויים נשלטים על ידי מתח או זרם במקום אחר וממדלים טרנזיסטורים ומגברים.
- חוק אוהם v = iR. נגד תמיד צורך הספק p = i²R = v²/R. התנגדות של חוט R = ρL/A גדלה עם האורך וקטנה עם שטח החתך; המוליכות G = 1/R נמדדת בסימנס.
- אנרגיה w = ∫p dt; בהספק קבוע w = Pt. חברות החשמל מחייבות בקילוואט-שעה: 1 kWh = 3.6 MJ.

משוואות מפתח

$$i = \frac{dq}{dt}$$

```
i=dq/dt
```

זרם

$$p = vi$$

```
p=vi
```

הספק

$$v = iR,\ \ p = i^2R = \frac{v^2}{R}$$

```
v=iR,\ \ p=i^2R=(v^2)/(R)
```

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

R=(ρ L)/(A)

התנגדות של מוליך

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 תנור חימום של 4 Ω מחובר ל-12 V. מצאו את הזרם ואת ההספק.

1. $i = v/R = 12/4 = 3$ A.
2. $p = vi = 12 \times 3$.

תשובה: $i = 3$ A, $p = 36$ W.

דוגמה 1.2 מצאו את ההתנגדות של 10 m חוט נחושת בחתך 1 mm² ($\rho = 1.68 \times 10^{-8}$ Ω·m).

1. $A = 1\ \text{mm}^2 = 1 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$.
2. $R = \rho L/A = 1.68 \times 10^{-8} \times 10/10^{-6}$.

תשובה: $R = 0.168$ Ω.

דוגמה 1.3 נורת ליבון של 60 W מוחלפת בנורת LED שצורכת 75% פחות אנרגיה. שתיהן פועלות 3 שעות ביום במשך שנה. מצאו את האנרגיה שנחסכה.

1. הספק ה-LED = $0.25 \times 60 = 15$ W.
2. ליבון: $65.7\ \text{kWh} = 65700\ \text{Wh} = 365 \times 3 \times 60$; LED: 16.4 kWh.

תשובה: כ-49.3 kWh נחסכים לכל נורה בשנה.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. זרם של 2 A זורם במשך 30 s. כמה מטען עובר?

   $q = it = 60$ C.

2. מנורה צורכת 0.5 A מ-120 V. מצאו את ההספק ואת ההתנגדות שלה.

.p = 60 W, R = 240 Ω

3. לרכיב v = 5 V ו-i = −2 A הנכנס בהדק +. האם הוא צורך הספק או מספק?

.p = −10 W: הוא מספק 10 W

4. כמה ג׳אול יש ב-2 kWh?

.7.2 × 10⁶ J

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: נגד צורך זרם.

בפועל: המטען נשמר; אותו זרם שנכנס יוצא. מה שמומר הוא אנרגיה, לא זרם.

מיתוס: מתח קיים בנקודה.

בפועל: מתח הוא תמיד בין שתי נקודות; "מתח צומת" נמדד ביחס לאדמה שנבחרה.

מיתוס: הספק הוא תמיד vi עם סימן חיובי.

בפועל: השתמשו במוסכמת הסימן הפסיבית כדי לקבל את הסימן הנכון.

כרטיסיות

זרם

i = dq/dt, ב-A.

מתח

אנרגיה ליחידת מטען, ב-V = J/C.

הספק

p = vi.

מוסכמת הסימן הפסיבית

זרם נכנס בהדק +: p > 0 פירושו צריכה.

חוק אוהם

v = iR.

kWh

3.6 MJ.

בוחן לבדיקה עצמית

1 A שווה ל…

1 J/s

1 C/s

1 V/s

1 W/V²

1 C/s. מטען בשנייה.

2. הכפלת המתח על נגד פי שניים מגדילה את ההספק שלו פי…

1

2

4

½

4. $p = v^2/R$.

3. הכפלת אורך חוט פי שניים (באותו חתך) משנה את ההתנגדות שלו פי…

½

1

2

4

2. $R = \rho L/A$.

4. 1 kWh שווה ל…

1000 J

3600 J

3.6 MJ

60 kJ

3.6 MJ. $1000\ W \times 3600\ s$.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

תאורה היא המקום הפשוט ביותר לראות הספק ואנרגיה בפעולה. המדריך לתאורה חסכונית באנרגיה של משרד האנרגיה האמריקאי אומר שנורות LED צורכות לפחות 75 אחוז פחות אנרגיה מנורות ליבון, כמעט אינן פולטות חום ומחזיקות מעמד פי 25 יותר.

בעזרת p = vi ו-w = Pt, הדוגמה הפתורה מראה מה זה אומר לנורה אחת: החלפת נורת ליבון של 60 W בנורת LED של 15 W, בשימוש 3 שעות ביום, חוסכת כ-49.3 kWh בשנה. הכפילו בעשרות הנורות בבית ובמיליוני הבתים במדינה, ותחנות הכוח שלעולם לא יצטרכו לפעול נעשות גלויות.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2 · פתרונות

מקורות: U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · OpenStax UP2, 9.4 Ohm’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 9.4 Ohm’s law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על הפשטת המעגל וחוק אוהם.
- PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): אינטראקטיבי.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): מקורות והתנגדות פנימית.

צפו בהרצאה

Lecture 22: Energy and Power (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-22/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

חוקי קירכהוף, נגדים בטור ובמקביל, ומחלקי מתח וזרם

צמתים, ענפים ולולאות, חוקי הזרמים והמתחים של קירכהוף, חיבורים בטור ובמקביל, התנגדות שקולה, מחלקי מתח וזרם, המרות משולש–כוכב, ומדידה במדי מתח ובמדי זרם.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- כתבו את חוקי הזרמים והמתחים לכל מעגל.
- צמצמו רשתות טור–מקביל להתנגדות שקולה.
- השתמשו במחלקי מתח וזרם.
- הסבירו כיצד מחברים מכשירי מדידה וכיצד הם מעמיסים על מעגל.

מושגי מפתח

- חוק הזרמים: סכום הזרמים היוצאים מכל צומת הוא אפס (המטען נשמר). חוק המתחים: סכום המתחים לאורך כל לולאה סגורה הוא אפס (האנרגיה נשמרת).
- ברכיבים בטור עובר אותו זרם; ההתנגדויות מתחברות: R_eq = R₁ + R₂ + …. על רכיבים במקביל אותו מתח; המוליכויות מתחברות: 1/R_eq = 1/R₁ + 1/R₂ + …; עבור שני נגדים (R₁R₂/(R₁ + R₂).
- מחלק מתח: v₂ = v·R₂/(R₁ + R₂). מחלק זרם (שני נגדים): i₁ = i·R₂/(R₁ + R₂)؛ החלק הגדול עובר דרך הנגד הקטן.
- המרת משולש–כוכב (Δ–Y) מטפלת בגשרים שאינם בטור ואינם במקביל: R_Y = (מכפלת שני נגדי ה-Δ הסמוכים)/(סכום שלושתם).
- מד מתח מחובר במקביל וצריך התנגדות גבוהה מאוד; מד זרם מחובר בטור וצריך התנגדות נמוכה מאוד.

משוואות מפתח

$$\sum i_{\text{out}} = 0$$

```
i_out=0
```

KCL

$$\sum v = 0 \text{ around a loop}$$

```
v=0\ around a loop
```

KVL

$$R_s = R_1 + R_2, \;\; R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

```
R_s=R_1+R_2,\ \ R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)
```

טור ומקביל

$$v_2 = v\frac{R_2}{R_1+R_2},\ \ i_1 = i\frac{R_2}{R_1+R_2}$$

```
v_2=v(R_2)/(R_1+R_2),\ \ i_1=i(R_2)/(R_1+R_2)
```

מחלקי מתח וזרם

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 נגדים של 100, 200 ו-300 Ω מחוברים בטור על 12 V. מצאו את הזרם ואת המתח על הנגד של 200 Ω.

1. $R_{eq} = 600\ \Omega$; $i = 12/600 = 0.02$ A.
2. $v = 0.02 \times 200$.

תשובה: $i = 20$ mA, $v_{200} = 4$ V.

דוגמה 2.2 מקור של 9 V מזין מחלק עם $R_1 = 10\ k\Omega$ למעלה ו-$R_2 = 5\ k\Omega$ למטה. מצאו את v_{out} על R_2.

1. $v_{out} = 9 \times 5/(10+5)$.

תשובה: $v_{out} = 3$ V.

דוגמה 2.3 זרם של 6 A מתפצל בין 2 Ω ו-4 Ω במקביל. מצאו כל זרם.

1. $i_{2\Omega} = 6 \times 4/(2+4) = 4$ A.
2. $i_{4\Omega} = 6 \times 2/6 = 2$ A; בדיקה $2 + 4 = 6$.

תשובה: 4 A דרך 2 Ω ו-2 A דרך 4 Ω.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את $3\ \Omega \parallel 6\ \Omega$.

   $18/9 = 2\ \Omega$.

2. שלושה נגדים של 30 Ω במקביל. מצאו את R_{eq}.

   $10\ \Omega$.

3. מצאו את R_{eq} של 10 Ω בטור עם $(20\ \Omega \parallel 20\ \Omega)$.

.10 + 10 = 20 Ω

4. שלושה זרמים נכנסים לצומת: 2 A, 3 A ו-1 A−. איזה זרם יוצא?

.4 A

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: התנגדות במקביל גדולה מהנגד הקטן ביותר.

בפועל: היא תמיד קטנה מהקטן ביותר.

מיתוס: מחלק מתח עובד עם כל עומס.

בפועל: עומס על R_2 מחובר אליו במקביל ומוריד את v_out אלא אם ההתנגדות שלו גדולה בהרבה.

מיתוס: מד זרם מחובר על פני הרכיב.

בפועל: מד זרם בעל התנגדות נמוכה על פני הרכיב הוא כמעט קצר; הוא מחובר בטור.

כרטיסיות

KCL

סכום הזרמים היוצאים מצומת הוא 0.

KVL

סכום המתחים לאורך לולאה הוא 0.

טור

התנגדויות מתחברות; אותו זרם.

מקביל

מוליכויות מתחברות; אותו מתח.

מחלק מתח

$v_2 = vR_2/(R_1 + R_2)$.

מחלק זרם

$i_1 = iR_2/(R_1 + R_2)$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. חוק הזרמים של קירכהוף מבטא שימור של…

אנרגיה

מטען

הספק

שטף

מטען. מטען אינו יכול להצטבר בצומת.

2. שני נגדים שווים R במקביל נותנים...

2R

R

R/2

R²

.R/2. R·R/(2R)

3. לרכיבים בטור משותף אותו...

מתח

הזרם

הספק

ההתנגדות

הזרם. מסלול אחד.

4. למד מתח אידיאלי התנגדות...

אפס

אינסופית

1 Ω

שווה לעומס

אינסופית. אסור לו למשוך זרם.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

פאנלים סולאריים הם מעגלי טור ומקביל. מינהל מידע האנרגיה של ארה"ב (EIA) מסביר שתא PV אחד יכול להפיק רק 1 או 2 ואט, ולכן תאים מחוברים חשמלית בפאנלים אטומים למזג אוויר, פאנלים מחוברים למערכים של שניים עד מאות פאנלים, ומספר הפאנלים קובע כמה חשמל מערך יכול לייצר. התאים מפיקים זרם ישר, וממירים הופכים אותו לזרם החילופין שמשמש ברשת.

חיבור בטור מחבר מתחים וחיבור במקביל מחבר זרמים. לדוגמה, תאים של 0.5 V ו-3 A (1.5 W, בטווח 1–2 W של EIA) נותנים 30 V ב-3 A, כלומר 90 W, כש-60 מהם מחוברים בטור. חוקי קירכהוף מסבירים גם מדוע תא מוצל אחד בשרשרת טורית יכול להוריד את כל השרשרת, ולכן בפאנלים יש דיודות עקיפה.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2 · Parker Solar Probe

מקורות: OpenStax · U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): חוקי הזרמים והמתחים.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות בניתוח מעגלים בסיסי.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): אינטראקטיבי.

