

## بسيطة

الفيزياء، البكالوريا، الفرع العلمي

### الدائرة المهتزة

مكتّفة تتفرّغ في وشيعة: التخامد، وعلاقة طومسون، وتابع الشدّة، وتبادل الطاقة، والتيارات عالية التواتر الكهربائي والمغناطيسيّة . الوحدة 2 . الدرس 4

نصل مكتّفة مشحونةً بوشيعة، فتتفرّغ ثم تُشحن بالاتّجاه المعاكس، وهكذا: الشحنة تهتزّ كما يهتزّ النّوّاس المرن في الوحدة الأولى، والمعادلة من الشكل نفسه. نتابع مع الكتاب في الصفحات 121 إلى 128. وفي دورة 2026 في دمشق جاء استنتاج الطاقة الكليّة للدّارة المهتزة سؤالاً بثلاثين درجة.

### دائرة الاهتزاز الكهربائي والتخامد

في نشاط الكتاب، الصفحة 121، نشحن مكتّفةً من مولّد، ثم نصلها بوشيعةٍ مقاومتها صغيرة، ونرى توتّرّها على شاشة راسم الاهتزاز: تفرّغٌ دوريٌّ متناوبٌ تتناقص سعته حتّى تبلغ الصفر. الاهتزازات حرّة لأنّها لا تتلقّى طاقةً من المولّد، ومتخامدة لأنّ سعتها تتناقص.

**تذكّر:** «نسَمّي الدّارة المؤلّفة من مُكتّفة، ووشيعة ذات المُقاومة الصّغيرة بالدّارة المُهتزة الحرّة المُتخامدة، ويكونُ زمنُ الاهتزاز  $T_0$  ثابتاً، وبما أنّ سعة الاهتزاز مُتناقصة نسَمّي هذا الزّمن بشبه الدّور.» الكتاب، الصفحة 121.



التوتّر بين لبوسي المكتّفة بدلالة الزمن. الحالتان الأوليان مرسومتان في الكتاب، الصفحة 121، والثالثة من وصفه. الرسم من عندنا.

وفي الدّارة  $C, L, R$  ثلاث حالات، كما في الكتاب: المقاومة كبيرة بشكلٍ كافٍ فيكون التفرّغ لا دورياً باتّجاهٍ واحد؛ المقاومة صغيرة فيكون التفرّغ دورياً متخامداً باتّجاهين، شبه دوره  $T_0$  تقريباً؛ وإذا أهملنا المقاومات أصبح التفرّغ جيّياً، سعته ثابتة ودوره الخاص  $T_0$ ، وهذه حالةٌ مثاليّة لا تتحقّق عملياً إلّا إذا عوّضنا الطاقات الضائعة.

نزيد المقاومة على التسلسل مع الوشيجة حتى تصبح كبيرة. ماذا يظهر على الشاشة؟

**| كيف أبدأ؟ المقاومة تبدد الطاقة حرارياً. ماذا يبقى للاهتزاز إن كانت كبيرة؟**

(أ) اهتزازٌ جيبيٌّ سعته ثابتة

(ب) تفريغٌ لا دوريٌّ باتجاه واحد

(ج) اهتزازٌ تزداد سعته

ب. نعم: طاقة المكثفة تتحول كلها حرارةً في المقاومة دفعةً واحدة، الكتاب، الصفحة 125.

## المعادلة التفاضلية وعلاقة طومسون

نتبع الكتاب، الصفحة 122: دائرةً على التسلسل فيها وشيجة  $(L, r)$ ، ومكثفٌ مشحونة سعتها  $C$ ، ومقاومة  $R_0$ . نختار اتجاهًا موجباً للتيار ونجمع التوتّرات على طول الدارة.

$$(\bar{q})''_t = ?$$

1. التوتّرات بين طرفي المكثفة، والمقاومة، والوشيجة:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ED} &= \frac{\bar{q}}{C} & \bar{u}_{BE} &= R_0 \bar{i} \\ \bar{u}_{AB} &= L (\bar{i})'_t + r \bar{i} \end{aligned}$$