סיימתי את היחידה הזו

ניתוח שיטתי: שיטת מתחי הצמתים ושיטת זרמי החוגים

בחירת צומת ייחוס, כתיבת חוק הזרמים במונחי מתחי צמתים, סופר-צמתים, זרמי חוגים וחוק המתחים, סופר-חוגים, מעגלים עם מקורות תלויים, ופתרון המערכות הליניאריות המתקבלות ביד ובמטריצות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- כתבו ופתרו משוואות מתחי צמתים, כולל סופר-צמתים.
- כתבו ופתרו משוואות זרמי חוגים, כולל סופר-חוגים.
- טפלו במקורות תלויים בשתי השיטות.
- בחרו את השיטה שנותנת פחות משוואות.

מושגי מפתח

- שיטת מתחי הצמתים: בחרו צומת אדמה, תנו שמות למתחי הצמתים האחרים, כתבו את חוק הזרמים בכל צומת שאינו צומת הייחוס בעזרת חוק אוהם (הזרם מ-a ל-b דרך R הוא (v_a − v_b)/R), ופתרו.
- מקור מתח בין שני צמתים שאינם צומת הייחוס יוצר סופר-צומת: כתבו משוואת זרמים אחת לאזור המשולב ועוד את משוואת המקור v_a − v_b = V_s.
- שיטת זרמי החוגים (מעגלים מישוריים): הקצו זרם בכיוון השעון לכל חלון, וכתבו את חוק המתחים לאורך כל חוג; בנגד משותף עובר ההפרש בין שני זרמי החוגים.
- מקור זרם המשותף לשני חוגים יוצר סופר-חוג: משוואת מתחים אחת לאורך הלולאה המשולבת ועוד את משוואת המקור.
- מעגל עם N צמתים צריך N − 1 משוואות צמתים; מעגל עם M חוגים צריך M משוואות חוגים. בחרו בקבוצה הקטנה. המשוואות יוצרות Gv = i או Ri = v, מערכת ליניארית.

משוואות מפתח

$$\sum_{\text{branches}} \frac{v_n - v_k}{R_{nk}} = i_{\text{source into } n}$$

_branches_n-v_kR_nk=i_source into n

חוק הזרמים בצומת n

$$\sum_{\text{mesh}} R\,(i_m - i_{\text{adj}}) = \sum v_{\text{sources}}$$

_mesh R (i_m-i_adj)= v_sources

חוק המתחים לאורך חוג m

$$G\mathbf{v} = \mathbf{i}$$

צורה מטריציונית של צמתים

$$R\mathbf{i} = \mathbf{v}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 מקור של 10 V מזין את צומת 1 דרך 2 Ω. לצומת 1 יש 4 Ω לאדמה ו-2 Ω לצומת 2; לצומת 2 יש 4 Ω לאדמה ומקור של 1 A שזורם לתוכו. מצאו את v_1 ואת v_2.

1. צומת 1: $(v_1 - 10)/2 + v_1 + (v_1 - v_2)/2 = 0$, ולכן $5v_1 - 2v_2 = 20$.
2. צומת 2: $(v_2 - v_1)/2 + v_2 - 4 = 0$, ולכן $-2v_1 + 3v_2 = 4$.
3. $\det = 15 - 4 = 11$; $v_1 = (60 + 8)/11$, $v_2 = (40 + 20)/11$.

תשובה: $v_1 = 6.182$ V, $v_2 = 5.455$ V.

דוגמה 3.2 בחוג 1 יש מקור של 10 V ו-2 Ω; בחוג 2 יש 6 Ω; החוגים חולקים 4 Ω. מצאו את זרמי החוגים ואת הזרם בנגד המשותף.

1. חוג 1: $6i_1 - 4i_2 = 10$. חוג 2: $-4i_1 + 10i_2 = 0$.
2. $\det = 60 - 16 = 44$; $i_1 = 100/44$, $i_2 = 40/44$.

תשובה: $i_1 = 2.273$ A, $i_2 = 0.909$ A; בנגד המשותף עובר 1.364 A.

דוגמה 3.3 מקור של 5 V נמצא בין הצמתים a ו-b ($v_a - v_b = 5$). לצומת a יש 1 Ω לאדמה, לצומת b יש 4 Ω לאדמה, ו-2 A מוזרמים לסופר-צומת. מצאו את v_a ואת v_b.

1. חוק הזרמים לסופר-צומת: $v_a/1 + v_b/4 = 2$.
2. הציבו $v_a = v_b + 5$: $v_b + 5 + v_b/4 = 2$, ולכן $1.25v_b = -3$.

תשובה: $v_a = 2.6$ V, $v_b = -2.4$ V.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. כמה משוואות צמתים צריך מעגל עם 5 צמתים?

   .4

2. צומת יחיד במתח v מחובר דרך 2 Ω ל-6 V ודרך 2 Ω לאדמה. מצאו את v.

$(v - 6)/2 + v/2 = 0$: $v = 3$ V.

3. שני חוגים חולקים נגד של 3 Ω; $i_1 = 2$ A ו-$i_2 = 0.5$ A, שניהם בכיוון השעון. מצאו את הזרם בנגד המשותף.

   1.5 A בכיוון של i_1.

4. כתבו את $5v_1 - 2v_2 = 20$,$-2v_1 + 3v_2 = 4$ בצורה $Gv = i$.

   $G = [[5, -2], [-2, 3]]$, $i = (20, 4)$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: אפשר לכתוב את חוק הזרמים גם בצומת הייחוס.
בפועל: זה נותן משוואה תלויה; השתמשו ב-$N - 1$ צמתים.

מיתוס: זרמי החוגים הם זרמי הענפים.
בפועל: רק בענפים החיצוניים; בענפים משותפים עוברים הפרשים.

מיתוס: הזרם של מקור מתח הוא אפס כי אין לו התנגדות.
בפועל: הזרם שלו נקבע על ידי שאר המעגל; לכן משתמשים בסופר-צמתים.

כרטיסיות

צומת ייחוס

אדמה, $v = 0$.

שיטת מתחי הצמתים

חוק הזרמים ב-$N - 1$ צמתים.

סופר-צומת

מקור מתח בין שני צמתים.

שיטת זרמי החוגים

חוק המתחים לאורך כל חלון.

סופר-חוג

מקור זרם המשותף לשני חוגים.

$Gv = i$

משוואות צמתים בצורה מטריציונית.

בוחן לבדיקה עצמית

1. כמה משוואות מתחי צמתים צריך מעגל עם 4 צמתים?

2

3

4

5

3. $N - 1$.

2. מקור מתח בין שני צמתים שאינם צומת הייחוס מחייב…

סופר-חוג

סופר-צומת

קצר

סופרפוזיציה

סופר-צומת. אחדו את שני הצמתים.

3. הזרם בנגד המשותף לחוגים 1 ו-2 הוא…

$i_1 + i_2$

$i_1 - i_2$

$i_1 i_2$

אפס

$i_1 - i_2$. שניהם זורמים בכיוון השעון בחוג שלהם.

4. משוואות הצמתים יוצרות…

משוואה דיפרנציאלית

מערכת ליניארית $Gv = i$

משוואה ריבועית

רק דטרמיננטה

מערכת ליניארית $Gv = i$. מעגלים התנגדותיים ליניאריים הם מערכות ליניאריות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

רשת החשמל היא בעיית ניתוח צמתים עצומה. EIA מסביר שרשת ארה"ב מורכבת מאלפי מיילים של קווי מתח גבוה וממיליוני מיילים של קווי מתח נמוך המחברים אלפי תחנות כוח למאות מיליוני צרכנים. בתחילת המאה ה-20 פעלו יותר מ-4000 חברות חשמל מבודדות; כיום 48 המדינות הרציפות פועלות כשלוש רשתות מקושרות עיקריות, המזרחית, המערבית ו-ERCOT, המחוברות כדי לספק מסלולים מרובים לזרימת החשמל.

EIA מציין שההיצע חייב להתאים לביקוש בכל רגע ושרשויות איזון שומרות על ההתאמה. מפעילי הרשת עושים זאת במודלים של זרימת הספק שהמשוואות שלהם הן גרסת זרם החילופין של שיטת מתחי הצמתים ביחידה הזאת, הנפתרת עבור אלפי פסי צבירה, ואותו ניתוח אומר למתכננים היכן נדרשים קווים חדשים כדי לחבר רוח ושמש הרחק מהערים.

ב־Saving Planets: אלגברה לינארית · פתרונות

מקורות: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על שיטת הצמתים וסופרפוזיציה.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): מעגלים מרובי לולאות.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): בדקו את מתחי הצמתים שלכם.
- Interactive Linear Algebra (Georgia Tech) (https://textbooks.math.gatech.edu/ila/): פתרון המערכות הליניאריות.

צפו בהרצאה

Lecture 2: Basic Circuit Analysis Method (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-2/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

משפטי מעגלים: ליניאריות, סופרפוזיציה, המרת מקורות, תבנין, נורטון והעברת הספק מרבית

ליניאריות וסופרפוזיציה, המרות מקורות, מעגלים שקולים של תבנין ונורטון, מציאת R_Th בכיבוי מקורות או עם מקור בדיקה, ומשפט העברת ההספק המרבית.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו בסופרפוזיציה לניתוח מעגלים עם כמה מקורות.
- המירו בין מקורות מתח למקורות זרם.
- מצאו שקולי תבנין ונורטון.
- בחרו עומס להעברת הספק מרבית וחשבו את ההספק הזה.

מושגי מפתח

- ליניאריות: במעגל של נגדים ומקורות, כל מתח וזרם הוא צירוף ליניארי של ערכי המקורות. סופרפוזיציה: מצאו את התגובה לכל מקור בלתי תלוי לבדו (מקורות מתח אחרים מקוצרים, מקורות זרם פתוחים) וחברו.
- המרת מקורות: מקור מתח V בטור עם R שקול, בהדקיו, למקור זרם V/R במקביל ל-R.
- משפט תבנין: כל רשת ליניארית בעלת שני הדקים נראית כמו מקור V_Th בטור עם R_Th. V_Th הוא מתח הדקים פתוחים; R_Th היא ההתנגדות הנראית כשהמקורות הבלתי תלויים כבויים (או V_oc/i_sc).
- משפט נורטון: אותה רשת היא מקור זרם I_N = i_sc במקביל ל-R_N = R_Th; V_Th = I_N R_Th.
- העברת הספק מרבית: עומס מקבל את ההספק הגדול ביותר כאשר R_L = R_Th, ואז P_max = V_Th²/(4R_Th). הנצילות בנקודה זו היא רק 50%, ולכן מערכות הספק מתוכננות במקום זאת ל-R_L ≫ R_source.

משוואות מפתח

$$v = \sum_{k} v^{(k)}$$

`v=_k v^(k)`

סופרפוזיציה

$$V_{Th} = v_{oc},\ \ R_{Th} = \frac{v_{oc}}{i_{sc}}$$

`V_Th=v_oc,\ \ R_Th=_oci_sc`

שקול תבנין

$$I_N = \frac{V_{Th}}{R_{Th}}$$

I_N=_ThR_Th

זרם נורטון

$$P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}} \text{ at } R_L = R_{Th}$$

P_=_Th^24R_Th\ at\ R_L=R_Th

העברת הספק מרבית

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 מקור של 12 V בטור עם 4 Ω מזין את ההדקים a–b, עם 12 Ω בין a ל-b. מצאו את שקולי תבנין ונורטון.

1. V_Th = 12 × 12/(4 + 12) = 9 V (מחלק).
2. R_Th = 4 Ω ∥ 3 Ω = 48/16 = 12 (המקור מקוצר).
3. I_N = 9/3.

תשובה: V_Th = 9 V, R_Th = 3 Ω; I_N = 3 A.

דוגמה 4.2 עבור המעגל הזה, מצאו את ההספק לעומס של 6 Ω ואת הספק העומס המרבי האפשרי.

1. i = 9/(3 + 6) = 1 A; P = 1² × 6 = 6 W.
2. מרבי ב-R_L = 3 Ω: P_max = 9²/(4 × 3).

תשובה: 6 W; P_max = 6.75 W ב-3 Ω.

דוגמה 4.3 צומת מחובר למקור של 10 V דרך 5 Ω, לאדמה דרך 5 Ω, ומקבל מקור זרם של 2 A. מצאו את מתח הצומת בסופרפוזיציה.

1. 10 V לבד (2 A פתוח): המחלק נותן 5 V.
2. 2 A לבד (10 V מקוצר): 2 × (5 ∥ 5) = 5 V.
3. חברו את השניים.

תשובה: v = 10 V. בדיקה בחוק הזרמים: 10/5 + 2 = (10 − 10)/5.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. המירו מקור של 6 V בטור עם 2 Ω לצורת נורטון.

3 A במקביל ל-2 Ω.

2. לרשת v_oc = 15 V ו-i_sc = 5 A. מצאו את R_Th.

3 Ω.

3. איזה עומס מקבל הספק מרבי מ-V_Th = 20 V, R_Th = 5 Ω, וכמה?

R_L = 5 Ω, P = 400/20 = 20 W.

4. האם סופרפוזיציה יכולה לחבר הספקים?

לא: הספק אינו ליניארי; חברו מתחים או זרמים, ואז חשבו הספק.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: כיבוי מקור מתח פירושו הסרתו.

בפועל: החליפו אותו בקצר; מקור זרם הופך לנתק.

מיתוס: העברת הספק מרבית פירושה נצילות מרבית.

בפועל: ב-R_L = R_Th מחצית מההספק הולכת לאיבוד ב-R_Th.

מיתוס: מקורות תלויים מכובים לחישוב R_Th.

בפועל: השאירו את המקורות התלויים; השתמשו במקור בדיקה כדי למצוא את R_Th.

כרטיסיות

סופרפוזיציה

חברו את התגובות לכל מקור לבדו.

המרת מקורות

V בטור עם R ↔ V/R במקביל ל-R.

תבנין

V_Th בטור עם R_Th.

נורטון

I_N במקביל ל-R_N.

R_Th

v_oc/i_sc.

הספק מרבי

R_L = R_Th ב-V_Th²/(4R_Th).

בוחן לבדיקה עצמית

1. כדי למצוא את R_Th, מקורות מתח בלתי תלויים מוחלפים ב…

נתקים

קצרים

נגדים

מקורות זרם

קצרים. אפס וולט הוא קצר.

2. V_Th הוא…

זרם הקצר

מתח הדקים פתוחים

תמיד מתח המקור

מתח העומס

מתח הדקים פתוחים. נמדד כשדבר אינו מחובר.

3. העברת הספק מרבית מתרחשת כאשר…

R_L = 0

R_L = R_Th

R_L → ∞

R_L = 2R_Th

R_L = R_Th. עומס מותאם.

4. הנצילות בהעברת הספק מרבית היא…

25%

50%

75%

100%

50%. הספק שווה ב-R_Th וב-R_L.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

תאים סולאריים מתנהגים כמקורות שנקודת העבודה שלהם, בסגנון תבנין, משתנה עם אור השמש והטמפרטורה, ולכן האלקטרוניקה שלהם מחפשת כל הזמן את העומס שמושך את ההספק הגדול ביותר. החלק של אור השמש שהם הופכים לחשמל השתפר בהתמדה: EIA מדווח שלפאנלי PV מסחריים הייתה נצילות ממוצעת של פחות מ-10% באמצע שנות ה-1980, כ-15% עד 2015, וכיום היא מתקרבת ל-25% במודולים המתקדמים ביותר, בעוד שתאים ניסיוניים ותאי חלל הגיעו לכמעט 50%.

EIA מדווח גם שתחנות PV בקנה מידה של חברות חשמל בארה"ב ייצרו כ-292 מיליארד kWh ב-2025, לעומת 6 מיליון kWh ב-2004, ומערכות גג קטנות כ-93 מיליארד kWh. התאמת כל שרשרת פאנלים לנקודת העבודה הטובה ביותר שלה, הרעיון שמאחורי העברת הספק מרבית, היא חלק מהדרך שבה סוחטים את הקילוואט-שעות האלה מכל מטר רבוע.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2 · חלל

מקורות: MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/) · U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על שקולי תבנין ונורטון.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): התנגדות פנימית ומתח הדקים.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): מדדו את v_oc ואת i_sc.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): התנגדות שקולה.

צפו בהרצאה

Lecture 3: Superposition, Thévenin and Norton (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-3/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

מגברי שרת

מגבר השרת האידיאלי ושני הכללים שלו, מגברים מהפכים ולא מהפכים, עוקבי מתח, מגברי סכימה והפרש, רוויה, שלבים מדורגים, ומגברי שרת בחיישנים ובמדידה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- הפעילו את כללי מגבר השרת האידיאלי עם משוב שלילי.
- נתחו מעגלים מהפכים, לא מהפכים, עוקבים, מסכמים ומפרישים.
- זהו רוויה ואת מגבלותיה.
- תכננו מגבר פשוט לאות של חיישן.

מושגי מפתח

- מגבר שרת מגביר את ההפרש בין הכניסות שלו בהגבר גדול מאוד. עם משוב שלילי, הכללים האידיאליים הם: אין זרם שנכנס לאף כניסה, ושני מתחי הכניסה שווים ($v_+ = v_-$).
- מגבר מהפך: $v_o = -(R_f/R_{in})v_{in}$. מגבר לא מהפך: $v_o = (1 + R_f/R_g)v_{in}$. עוקב מתח (חוצץ): $v_o = v_{in}$ כמעט בלי למשוך זרם מהמקור.
- מגבר סוכם: $v_o = -R_f(v_1/R_1 + v_2/R_2 + \dots)$. מגבר הפרש עם יחסים מותאמים: $v_o = (R_2/R_1)(v_2 - v_1)$.
- המוצא אינו יכול לעבור את מתחי ההזנה; מעבר להם המגבר נכנס לרוויה והכללים הליניאריים מפסיקים לחול.
- שלבים מדורגים מכפילים את ההגברים שלהם, ומכיוון שמוצא של מגבר שרת מתנהג כמו מקור מתח אידיאלי, שלב אינו מועמס על ידי השלב הבא.

משוואות מפתח

$$v_+ = v_-,\ \ i_+ = i_- = 0$$

`v_+=v_-,\ \ i_+=i_-=0`

כללי מגבר השרת האידיאלי (משוב שלילי)

$$v_o = -\frac{R_f}{R_{in}} v_{in}$$

`v_o=-_fR_inv_in`

מגבר מהפך

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) v_{in}$$

`v_o=(1+(R_f)/(R_g))v_in`

מגבר לא מהפך

$$v_o = -R_f \sum_k \frac{v_k}{R_k}$$

v_o=-R_f_k(v_k)/(R_k)

מגבר סוכם

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 למגבר מהפך $R_{in} = 10\ \text{k}\Omega$ ו-$R_f = 100\ \text{k}\Omega$. מצאו את ההגבר ואת v_o עבור $v_{in} = 0.2\ \text{V}$.

1. הגבר $= -100/10 = -10$.
2. $v_o = -10 \times 0.2$.

תשובה: $v_o = -2\ \text{V}$, הגבר -10.

דוגמה 5.2 תכננו מגבר לא מהפך עם הגבר 10 בעזרת $R_g = 1\ \text{k}\Omega$.

1. $1 + R_f/R_g = 10$, ולכן $R_f/R_g = 9$.

תשובה: $R_f = 9\ \text{k}\Omega$.

דוגמה 5.3 למגבר סוכם $R_f = R_1 = R_2 = 10\ \text{k}\Omega$, $v_1 = 1\ \text{V}$ ו-$v_2 = 2\ \text{V}$. מצאו את v_o. ומה אם מתחי ההזנה הם $\pm 12\ \text{V}$ וההגבר מוגדל כך שהתשובה האידיאלית היא $-15\ \text{V}$?

1. $v_o = -10\text{k}(1/10\text{k} + 2/10\text{k}) = -3\ \text{V}$.
2. המוצא אינו יכול לרדת מתחת למתח ההזנה של $-12\ \text{V}$.

תשובה: $v_o = -3\ \text{V}$; בהגבר הגבוה הוא נכנס לרוויה ליד $-12\ \text{V}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את ההגבר של מגבר מהפך עם $R_f = 47\ \text{k}\Omega$ ו-$R_{in} = 4.7\ \text{k}\Omega$.

   -10.

2. לעוקב מתח $v_{in} = 1.5\ \text{V}$. מצאו את v_o.

   $1.5\ \text{V}$.

3. שני שלבים עם הגברים 10− ו-5 מחוברים בטור. מצאו את ההגבר הכולל.

.−50

4. למגבר הפרש עם $R_2/R_1 = 4$ יש $v_2 = 1.2$ V ו-$v_1 = 1.0$ V. מצאו את v_o.

.$4 \times 0.2 = 0.8$ V

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: כניסות מגבר השרת מושכות את זרם המעגל.

בפועל: באופן אידיאלי אין זרם שנכנס לכניסות; הוא זורם דרך R_f.

מיתוס: $v_- = v_+$ תמיד.

בפועל: רק עם משוב שלילי וכשאין רוויה.

מיתוס: ההגבר יכול להיות גדול כרצונכם.

בפועל: המוצא מוגבל על ידי מתחי ההזנה ורוחב הסרט האמיתי של המגבר.

כרטיסיות

מגבר שרת אידיאלי

$v_- = v_+$, אין זרם כניסה.

מהפך

$-R_f/R_{in}$.

לא מהפך

$1 + R_f/R_g$.

עוקב

חוצץ בהגבר 1.

סוכם

$-R_f \Sigma\, v_k/R_k$.

רוויה

המוצא מוגבל על ידי מתחי ההזנה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. עם משוב שלילי, מגבר שרת אידיאלי יוצר…

$v_+ = 0$

$v_+ = v_-$

$v_o = 0$

i_o = 0

v_+ = v_−. קצר מדומה.

2. למגבר מהפך עם R_f = 20 kΩ, R_in = 5 kΩ יש הגבר…

4

−4

5

−5

−R_f/R_in = −4.

3. עוקב מתח משמש כדי…

לחבר אותות

לחצוץ מקור

להפוך

לבצע אינטגרציה

לחצוץ מקור. הגבר 1, בלי העמסה.

4. ההגבר המזערי של מגבר לא מהפך הוא…

0

1

−1

10

1 + R_f/R_g ≥ 1.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

רשת חכמה יותר מתחילה במדידה, ומדידת אותות קטנים היא תפקידו של מגבר השרת. EIA מסביר שהרשת החכמה משלבת טכנולוגיה דיגיטלית עם מערכת החשמל המסורתית כדי שחברות החשמל והלקוחות יוכלו לשלוח ולקבל מידע, מה שעוזר לחברות לצמצם הפסדי חשמל ולאתר ולתקן תקלות מהר יותר, ושהתקנים חכמים על קווי החשמל ובתחנות המשנה מאפשרים לנהל את המתח ביעילות רבה יותר ולאתר במהירות היכן יש הפסקת חשמל.

כל מונה חכם וחיישן קו מגביר אות זעיר של חיישן זרם או מחלק מתח לטווח שממיר דיגיטלי יכול לקרוא, בעזרת המגברים המהפכים, הלא מהפכים ומגברי ההפרש של היחידה הזאת בדיוק. EIA מוסיף שהתקנים חכמים יכולים להודיע ללקוחות כשהמחירים גבוהים כדי שיעבירו את הצריכה הרחק משעות ביקוש גבוה מאוד.