2. مجموع التوتّرات مجموعها على طول الدارة المغلقة معدوم:

$$L (\bar{i})'_t + r \bar{i} + R_0 \bar{i} + \frac{\bar{q}}{C} = 0$$

3. بدلالة الشحنة مع  $R = R_0 + r$  و  $\bar{i} = (\bar{q})'_t$ :

$$L (\bar{q})''_t + R (\bar{q})'_t + \frac{1}{C} \bar{q} = 0$$

وهي معادلة تفاضلية من المرتبة الثانية. وفي الدارة المهتزة  $(L, C)$  نعوض  $R = 0$ ، الكتاب، الصفحة 122:

$$(\bar{q})''_t = -\frac{1}{LC} \bar{q}$$

وهي من شكل معادلة النّوَّاس المرن  $\bar{x}''_t = -\frac{k}{m} \bar{x}$ ، فتقبل حلًّا جيبياً:

$$\bar{q} = q_{\max} \cos(\omega_0 t + \bar{\varphi})$$

حيث  $q_{\max}$  الشحنة العظمى للمكثفة، و  $\omega_0$  النبض الخاص، و  $\bar{\varphi}$  الطور الابتدائي في اللحظة  $t = 0$ .

نتبع الكتاب، الصفحة 123: نشتق تابع الشحنة مرتين ونوازن بالمعادلة.

$$T_0 = ?$$

1. المشتق الثاني نشتق مرتين بالنسبة للزمن:

$$\begin{aligned} (\bar{q})''_t &= -\omega_0^2 q_{\max} \cos(\omega_0 t + \bar{\varphi}) \\ (\bar{q})''_t &= -\omega_0^2 \bar{q} \end{aligned}$$

2. الموازنة بالموازنة مع  $(\bar{q})''_t = -\frac{1}{LC} \bar{q}$ :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

3. الدور الخاص  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$$

«وهي عبارة الدور الخاص للاهتزازات الكهربائية الحرة غير المتخامدة وتسمى علاقة طومسون» الكتاب، الصفحة 123.  $T_0$  بالثانية، و  $L$  بالهنري، و  $C$  بالفاراد. والتواتر الخاص:

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

**انتبه:** تحت الجذر الجداء  $LC$ ، لا النسبة  $\frac{L}{C}$ . ولا تخط النبض بالتواتر:  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ، النبض بالراديان في الثانية والتواتر بالهرتز.

دائرة مهتزة دورها الخاص  $T_0$  . نستبدل بالمكثفة  $C$  مكثفة سعتها  $C' = 2C$  . الدور الجديد، الكتاب، الصفحة 129:

**كيف أبدأ؟**  $T_0$  تتناسب مع  $\sqrt{C}$  .

$$T'_0 = 2 T_0 \quad (\text{أ})$$

$$T'_0 = \frac{T_0}{\sqrt{2}} \quad (\text{ب})$$

$$T'_0 = \sqrt{2} T_0 \quad (\text{ج})$$

$$\text{ج. نعم: } T'_0 = 2\pi\sqrt{2LC} = \sqrt{2} T_0$$

نستبدل بالوشية وشية ذاتيتها  $L' = 2L$  ، وبالمكثفة مكثفة سعتها  $C' = \frac{C}{2}$  . التواتر الجديد، الكتاب، الصفحة 129:

**كيف أبدأ؟** احسب الجداء  $L'C'$  .

$$f'_0 = f_0 \quad (\text{أ})$$

$$f'_0 = 2 f_0 \quad (\text{ب})$$

$$f'_0 = \frac{1}{2} f_0 \quad (\text{ج})$$

$$\text{أ. نعم: } L'C' = 2L \cdot \frac{C}{2} = LC$$

## شدة التيار في الدائرة المهتزة

مثال الكتاب، الصفحة 123: مكثفة مشحونة نصلها بوشية مهمل المقاومة، ومبدأ الزمن لحظة إغلاق الدائرة، فالشحنة عظمى عند  $t = 0$  و  $\varphi = 0$  .