ב־Saving Planets: מבוא לתכנות · פתרונות

מקורות: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על הפשטת מגבר השרת.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): רשתות נגדים לקביעת ההגבר.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): מחלקים המשמשים במשוב.
- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): חזרה.

צפו בהרצאה

Lecture 19: The Operational Amplifier Abstraction (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-19/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

קבלים וסלילים

קיבול והשראות, יחסי הזרם–מתח שלהם, אנרגיה אגורה, רציפות מתח הקבל וזרם הסליל, חיבורים בטור ובמקביל, התנהגות במצב מתמיד של זרם ישר, ומגברי שרת כאינטגרטורים ודיפרנציאטורים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו ב-i = C dv/dt וב-v = L di/dt.
- חשבו את האנרגיה האגורה בקבלים ובסלילים.
- חברו קבלים וסלילים בטור ובמקביל.
- מצאו מתחים וזרמים במצב מתמיד של זרם ישר במעגלים עם C ו-L.

מושגי מפתח

- קבל אוגר אנרגיה בשדה חשמלי: q = Cv, i = C dv/dt, w = ½Cv². המתח שלו אינו יכול לקפוץ ברגע; במצב מתמיד של זרם ישר הוא מתנהג כנתק.
- סליל אוגר אנרגיה בשדה מגנטי: v = L di/dt, w = ½Li². הזרם שלו אינו יכול לקפוץ ברגע; במצב מתמיד של זרם ישר הוא מתנהג כקצר.
- קבלים במקביל מתחברים; בטור הם מתחברים כמו נגדים במקביל. סלילים מתחברים כמו נגדים: בטור מתחברים, במקביל מחברים את ההופכיים.
- מגבר שרת עם קבל במשוב מבצע אינטגרציה: v_o = −(1/RC)∫v_in dt. החלפת R ו-C נותנת דיפרנציאטור.
- קבלים וסלילים אידיאליים אוגרים ומחזירים אנרגיה בלי הפסד; לאמיתיים יש התנגדות קטנה וזליגה.

משוואות מפתח

$$i = C\frac{dv}{dt},\ \ w = \tfrac{1}{2}Cv^2$$

i=Cdv/dt,\ \ w=12Cv^2

קבל

$$v = L\frac{di}{dt},\ \ w = \tfrac{1}{2}Li^2$$

v=Ldi/dt,\ \ w=12Li^2

סליל

$$C_p = C_1 + C_2,\ \ \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

C_p=C_1+C_2,\ \ (1)/(C_s)=(1)/(C_1)+(1)/(C_2)

$$v_o = -\frac{1}{RC}\int v_{in}\,dt$$

v_o=-1/RC ∫ v_in dt

אינטגרטור עם מגבר שרת

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 המתח של קבל 10 μF עולה בקצב 2 V/ms. מצאו את הזרם שלו.

1. dv/dt = 2000 V/s.
2. i = 10 × 10⁻⁶ × 2000 = 20 mA.

תשובה: i = 20 mA.

דוגמה 6.2 מצאו את האנרגיה בקבל 1000 μF ב-3 V ובסליל 0.2 H שבו עובר 3 A.

1. w_C = ½ × 10⁻³ × 3² = 4.5 × 10⁻³ J.
2. w_L = ½ × 0.2 × 3² = 0.9 J.

תשובה: 4.5 mJ ו-0.9 J.

דוגמה 6.3 מקור זרם ישר של 12 V מזין 2 Ω בטור עם סליל, עם נגד של 4 Ω במקביל לקבל במוצא (מצב מתמיד). מצאו את זרם הסליל ואת מתח הקבל.

1. בזרם ישר הסליל הוא קצר והקבל הוא נתק.
2. i = 12/(2 + 4) = 2 A; v_C = 2 × 4 = 8 V.

תשובה: i_L = 2 A, v_C = 8 V.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו 6 μF ו-3 μF בטור.

   2 μF.

2. הזרם של סליל 50 mH משתנה בקצב 100 A/s. מצאו את המתח שלו.

.5 V

3. מצאו 4 mH ו-6 mH בטור.

.10 mH

4. כמה מטען מחזיק קבל 100 µF ב-9 V?

.q = 0.9 mC

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: קבל מעביר זרם ישר.

בפועל: במצב מתמיד של זרם ישר הוא חוסם זרם (נתק).

מיתוס: הזרם בסליל יכול להשתנות ברגע.

בפועל: זה היה דורש מתח אינסופי; הזרם רציף.

מיתוס: קבלים מתחברים כמו נגדים.

בפועל: הם מתחברים הפוך: במקביל הם מתחברים.

כרטיסיות

קבל

.i = C dv/dt

סליל

.v = L di/dt

אנרגיית קבל

.½Cv²

אנרגיית משרן

.½Li²

מצב מתמיד של זרם ישר

C נתק, L קצר.

אינטגרטור

.v_o = −(1/RC)∫v_in dt

בוחן לבדיקה עצמית

1. במצב מתמיד של זרם ישר סליל מתנהג כ...

נתק

קצר

נגד

מקור

קצר. $di/dt = 0$ ולכן $v = 0$.

2. הכפלת המתח של קבל פי שניים מגדילה את האנרגיה שלו פי…

2

4

½

1

4. $w \propto v^2$.

3. מה אינו יכול להשתנות ברגע?

זרם הקבל

מתח הקבל

מתח הסליל

זרם הנגד

מתח הקבל. זה היה דורש זרם אינסופי.

4. שני קבלים של 10 μF במקביל נותנים…

5 μF

10 μF

20 μF

100 μF

20 μF. קבלים במקביל מתחברים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

אגירת אנרגיה היא מה שמאפשר להשתמש בחשמל סולארי ורוח אחרי השקיעה או כשהרוח נחלשת. EIA דיווח באוגוסט 2026 שקיבולת אגירת הסוללות בקנה מידה של חברות חשמל בארה"ב גדלה בממוצע ב-70% בשנה בשלוש השנים האחרונות, והגיעה ל-43.6 GW בסוף 2025, ושהמפעילים הוסיפו עוד 8.3 GW במחצית הראשונה של 2026 והגיעו לכמעט 52 GW, עם כ-54 GW נוספים מתוכננים בשנתיים וחצי הקרובות.

EIA מציין שתחנות סולאריות מארחות את יחידות הסוללות הגדולות ביותר, ושסולארי עם אגירה מאפשר למפעילים לאגור חשמל כשהמחירים נמוכים ולפרוק אותו כשהם גבוהים. סוללות אוגרות אנרגיה כימית, אבל הקבלים והסלילים של היחידה הזאת נמצאים בכל ממיר ומטען סוללות, מחליקים זרמים ואוגרים אנרגיה למיקרו-שניות בכל פעם בזמן שההספק מומר בין זרם ישר לזרם חילופין.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2 · פתרונות

מקורות: U.S. EIA: Battery storage capacity averaged 70% growth over the last three years (Aug. 7, 2026) (https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67925) · OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): השראות.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): אינטראקטיבי.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על קבלים ומערכות מסדר ראשון.

סיימתי את היחידה הזו

מעגלים מסדר ראשון: מעברים במעגלי RC ו-RL

תגובות טבעיות ותגובות מדרגה של מעגלי RC ו-RL, קבוע הזמן, הפתרון הכללי x(t) = x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ), בעיות מיתוג ואנרגיה במיתוג דיגיטלי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מצאו ערכים התחלתיים וסופיים סביב אירוע מיתוג.
- חשבו קבועי זמן τ = RC ו-τ = L/R.
- כתבו והשתמשו בפתרון הכללי מסדר ראשון.
- העריכו אנרגיית מיתוג והספק במעגלים דיגיטליים.

מושגי מפתח

- מעגל עם קבל אחד או סליל אחד (ועוד נגדים ומקורות זרם ישר) מקיים משוואה דיפרנציאלית מסדר ראשון. התגובה שלו עוברת באופן מעריכי מערך התחלתי לערך סופי.
- קבוע זמן: τ = R_Th C למעגל RC ו-τ = L/R_Th למעגל RL, כאשר R_Th היא ההתנגדות שה-C או ה-L רואים.
- פתרון כללי: x(t) = x(∞) + [x(0⁺) − x(∞)] e^(−t/τ). אחרי τ אחד השינוי הושלם ב-63.2%; אחרי 5τ ב-99.3%.
- השתמשו ברציפות: v_C(0⁺) = v_C(0⁻) ו-i_L(0⁺) = i_L(0⁻). מצאו את x(∞) מהמצב המתמיד של זרם ישר (C נתק, L קצר).
- טעינת קיבול C למתח V דרך נגד לוקחת CV² מהמקור: ½CV² נאגר ו-½CV² הולך לאיבוד כחום. שבבים דיגיטליים טוענים קיבולים זעירים מיליארדי פעמים בשנייה, ולכן ההספק הדינמי שלהם הוא בערך P = αCV²f.

משוואות מפתח

$$\tau = RC, \;\; \tau = \frac{L}{R}$$

τ=RC,\ \ τ=L/R

קבועי זמן

$$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$$

x(t)=x(∞)+[x(0^+)-x(∞)]e^-t/τ

תגובה כללית מסדר ראשון

$$v_C(t) = V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

v_C(t)=V(1-e^-t/RC)

טעינת RC מאפס

$$P_{dyn} \approx \alpha C V^2 f$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 קבל של 1000 µF נטען דרך נטען דרך 10 kΩ ממקור של 3 V, החל מ-0 V. מצאו את τ, את v_C ב-t = τ ואת הזמן להגיע ל-99.3% מ-3 V.

1. τ = 10⁴ × 10⁻³ = 10 s.
2. v_C(τ) = 3(1 − e⁻¹) = 3 × 0.632.
3. 99.3% דורש 5τ.

תשובה: τ = 10 s, v_C(τ) = 1.90 V, כ-50 s.

דוגמה 7.2 סליל של 0.5 H בטור עם 10 Ω מחובר ל-20 V ב-t = 0. מצאו את τ, את הזרם הסופי ואת i(0.1 s).

1. τ = 0.5/10 = 0.05 s; i(∞) = 20/10 = 2 A.
2. i(0.1) = 2(1 − e^(−0.1/0.05)) = 2(1 − e⁻²).

תשובה: τ = 50 ms, i(∞) = 2 A, i(0.1 s) = 1.73 A.

דוגמה 7.3 קבל טעון נפרק דרך נגד עם τ = 10 s. מתי המתח שלו מגיע למחצית הערך ההתחלתי?

1. $V_0 e^{(-t/\tau)} = V_0/2$ נותן $t = \tau \ln 2$.

תשובה: t = 6.93 s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את τ עבור 2 kΩ ו-50 µF.

   0.1 s.

2. אחרי 3τ, איזה חלק מהשינוי הושלם?

   1 − e⁻³ = 95.0%.

3. מצאו את τ עבור 20 mH ו-4 Ω.

.5 ms

4. שבב לדוגמה: C ממותג אפקטיבי 1 nF, V = 1 V, f = 1 GHz, α = 1. מצאו את P, ואת P ב-0.8 V.

1 W; 0.64 W, 36% פחות.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מתח הקבל קופץ כשהמפסק נסגר.

בפועל: מתח הקבל רציף; הזרם שלו יכול לקפוץ.

מיתוס: התגובה מסתיימת אחרי קבוע זמן אחד.

בפועל: τ אחד הוא 63.2%; השתמשו בכ-5τ עבור "הסתיים".

מיתוס: τ משתמש רק בהתנגדות המקור.

בפועל: השתמשו בהתנגדות תבנין שהקבל או הסליל רואים.

כרטיסיות

קבוע הזמן RC

τ = RC.

קבוע הזמן RL

τ = L/R.

פתרון כללי

x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ).

קבוע זמן τ אחד

63.2% מהשינוי.

חמישה τ

99.3%.

הספק מיתוג

P ≈ αCV²f.

בוחן לבדיקה עצמית

1. τ עבור מעגל RC הוא…

R/C

RC

1/RC

√(RC)

RC. ביחידות של שניות.

2. אחרי קבוע זמן אחד, קבל בטעינה מגיע לבערך…

37%

50%

63%

99%

.63%. $1 - e^{-1}$

3. הורדת מתח ההזנה של שבב ב-20% מקטינה את ההספק הדינמי בערך ב…

20%

36%

50%

64%

.36%. $0.8^2 = 0.64$

4. זרם הסליל ב-0^+ t = 0 שווה ל…

תמיד אפס

ערכו ב-0^-

הערך הסופי

V/R

ערכו ב-0^-. רציפות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

כל ביט שמחשב הופך טוען ופורק קיבול זעיר דרך התנגדות, ולכן מחשוב צורך כל כך הרבה חשמל. דוח של Berkeley Lab עבור משרד האנרגיה האמריקאי מצא שמרכזי נתונים צרכו כ-4.4% מכלל החשמל בארה"ב ב-2023, שהצריכה שלהם עלתה מ-58 TWh ב-2014 ל-176 TWh ב-2023, ושצפוי שישתמשו ב-325 עד 580 TWh, או 6.7% עד 12% מהחשמל בארה"ב, עד 2028, בצמיחה המונעת בעיקר על ידי שרתי AI.

נוסחת הספק המיתוג מהיחידה הזאת מראה את המנוף העיקרי של מתכנני שבבים: ההספק גדל עם ריבוע מתח ההזנה, ולכן מתח נמוך ב-20% מקטין את ההספק הדינמי ב-36% (דוגמה). החוקר הראשי של הדוח אומר שהבנת מה מניע את הצמיחה עוזרת לזהות הזדמנויות להתייעלות.

ב־Saving Planets: מבוא לתכנות · משוואות דיפרנציאליות

מקורות: Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/) · OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): מעברים בסלילים.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על מעברים מסדר ראשון ועל אנרגיה במעגלים דיגיטליים.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): צפו בקבלים נטענים.

צפו בהרצאה

Lecture 12: Capacitors and First-Order Systems (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-12/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

מעגלים מסדר שני: תגובה טבעית ותגובת מדרגה של מעגלי RLC

מעגלי RLC בטור ובמקביל, המשוואה האופיינית, תדירות הנפר α ותדירות התהודה ω_0, תגובות בריסון יתר, בריסון קריטי ובתת-ריסון, מקדם איכות, וחילופי אנרגיה ב-LC.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- כתבו את המשוואה מסדר שני למעגלי RLC בטור ובמקביל.
- חשבו את α, ω_0 ו-ω_d וסווגו את הריסון.
- מצאו את צורת התגובה ואת קבועיה מתנאי ההתחלה.
- קשרו את Q לצלצול ולהפסדי אנרגיה.

מושגי מפתח

- מעגל עם סליל וקבל מקיים משוואה מסדר שני. עבור RLC טורי: $\alpha = R/(2L)$, $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$. עבור RLC מקבילי: $\alpha = 1/(2RC)$, אותו ω_0.
- שורשים $s = -\alpha \pm \sqrt{(\alpha^2 - \omega_0^2)}$. ריסון יתר ($\alpha > \omega_0$): שני שורשים ממשיים, ללא תנודה. ריסון קריטי ($\alpha = \omega_0$): החזרה המהירה ביותר ללא חריגה. תת-ריסון ($\alpha < \omega_0$): תנודה דועכת ב-$\omega_d = \sqrt{(\omega_0^2 - \alpha^2)}$.
- מעגל LC אידיאלי ($R = 0$) מחליף אנרגיה בין השדה החשמלי של הקבל לשדה המגנטי של הסליל לנצח ב-ω_0.
- מקדם איכות עבור RLC טורי: $Q = \omega_0 L/R = (1/R)\sqrt{(L/C)}$. Q גבוה פירושו תהודה חדה וצלצול ארוך.
- התנגדות קריטית עבור RLC טורי: $R = 2\sqrt{(L/C)}$.

משוואות מפתח

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

```
α=R/2L,\ \ ω_0=1
```

פרמטרים של RLC טורי

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

```
s_1,2=-αα^2-ω_0^2
```

שורשים אופייניים

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

```
ω_d=ω_0^2-α^2
```

תדירות מרוסנת

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$$

```
Q=(ω_0L)/(R)
```

מקדם איכות (טורי)

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 ל-RLC טורי $R = 10\ \Omega$, $L = 10\ \text{mH}$ ו-$C = 10\ \mu\text{F}$. מצאו את ω_0, f_0, α ואת סוג הריסון.

1. $\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = 1/\sqrt{10^{-2} \times 10^{-5}} = 1/\sqrt{10^{-7}} = 3162\ \text{rad/s}$; $f_0 = \omega_0/2\pi$.
2. $\alpha = R/(2L) = 10/(2 \times 0.01) = 500\ \text{s}^{-1} < \omega_0$.

תשובה: $\omega_0 = 3162\ \text{rad/s}$, $f_0 = 503.3\ \text{Hz}$, $\alpha = 500\ \text{s}^{-1}$: תת-ריסון.

דוגמה 8.2 עבור אותו מעגל מצאו את ω_d ואת Q.

1. $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \sqrt{10^7 - 2.5 \times 10^5} = \sqrt{3162^2 - 500^2}$.
2. $Q = \omega_0/(2\alpha) = 3162 \times 0.01/10$.

תשובה: $\omega_d = 3122.5\ \text{rad/s}$, $Q = 3.16$.

דוגמה 8.3 איזו התנגדות הייתה הופכת את המעגל הזה לבעל ריסון קריטי?

1. $R = 2\sqrt{L/C} = 2\sqrt{0.01/10^{-5}} = 2\sqrt{1000}$.

תשובה: $R = 63.2\ \Omega$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ל-RLC טורי $\alpha = 200\ \text{s}^{-1}$ ו-$\omega_0 = 100\ \text{rad/s}$. סווגו אותו.

   ריסון יתר.

2. מצאו את ω_0 עבור $L = 1\ \text{mH}$, $C = 1\ \mu\text{F}$.

   $31623\ \text{rad/s}$ (5.03 kHz).

3. ל-RLC מקבילי $R = 1\ \text{k}\Omega$ ו-$C = 1\ \mu\text{F}$. מצאו את α.

$1/(2 \times 10^{3} \times 10^{-6}) = 500\ s^{-1}$.

4. הכפלת R ב-RLC טורי משנה את Q פי…

פי ½.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: ל-α אותה נוסחה ב-RLC טורי ומקבילי.

בפועל: טורי $\alpha = R/2L$; מקבילי $\alpha = 1/(2RC)$.

מיתוס: ריסון קריטי פירושו תנודה.

בפועל: זהו הגבול: ללא תנודה, ההתייצבות המהירה ביותר.

מיתוס: ω_d שווה ל-ω_0.

בפועל: ω_d נמוך יותר בכל פעם שיש ריסון.

כרטיסיות

תדירות נפר

$\alpha = R/2L$ (טורי).

תדירות תהודה

$\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

ריסון יתר

$\alpha > \omega_0$.

תת-ריסון

$\alpha < \omega_0$, מצלצל ב-ω_d.

R קריטי

$2\sqrt{(L/C)}$ (טורי).

Q

$\omega_0 L/R$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. תת-ריסון פירושו…

- $\alpha > \omega_0$
- $\omega_0 = \alpha$
- $\alpha < \omega_0$

רק $R = 0$

$\alpha < \omega_0$. שורשים מרוכבים.

2. ω_0 עבור מעגל LC הוא...

LC

1/LC

$1/\sqrt{(LC)}$

$\sqrt{(L/C)}$

$1/\sqrt{(LC)}$. תדירות תהודה.

3. הגדלת R ב-RLC טורי הופכת את התגובה ל...

תנודתית יותר

מרוסנת יותר

ללא שינוי

לא יציב

מרוסנת יותר. α גדל.

4. במעגל LC אידיאלי האנרגיה...

אובדת כחום

עוברת הלוך ושוב בין C ל-L

נשארת ב-C

גדלה

עוברת הלוך ושוב בין C ל-L. אין התנגדות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מעגלי תהודה הם מה שמאפשר לכלי רכב חשמליים להיטען בלי כבל. ה-Alternative Fuels Data Center של משרד האנרגיה האמריקאי מסביר שטעינה השראתית משתמשת בשדה אלקטרומגנטי כדי להעביר חשמל לרכב חשמלי, שחלק מעמדות הטעינה האלחוטיות כבר פועלות ברמות הספק דומות לרמה 2, שהיא נפוצה יותר בתחבורה ציבורית ובציים בהספק גבוה יותר, ושמשרד האנרגיה חוקר טעינה אלחוטית בהספק גבוה.

מטענים אלחוטיים מכוונים סליל (L) וקבל (C) בכל צד לאותו $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$ כדי שהאנרגיה תעבור ביעילות דרך מרווח האוויר, ו-Q גבוה שומר על הפסדים נמוכים. זה הרעיון המעגלי שמאחורי המטענים האלחוטיים לתחבורה ציבורית ולציים שה-AFDC מתאר.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2 · משוואות דיפרנציאליות

מקורות: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 14.5 Oscillations in an LC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-5-oscillations-in-a-lc-circuit): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits): תנודות מרוסנות.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על מערכות מסדר שני.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): בנו מעגל LC.

צפו בהרצאה

Lecture 15: Second-Order Systems (part 1) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-15-part-1/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

מצב מתמיד סינוסי: פאזורים ואימפדנס

סינוסים, משרעת, תדירות, מופע וערכי RMS, מספרים מרוכבים, פאזורים, עכבה ואדמיטנס של R, L ו-C, ניתוח מעגלי זרם חילופין בעזרת חוק אוהם, חוק הזרמים, חוק המתחים, שיטת הצמתים ושיטת תבנן בצורת פאזורים, ויסודות תגובת התדר.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- המירו בין סינוסים בתחום הזמן לפאזורים.
- חשבו עכבות של R, L ו-C בתדירות נתונה.
- נתחו מעגלי זרם חילופין בגרסאות הפאזוריות של שיטות הזרם הישר.
- תארו כיצד העכבה משתנה עם התדירות במסננים פשוטים.

מושגי מפתח

- לסינוס $v(t) = V_m \cos(\omega t + \varphi)$ משרעת V_m, תדירות זוויתית $\omega = 2\pi f$ ומופע φ. ערך ה-RMS שלו הוא $V_m/\sqrt{2}$; מתח הבית בארה"ב, 120 V, הוא ערך RMS ב-60 Hz, עם שיא של כ-170 V.
- פאזור הוא המספר המרוכב $V = V_m \angle \varphi$ שנושא את המשרעת והמופע. במצב יציב סינוסי, d/dt הופך לכפל ב-$j\omega$.
- עכבה $Z = V/I$: $Z_R = R$, $Z_L = j\omega L$, $Z_C = 1/(j\omega C) = -j/(\omega C)$. סלילים נראים כקצרים בתדירות נמוכה וכנתק בתדירות גבוהה; קבלים עושים את ההפך.
- כל כלי הזרם הישר (טור/מקביל, מחלקים, ניתוח צמתים וחוגים, תבנן ונורטון) עובדים עם עכבות וחשבון מרוכב.
- מסנן RC מעביר-נמוכים מעביר תדירויות נמוכות ומנחית גבוהות; תדירות הקטעון (חצי הספק) שלו היא $\omega_c = 1/(RC)$.

משוואות מפתח

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

```
V_rms=(V_m)/(2)
```

ערך RMS של סינוס

$$Z_R = R,\ Z_L = j\omega L,\ Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

```
Z_R=R,\ Z_L=jω L,\ Z_C=(1)/(jω C)
```

עכבות

$$\mathbf{V} = \mathbf{I} Z$$

חוק אוהם בפאזורים

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

ω_c=1/RC

קטעון של מסנן RC

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 בטאו את $v(t) = 170\cos(377t)$ V כפאזור ומצאו את ערך ה-RMS ואת התדירות.

1. $V = 170\angle 0°$ V (שיא).
2. $V_{rms} = 170/\sqrt{2}$; $f = 377/(2\pi)$.

תשובה: $V_{rms} = 120.2$ V ב-$f = 60.0$ Hz.

דוגמה 9.2 ב-60 Hz מצאו את העכבה של סליל 0.1 H ושל קבל 100 µF.

1. $\omega = 2\pi \times 60 = 377.0$ rad/s.
2. $Z_L = j \times 377.0 \times 0.1$; $Z_C = -j/(377.0 \times 10^{-4})$.

תשובה: $Z_L = j37.70\ \Omega$, $Z_C = -j26.53\ \Omega$.

דוגמה 9.3 מקור 120 V (RMS), 60 Hz מזין 30 Ω בטור עם 0.1 H. מצאו את הזרם ואת המופע שלו.

1. $Z = 30 + j37.70\ \Omega$; $|Z| = \sqrt{(30^2 + 37.70^2)} = 48.18\ \Omega$, $\angle 51.49°$.
2. $I = 120/48.18$ ב-$-51.49°$.

תשובה: $I = 2.491$ A RMS, מפגר אחרי המתח ב-51.49°.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את ערך ה-RMS של סינוס עם שיא 10 V.

   7.071 V.

2. מצאו את העכבה של 1 µF ב-$\omega = 1000$ rad/s.

   $-j1000\ \Omega$.

3. מצאו את תדירות הקטעון של מסנן RC עם $R = 1$ kΩ ו-$C = 1$ µF.

$\omega_c = 1000$ rad/s (159.2 Hz).

4. המירו את $3 + j4$ לצורה קוטבית.

$5\angle 53.13°$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: 120 V זרם חילופין פירושו שיא של 120 V.

בפועל: זהו ערך ה-RMS; השיא הוא כ-170 V.

מיתוס: עכבות מתחברות כמו גדלים.

בפועל: חברו מספרים מרוכבים: לגודל של $j40 + 30$ ערך 50, לא 70.

מיתוס: פאזורים עובדים לכל צורת גל.

בפועל: הם חלים על מצב יציב סינוסי בתדירות אחת.

כרטיסיות

פאזור

$V_m\angle\varphi$.

RMS

$V_m/\sqrt{2}$.

Z_L

$j\omega L$.

Z_C

$1/(j\omega C)$.

חוק אוהם בפאזורים

$V = IZ$.

קטעון RC

$\omega_c = 1/RC$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. העכבה של סליל היא…

$j\omega L$

$1/(j\omega L)$

ωL

L/ω

jωL. v = L di/dt → jωL.

2. בתדירות גבוהה מאוד קבל מתנהג כמו...

נתק

קצר

נגד

סליל

קצר. 0 → (ωC)/1 = |Z_C|.

3. ערך ה-RMS של גל סינוס הוא השיא שלו כפול...

0.5

0.637

0.707

1.414

0.707. 1/√2.

4. במעגל RL הזרם...

מקדים את המתח

מפגר אחרי המתח

באותו מופע

אפס

מפגר אחרי המתח. זווית מופע השראתית.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

טעינת רכב חשמלי בבית היא בעיית מעגלי זרם חילופין. ה-Alternative Fuels Data Center מסביר שטעינת זרם חילופין ברמה 1 משתמשת בשקע של 120 V, מניחה כ-1.9 kW ומוסיפה כ-5 מייל טווח לשעה, כך ש-8 שעות יכולות להחזיר כ-40 מייל לרכב חשמלי בינוני. רמה 2 בזרם חילופין משתמשת ב-240 V (בתים) או 208 V (מסחרי); רוב המטענים הביתיים ברמה 2 פועלים עד 30 A, מספקים 7.2 kW וכ-25 מייל טווח לשעה, ודורשים מעגל ייעודי של 40 A לפי סעיף 625 של National Electrical Code.

אלה ערכי RMS: 1.9 kW ב-120 V הם כ-15.8 A, ו-7.2 kW ב-240 V הם 30 A. ה-AFDC מוסיף שנכון ל-2023 כמעט 80% מנקודות הטעינה הציבוריות היו ברמה 2, ושיחידות רמה 2 נעות בין 2.9 ל-19.2 kW. רוב בעלי הרכבים החשמליים מבצעים את רוב הטעינה בבית.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2 · פתרונות

מקורות: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuit-s-with-ac): עכבה ומופע.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): הרצאות על מצב יציב סינוסי ועכבה.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Lecture 16: Sinusoidal Steady State (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-16/) (באנגלית)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

הספק בזרם חילופין, מקדם הספק, תהודה, שנאים ומערכות תלת-פאזיות

הספק רגעי וממוצע, הספק ממשי, היגבי ומדומה, משולש ההספקים, מקדם הספק ותיקונו, תהודה טורית ורוחב סרט, שנאים אידיאליים, מערכות תלת-מופעיות מאוזנות, ולמה הרשת מעבירה חשמל במתח גבוה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו הספק ממשי, היגבי ומדומה ואת מקדם ההספק.
- קבעו את גודל הקבל לתיקון מקדם הספק.
- נתחו שנאים אידיאליים ועומסים תלת-מופעיים מאוזנים.
- הסבירו הפסדי הולכה בעזרת I²R.

מושגי מפתח

- הספק ממוצע (ממשי) P = V_rms I_rms cos θ בוואט, כאשר θ היא הזווית בין המתח לזרם. הספק היגבי Q = V_rms I_rms sin θ ב-VAR. הספק מדומה S = V_rms I_rms ב-VA, ו-S² = P² + Q².
- מקדם הספק pf = cos θ = P/S. מנועים הם השראתיים (pf מפגר). קבל במקביל מספק הספק היגבי מקומית, מעלה את ה-pf ומקטין את הזרם שחברת החשמל צריכה לספק: C = Q/(ωV²) לתיקון מלא.
- בתהודה טורית ω₀ = 1/√(LC) ההיגבים מבטלים זה את זה, העכבה היא רק R והזרם מרבי; רוחב הסרט הוא ω₀/Q.
- לשנאי אידיאלי עם יחס ליפופים N₁:N₂ מתקיים V₂/V₁ = N₂/N₁ ו-I₂/I₁ = N₁/N₂, ולכן הספק הכניסה שווה להספק היציאה.
- תלת-מופע מאוזן: שלושה סינוסים בהפרש 120°. הספק כולל P = √3 V_L I_L cos θ, קבוע בזמן. הפסדי הקו הם I²R, ולכן הגדלת המתח פי k לאותו הספק מקטינה את הזרם פי k ואת ההפסדים פי k².

משוואות מפתח

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos\theta, \;\; Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$$

`P=V_rmsI_rmsθ,\ \ Q=V_rmsI_rmsθ`

הספק ממשי והיגבי

$$S^2 = P^2 + Q^2, \;\; \text{pf} = \frac{P}{S}$$

`S^2=P^2+Q^2,\ \ pf=P/S`

משולש ההספקים

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

`(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)=(I_1)/(I_2)`

שנאי אידיאלי

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}\,V_L I_L \cos\theta$$

P_3=3 V_LI_Lθ

הספק תלת-מופעי מאוזן

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 מנוע צורך 20 A RMS מ-240 V RMS במקדם הספק 0.8 מפגר. מצאו את S, P ו-Q.

1. $S = 240 \times 20 = 4800$ VA.
2. $P = 4800 \times 0.8$; $\sin\theta = 0.6$, ולכן $Q = 4800 \times 0.6$.

תשובה: $S = 4.8$ kVA, $P = 3.84$ kW, $Q = 2.88$ kVAR.

דוגמה 10.2 איזה קבל במקביל יתקן את המנוע הזה למקדם הספק יחידתי ב-60 Hz?

1. הקבל צריך לספק $Q = 2880$ VAR.
2. $C = Q/(\omega V^2) = 2880/(377.0 \times 240^2)$.

תשובה: $C = 132.6$ μF; זרם הקו יורד מ-20 A ל-16 A.

דוגמה 10.3 קו עם התנגדות 5 Ω מעביר 10 MW. השוו את הפסד ה-I^2R ב-100 kV וב-20 kV (מקדם הספק יחידתי, דוגמה חד-מופעית).

1. ב-100 kV: $I = 10^7/10^5 = 100$ A, הפסד $= 100^2 \times 5 = 50$ kW (0.5%).
2. ב-20 kV: $I = 500$ A, הפסד $= 500^2 \times 5 = 1.25$ MW (12.5%).

תשובה: מתח גבוה פי 5 מקטין את ההפסדים פי 25.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. לעומס $P = 6$ kW ו-$Q = 8$ kVAR. מצאו את S ואת pf.

$S = 10$ kVA, $pf = 0.6$.

2. שנאי מוריד 7200 V ל-240 V. מצאו את $N_1{:}N_2$.

30:1.

3. מצאו את ההספק של עומס תלת-מופעי מאוזן של 480 V הצורך 100 A ב-0.9 pf.

√3 × 480 × 100 × 0.9 = 74.8 kW.

4. ל-RLC טורי ω_0 = 1000 rad/s ו-Q = 20. מצאו את רוחב הסרט.

50 rad/s.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הספק היגבי אינו מבצע עבודה, ולכן אין לו חשיבות.

בפועל: הוא עדיין מגדיל את הזרם, והזרם גורם להפסדי I^2R בחוטים ובשנאים.

מיתוס: שנאי עובד בזרם ישר.

בפועל: הוא צריך שטף משתנה; זרם ישר אינו נותן כזה.

מיתוס: הספק תלת-מופעי הוא פי שלושה מהספק חד-מופעי עם מתח הקו.

בפועל: $P = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos\theta$.

כרטיסיות

הספק ממשי

$P = VI\cos\theta$ (W).

הספק היגבי

$Q = VI\sin\theta$ (VAR).

הספק מדומה

$S = VI$ (VA).

מקדם הספק

P/S.

שנאי

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

תלת-מופע

$P = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos\theta$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. מקדם הספק שווה ל…

- Q/S
- P/S
- S/P

P/Q

.P/S. cos θ

2. הגדלת מתח ההולכה פי 10 (באותו הספק) מקטינה את הפסדי I²R פי…

×10

×100

×√10

אף אחת

×100. הזרם יורד פי ×10; הפסד ∝ I².

3. עומס השראתי מתוקן בעזרת…

נגד בטור

קבל במקביל

סליל במקביל

שנאי

קבל במקביל. קבלים מספקים הספק היגבי.

4. שנאי מוריד עם יחס ליפופים 10:1 הופך את זרם המשני ל…

קטן פי ×10

גדול פי ×10

שווים

גדול פי ×100

גדול פי ×10. ההספק נשמר.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

הרשת מעבירה הספק במתח גבוה כדי לצמצם הפסדי I^2R. ה-EIA מסביר שקווי הולכה במתח גבוה נושאים חשמל למרחקים ארוכים משום שמתח גבוה יותר הופך הולכה למרחקים ארוכים ליעילה וזולה יותר, שקווי חלוקה במתח נמוך יותר מספקים אותו לצרכנים, ושנאים בתחנות משנה מעלים ומורידים את המתח בין השלבים. ה-EIA מעריך שהפסדי ההולכה והחלוקה עמדו בממוצע על כ-5% מהחשמל שהועבר וחולק בארה"ב בשנים 2018 עד 2022.

הדוגמה הפתורה מראה את הפיזיקה: מתח גבוה פי חמישה מקטין את ההפסדים פי עשרים וחמישה. תיקון מקדם הספק, שנאים יעילים וקווים חדשים למרחקים ארוכים אל משאבי רוח ושמש, שה-EIA מונה בין אתגרי הרשת, כולם מכרסמים ב-5% האלה. ה-AFDC מציין שמתחי התלת-מופע הנפוצים בארה"ב הם 208/120 V ו-480/277 V, נפוצים באתרים מסחריים ותעשייתיים, ושמטעני DC מהירים מקבלים בדרך כלל כניסת זרם חילופין תלת-מופעית.

ב־Saving Planets: פתרונות · פיזיקה 2

מקורות: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 15.4 Power in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-4-power-in-an-ac-circuit): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 15.5 Resonance in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-5-resonance-in-an-ac-circuit): תהודה ורוחב סרט.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): שנאים והולכה.
- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): ההשראה שמאחורי השנאים.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. משתני מעגל ורכיבים: מטען, זרם, מתח, הספק, אנרגיה וחוק אוהם
   4 תרגילים
2. חוקי קירכהוף, נגדים בטור ובמקביל, ומחלקי מתח וזרם
   4 תרגילים
3. ניתוח שיטתי: שיטת מתחי הצמתים ושיטת זרמי החוגים
   4 תרגילים
4. משפטי מעגלים: ליניאריות, סופרפוזיציה, המרת מקורות, תבנין, נורטון והעברת הספק מרבית
   4 תרגילים
5. מגברי שרת
   4 תרגילים
6. קבלים וסלילים
   4 תרגילים

7. מעגלים מסדר ראשון: מעברים במעגלי RC ו-RL

   4 תרגילים

8. מעגלים מסדר שני: תגובה טבעית ותגובת מדרגה של מעגלי RLC

   4 תרגילים

9. מצב מתמיד סינוסי: פאזורים ואימפדנס

   4 תרגילים

10. הספק בזרם חילופין, מקדם הספק, תהודה, שנאים ומערכות תלת-פאזיות

    4 תרגילים

המעבדה (Circuits lab)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד, ללא נקודות זכות.

כל מעבדה אפשר לבצע בסימולציית PhET חינמית או עם מארז סוללות של 3 V. לעולם אל תעבדו על החיווט הביתי או על שקעי הקיר: מתח הרשת עלול להרוג. אל תקצרו סוללה, וחברו קבלים אלקטרוליטיים בכיוון הנכון.

מקור בטיחות: OpenStax University Physics Volume 2, 10.6 Household wiring and electrical safety (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-6-household-wiring-and-electrical-safety)

מעבדה A: חוק אוהם והמולטימטר

שבוע 2

מטרה: מדדו נכון מתח, זרם והתנגדות, הראו שבנגד הזרם יחסי למתח, ומצאו את R מהשיפוע.

$$v = iR, \quad p = vi$$

v=iR, p=vi

חוק אוהם והספק

מהלך הניסוי

1. פתחו את PhET Ohm’s Law ו-Circuit Construction Kit: DC; בנו סוללה ונגד והוסיפו וולטמטר (במקביל) ואמפרמטר (בטור).
2. בבית: על מטריצה, חברו נגד 1 kΩ לסוללת AA אחת (1.5 V) ואחר כך לשתיים (3 V). מדדו את v על הנגד ואת i בטור עם המכשיר בתחום mA.
3. מדדו את הנגד לבדו בתחום Ω (כשהמקור מנותק) והשוו ל-v/i.
4. שרטטו את i כפונקציה של v; השיפוע הוא 1/R. חשבו את ההספק בכל מקרה.

טבלת נתונים

v (V)	i עבור 1 kΩ (mA)	p (mW)
1.5	1.5	2.25
3.0	3.0	9.0

ערכים אידיאליים לנגד 1 kΩ; סוללות חדשות מראות מעט יותר מ-1.5 V כל אחת, והנגדים בתוך הטולרנס שלהם (לרוב ±5%).

חישוב לדוגמה

1. R = v/i = 3.0/0.003 = 1000 Ω.
2. p = vi = 3.0 × 0.003 = 9 mW, הרבה מתחת לדירוג של נגד ¼ W.

בטיחות

- השתמשו רק במארזי סוללות של 1.5–3 V; לעולם אל תתחברו לשקע קיר.
- לעולם אל תחברו את המכשיר בתחום הזרם ישירות על סוללה: זהו קצר.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גרסת המטריצה היא המעבדה הביתית.

PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

הקשר לכדור הארץ: אותה מדידת v·i היא מה שמד הספק לשקע או מונה חכם עושים כדי להראות לאן הולכת האנרגיה; לפי משרד האנרגיה, נורות LED צורכות לפחות 75% פחות מנורות ליבון. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה B: חוקי קירכהוף, טור ומקביל, ומחלקים

שבוע 3

מטרה: אמתו את חוק המתחים ואת חוק הזרמים במדידה, בדקו התנגדות שקולה בטור ובמקביל, וראו מחלק מתח צונח תחת עומס.

$$\sum v = 0, \quad \sum i = 0, \quad v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

`v=0, i=0, v_2=v(R_2)/(R_1+R_2)`

חוק המתחים, חוק הזרמים והמחלק

מהלך הניסוי

1. בנו 1 kΩ ו-2 kΩ בטור על 3 V (PhET או מטריצה). מדדו את הזרם ואת כל מתח; בדקו שסכום המתחים שווה למתח המקור.
2. בנו מחדש שני נגדי 1 kΩ במקביל על 3 V. מדדו את הזרם בכל ענף ובחוט המקור; בדקו את חוק הזרמים.
3. התייחסו לזוג הטורי כמחלק ומדדו את v על הנגד 2 kΩ.
4. חברו „עומס" של 2 kΩ על הנגד 2 kΩ ומדדו שוב; הסבירו את הירידה בעזרת החיבור במקביל.

טבלת נתונים

מעגל	זרם	מתחים
1 kΩ + 2 kΩ בטור	1.0 mA	1.0 V ו-2.0 V
1 kΩ ‖ 1 kΩ	3.0 mA כל אחד, 6.0 mA בסך הכול	3.0 V
מחלק עמוס ב-2 kΩ	1.5 mA מהמקור	1.5 V ביציאה

ערכים אידיאליים למקור 3 V.

חישוב לדוגמה

1. טור: $i = 3/3000 = 1$ mA; $1\text{ V} + 2\text{ V} = 3\text{ V}$ (חוק המתחים).
2. מחלק עמוס: $2\text{ kΩ} \parallel 1\text{ kΩ} = 2\text{ kΩ}$, ולכן $v_{out} = 3 \times 1/(1+1) = 1.5$ V במקום 2 V.

בטיחות

- מארזי סוללות במתח נמוך בלבד; הוציאו את הסוללה לפני חיווט מחדש.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גרסת המטריצה היא המעבדה הביתית.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

הקשר לכדור הארץ: ה-EIA מסביר שתאים פוטו-וולטאיים מחווטים לפאנלים ולמערכים; שרשראות בטור מחברות מתח ושרשראות במקביל מחברות זרם, כמו כאן. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה C: השקול של תבנן לסוללה והספק מרבי

שבוע 6

מטרה: מדלו סוללה אמיתית כ-V_Th בטור עם R_Th על ידי מדידת המתח שלה במעגל פתוח ותחת עומס, ואז חזו את העומס להספק מרבי.

$$R_{Th} = \frac{v_{oc} - v_L}{i_L}, \quad P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}}$$

R_Th=_oc-v_Li_L, P_=_Th^24R_Th

תבנן משתי מדידות

מהלך הניסוי

1. ב-PhET Circuit Construction Kit: DC, תנו לסוללה התנגדות פנימית ומדדו את המתח שלה בלי עומס ועם נגד עומס.
2. בבית: מדדו את מתח המעגל הפתוח של מארז AA × 2. אחר כך חברו נגד Ω 22 בדירוג של לפחות 1 W לשניות ספורות בלבד וקראו את המתח.
3. חשבו את i_L = v_L/22 Ω ואת R_Th, וחזו את P_max.
4. ב-PhET, שנו את התנגדות העומס ואשרו שההספק מרבי כאשר R_L = R_Th.

טבלת נתונים

גודל	ערך לדוגמה
v_oc	3.20 V
v_L (22 Ω)	3.10 V
i_L	0.141 A
R_Th	0.71 Ω

ערכים לדוגמה לסוללות אלקליין חדשות; סוללות שחוקות מראות R_Th גדול בהרבה.

חישוב לדוגמה

1. i_L = 3.10/22 = 0.1409 A; R_Th = 0.10/0.1409 = 0.71 Ω.
2. הספק העומס 0.437 W = 0.1409 × 3.10 =, ולכן השתמשו בנגד 1 W. התאמה ל-R_L = 0.71 Ω תהיה קרובה לקצר ותחמם את הסוללות: אל תנסו זאת בבית, רק ב-PhET.

בטיחות

- חברו את עומס ה-Ω 22 לשניות ספורות בלבד; הנגד והסוללות מתחממים.
- לעולם אל תקצרו את הדקי הסוללה.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שלב שתי המדידות הוא המעבדה הביתית; סריקת ההספק היא ב-PhET בלבד.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force)

הקשר לכדור הארץ: ה-EIA מדווח שנצילות מודולים פוטו-וולטאיים עלתה מפחות מ-10% באמצע שנות ה-1980 לכמעט 25% כיום; הפעלת כל פאנל בעומס המיטבי שלו היא חלק מניצול התפוקה הזאת. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה D: טעינת RC וקבוע הזמן

שבוע 10

מטרה: צפו בקבל נטען דרך נגד, מדדו את קבוע הזמן והשוו ל-RC = τ.

$$v_C(t) = V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

```
v_C(t)=V(1-e^-t/RC)
```

טעינת RC

מהלך הניסוי

1. ב-PhET Circuit Construction Kit: AC, בנו סוללה, נגד, קבל ומתג; השתמשו בגרף המתח כדי לעקוב אחרי v_C.
2. בבית: הציבו קבל 1000 μF (בדירוג 6.3 V ומעלה, הרגל השלילית ל-– של הסוללה) בטור עם 10 kΩ על 3 V. קראו את v_C במולטימטר כל 10 s.
3. מצאו את הזמן שבו v_C מגיע ל-63.2% מהמתח הסופי; זהו τ.
4. שרטטו את ln(1 − v_C/V) כפונקציה של t; השיפוע הוא −1/τ. פרקו את הקבל דרך הנגד לפני אחסונו.

טבלת נתונים

t (s)	0	10	20	30	50
v_C (V)	0	1.90	2.59	2.85	2.98

ערכים אידיאליים עבור R = 10 kΩ, C = 1000 μF ו-V = 3 V. לקבלים אלקטרוליטיים לרוב טולרנס של ±20%, והמכשיר עצמו מעמיס מעט את המעגל.

חישוב לדוגמה

1. τ = 10⁴ × 10⁻³ = 10 s.
2. v_C(10 s) = 3(1 − e⁻¹) = 1.90 V; v_C(50 s) = 3(1 − e⁻⁵) = 2.98 V.

בטיחות

- חברו קבלים אלקטרוליטיים בקוטביות הנכונה ומתחת למתח הדירוג שלהם; הפוכים עלולים להתפוצץ. הרכיבו משקפיים.

חלופה ביתית או וירטואלית

- גרסת המטריצה היא המעבדה הביתית.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

הקשר לכדור הארץ: Berkeley Lab מדווח שמרכזי נתונים צרכו כ-4.4% מהחשמל בארה"ב ב-2023; כל מיתוג לוגי בתוכם הוא טעינת RC זעירה כמו זו. Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה E: תהודת RLC

שבוע 13

מטרה: הזינו מעגל RLC טורי במקור זרם חילופין בתדירויות שונות, מצאו את שיא התהודה והשוו ל-$\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

$$|I| = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

|I|=^2+(ω L-1/ω C)^2

זרם ב-RLC טורי

מהלך הניסוי

1. ב-PhET Circuit Construction Kit: AC (או ב-Virtual Lab שלו), בנו מקור זרם חילופין, נגד, סליל וקבל בטור עם אמפרמטר.
2. קבעו $R = 10\ \Omega$, $L = 10\ \text{mH}$ ו-$C = 10\ \mu\text{F}$ אם אפשר, או רשמו את הערכים ש-PhET משתמש בהם, וחשבו את f_0.
3. שנו בהדרגה את תדירות המקור סביב f_0 ורשמו את משרעת הזרם.
4. שרטטו את $|I|$ כפונקציה של f, מצאו את השיא ואת נקודות חצי ההספק, והשוו את רוחב הסרט ל-ω_0/Q.

טבלת נתונים

f (Hz)	400	503	600
|I| (A) עבור 10 V	0.563	1.000	0.667

ערכים מחושבים עבור $R = 10\ \Omega$, $L = 10\ \text{mH}$, $C = 10\ \mu\text{F}$ ומקור במשרעת 10 V.

חישוב לדוגמה

1. $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})}) = 503.3\ \text{Hz}$; ב-$f_0$, $|Z| = R = 10\ \Omega$, ולכן $|I| = 1\ \text{A}$.
2. At 400 Hz: $X_L = 25.13\ \Omega$, $X_C = 39.79\ \Omega$, $|Z| = 17.76\ \Omega$, $|I| = 0.563\ \text{A}$.

בטיחות

- סימולציה בלבד: אל תבנו מעגלי זרם חילופין מחשמל הקיר.

חלופה ביתית או וירטואלית

- מטעמי בטיחות המעבדה הזאת היא ב-PhET בלבד; אין חיווט ביתי.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Circuit Construction Kit: AC – Virtual Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab)

הקשר לכדור הארץ: ה-AFDC אומר שמטעני רכב חשמלי השראתיים מעבירים הספק דרך שדה אלקטרומגנטי; מעגלי LC מכוננים כמו זה הופכים את ההעברה ליעילה. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations)

- [ ] השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)

מעבדה F: מדידת הספק ממשי בבית ושנאים ב-PhET

שבוע 14

מטרה: השתמשו במד הספק לשקע כדי להשוות את ההספק הממשי של נורות ומכשירים, להעריך אנרגיה שנתית ולחקור יחסי מתח בשנאים ב-PhET.

$$w = Pt, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

w=Pt, (V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)

אנרגיה והשנאי האידיאלי

מהלך הניסוי

1. חברו מד הספק לשקע קיר ומנורה למד (לעולם אל תפתחו את המד או את המנורה). רשמו את הוואטים עם נורת ליבון או הלוגן ואחר כך עם נורת LED בבהירות דומה.
2. אם המד מציג VA ומקדם הספק, רשמו אותם גם עבור מטען טלפון ומאוורר.
3. העריכו את ה-kWh השנתיים ב-3 שעות ביום והשוו.
4. ב-PhET Faraday’s Law, שנו את מספר הליפופים ואת מהירות המגנט, וקשרו את המתח המושרה ל-N ולקצב השינוי של השטף.

טבלת נתונים

נורה	P (W)	kWh לשנה ב-3 h ליום
ליבון	60	65.7
LED (אור דומה)	9	9.9

קריאות לדוגמה; לפי המדריך של משרד האנרגיה, נורות LED צורכות לפחות 75% פחות אנרגיה מנורות ליבון. הנורות שלכם יקבעו את המספרים שלכם.

חישוב לדוגמה

1. 60 W × 3 h × 365 = 65.7 kWh; 9 W נותנים 9.86 kWh.
2. חיסכון 85% = עבור נורת ה-LED לדוגמה, בהתאם ל„לפחות 75%”.

בטיחות

- השתמשו רק במד שקע מסחרי ובמכשירים עם תקע; לעולם אל תגעו במגעי השקע ואל תפתחו מכשירים. תנו לנורות חמות להתקרר לפני שנוגעים בהן.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שלב מד השקע הוא המעבדה הביתית; את השנאים חוקרים ב-PhET.

PhET: Faraday’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

הקשר לכדור הארץ: ה-EIA מעריך את הפסדי ההולכה והחלוקה בכ-5%; כל ואט שנחסך בנורה חוסך גם את ההפסדים האלה במעלה הזרם. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. מצאו את ההתנגדות השקולה של 12 Ω במקביל ל-(2 Ω + 4 Ω).

   1. 12 × 6/(12 + 6).

   תשובה: 4 Ω.

2. מקור 24 V מזין 3 kΩ ו-1 kΩ בטור. מצאו את המתח על 1 kΩ.

   1. מחלק: 24 × 1/4.

   תשובה: 6 V.

3. צומת מחובר ל-12 V דרך 4 Ω, לאדמה דרך 12 Ω, ומקבל 2 A ממקור זרם. מצאו את המתח שלו.

   1. 2 = v/12 + (v − 12)/4, ולכן 4v = 60.

   תשובה: 15 V.

4. לרשת v_oc = 18 V ו-i_sc = 6 A. מצאו את R_Th ואת ההספק המרבי שהיא יכולה לספק.

   1. R_Th = 3 Ω; P = 18²/(4 × 3).

   תשובה: 3 Ω ו-27 W.

5. למגבר מהפך R_f = 33 kΩ ו-R_in = 3.3 kΩ. מצאו את v_o עבור v_in = −0.4 V.

   1. הגבר =− 10.

   תשובה: +4 V.

מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. קבל 20 μF נטען מ-0 V דרך 5 kΩ לעבר 10 V. מצאו את τ ואת v_C ב-0.2 s.

.1 $\tau = 0.1\ \text{s}$; $10(1 - e^{-2})$.

תשובה: $\tau = 0.1\ \text{s}$, $v_C = 8.65\ \text{V}$.

2. ל-RLC טורי $R = 40\ \Omega$, $L = 0.1\ \text{H}$ ו-$C = 100\ \mu\text{F}$. סווגו את התגובה ומצאו את ω_d אם היא מצלצלת.

.1 $\alpha = 200\ \text{s}^{-1}$; $\omega_0 = 316.2\ \text{rad/s}$.

תשובה: תת-ריסון, $\omega_d = 244.9\ \text{rad/s}$.

3. מצאו את העכבה של 20 Ω בטור עם 100 μF ב-60 Hz.

.1 $Z_C = -j26.53\ \Omega$.

תשובה: $Z = 20 - j26.53\ \Omega = 33.22\ \angle -52.99^\circ\ \Omega$.

4. עומס צורך 12 A RMS מ-120 V RMS ב-0.85 pf מפגר. מצאו את P ואת Q.

.1 $S = 1440\ \text{VA}$; $\sin\theta = 0.5268$.

תשובה: $P = 1224\ \text{W}$, $Q = 758.6\ \text{VAR}$.

5. לשנאי 20:1 יש 2400 V בראשוני ועומס של 10 A במשני. מצאו את V_2 ואת I_1.

.1 $I_1 = 10/20$; $V_2 = 2400/20$.

תשובה: 120 V ו-0.5 A.

6. מצאו את ההספק של עומס תלת-מופעי מאוזן של 208 V הצורך 50 A במקדם הספק יחידתי.

.1 $\sqrt{3} \times 208 \times 50$.

תשובה: 18.01 kW.

דף נוסחאות

$$i = dq/dt,\ p = vi,\ v = iR$$

$$R = \rho L/A,\ p = i^2R = v^2/R$$

$$\sum i = 0,\ \sum v = 0$$

$$R_s = \sum R,\ 1/R_p = \sum 1/R$$

$$v_2 = vR_2/(R_1 + R_2)$$

$$V_{Th} = v_{oc},\ R_{Th} = v_{oc}/i_{sc},\ P_{\max} = V_{Th}^2/(4R_{Th})$$

$$v_o = -(R_f/R_{in})v_{in},\ v_o = (1 + R_f/R_g)v_{in}$$

$$i = C\,dv/dt,\ v = L\,di/dt,\ w = \tfrac{1}{2}Cv^2,\ \tfrac{1}{2}Li^2$$

$$\tau = RC,\ L/R;\ x(t) = x(\infty) + [x(0) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$$

$$\alpha = R/2L,\ \omega_0 = 1/\sqrt{LC},\ \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$Z_L = j\omega L,\ Z_C = 1/(j\omega C),\ V_{rms} = V_m/\sqrt{2}$$

$$P = VI\cos\theta,\ Q = VI\sin\theta,\ S^2 = P^2 + Q^2$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1,\ P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$$

קבועים

קבוע	ערך
1 קילוואט-שעה (kWh)	3.6 × 10⁶ J
1 כוח סוס (חשמלי)	746 W
מטען יסודי e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
אספקת חשמל ביתית בארה"ב	120 V ו-240 V ב-60 Hz
ערך RMS של גל סינוס	V_rms = V_peak/√2 ≈ 0.7071 V_peak
1 אמפר-שעה (Ah)	3600 C

מקור: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בספרים, בהרצאות ובסימולציות החינמיים האלה לצד הקורס.

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): סרטוני הרצאות, סיכומים, תרגילים ומעבדות בחינם מ-MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): פרק חינמי מספר לימוד על מעגלי זרם ישר.
- OpenStax University Physics Volume 2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): פרק חינמי מספר לימוד על מעגלי זרם חילופין.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): בנו ומדדו מעגלי זרם ישר.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): קבלים, סלילים ומקורות זרם חילופין.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): V = IR באופן אינטראקטיבי.

מילון מונחים

הספק מדומה

S = V_rms I_rms, ב-VA.

קבל

רכיב עם $i = C\,dv/dt$ שאוגר אנרגיה בשדה חשמלי.

עכבה

היחס המרוכב V/I במצב יציב סינוסי.

סליל

רכיב עם $v = L\,di/dt$ שאוגר אנרגיה בשדה מגנטי.

KCL

סכום הזרמים היוצאים מצומת הוא אפס.

KVL

סכום המתחים לאורך חוג הוא אפס.

חוג

חוג שאינו מכיל חוג אחר.

צומת

נקודה שבה מתחברים שני רכיבים או יותר.

שקול נורטון

מקור זרם I_N במקביל ל-R_N.

מגבר שרת

מגבר הפרשי בעל הגבר גבוה המשמש עם משוב.

מוסכמת הסימן הפסיבית

הזרם נכנס בהדק + של רכיב שצורך הספק.

פאזור

מספר מרוכב שנותן את המשרעת והמופע של סינוס.

מקדם הספק

$\cos\theta = P/S$.

מקדם איכות

$Q = \omega_0 L/R$, חדות התהודה.

RMS

ערך שורש ממוצע הריבועים; $V_m/\sqrt{2}$ לסינוס.

הספק היגבי

$Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$, ב-VAR.

סופר-צומת

שני צמתים המחוברים במקור מתח, ומטופלים יחד בחוק הזרמים.

שקול תבנין

מקור מתח V_{Th} בטור עם R_{Th}.

קבוע זמן

$\tau = RC$ או L/R.

שנאי

סלילים מצומדים שמשנים מתח חילופין לפי יחס הליפופים.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	מסמן/ת מעגלים במלואם, בוחר/ת שיטה יעילה (מחלקים, צמתים, חוגים, תבנן, פאזורים), בודק/ת מאזן הספקים ומקרי קצה, ועובד/ת בבטחה במעבדה.
3 · מיומן	פותר את תרגילי האימון עם טעויות סימן או יחידות מדי פעם.
2 · מתפתח	עוקב/ת אחרי דוגמאות פתורות אך מתבלבל/ת בין טור למקביל, או במוסכמת הסימנים.
1 · מתחיל	מציב/ה מספרים בנוסחאות בלי תרשים מסומן; צריך/ה לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

חלק	משקל
תרגילים	20%
מעבדות	25%
מערך תרגול לאמצע הקורס	25%
מערך תרגול מסכם	30%

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- אלגברה לינארית MATH 230
- אווירודינמיקה 1 AERO 310
- חשבון אינפיניטסימלי 3 MATH 210
- כל הקורסים