$$\bar{i} = ?$$

1. تابع الشحنة بشكله المختزل:

$$\bar{q} = q_{\max} \cos \omega_0 t$$

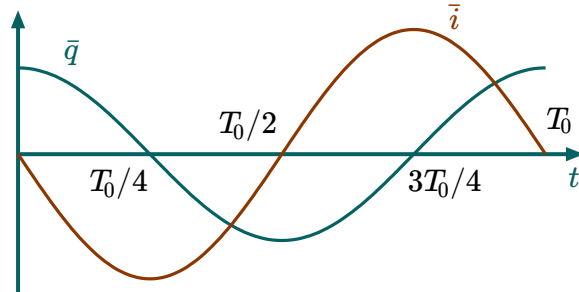
2. تابع الشدة تابع الشدة مشتق تابع الشحنة بالنسبة للزمن:

$$\bar{i} = (\bar{q})'_t = -\omega_0 q_{\max} \sin \omega_0 t$$

$$\bar{i} = \omega_0 q_{\max} \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$$

الشدة العظمى:

$$I_{\max} = \omega_0 q_{\max}$$



تابع الشحنة والشدة بدلالة الزمن خلال دور واحد، الكتاب، الصفحة 124. الرسم من عندنا.

**تذكّر:** من الرسم، الكتاب، الصفحة 124: عندما تكون شحنة المكثف عظمى تنعدم شدة التيار في الوشيعه، وعندما تكون الشدة عظمى تنعدم الشحنة. «تابع الشدة على ترائع متقدّم بالظور مع تابع الشحنة»، أي يسبقه برقع دور،  $\frac{\pi}{2}$ .

في اللحظة التي تكون فيها شحنة المكثف عظمى، شدة التيار في الدارة:

**كيف أبدأ؟** انظر إلى الرسم عند  $t = 0$ .

(أ) معدومة

(ب) عظمى أيضاً

(ج) نصف قيمتها العظمى

أ. نعم: المكثف في نهاية الشحن، والتيار ينعدم قبل أن يغيّر جهته.

## الطاقة في الدارة المهتزة

تبدأ المكثف بتفريغ شحنتها في الوشيعه، فيزداد التيار حتّى يبلغ قيمة عظمى في نهاية ربع الدور الأول، وقد فقدت المكثف شحنتها كلّها فاخترنت الوشيعه طاقةً كهربائيّةً عظمى. ثمّ يشحن تيار الوشيعه المكثف بالاتّجاه المعاكس حتّى ينعدم في نهاية نصف الدور، وتخزن المكثف طاقةً كهربائيّةً عظمى من جديد، وهكذا. الكتاب، الصفحة 125.

نتبع الكتاب، الصفحة 125: الطاقة الكليّة في دائرة مهتزة  $(L, C)$  مجموع طاقة المكثف وطاقة الوشيعه.

$$E = ?$$

## 1. المجموع طاقة المكثفة وطاقة الوشيعة:

$$E = E_C + E_L = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} L i^2$$

2. التعويض مع  $\bar{q} = q_{\max} \cos \omega_0 t$  و  $\bar{i} = -\omega_0 q_{\max} \sin \omega_0 t$

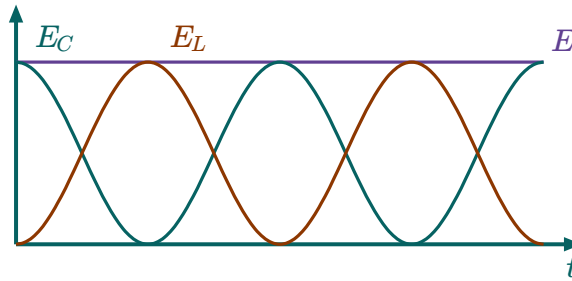
$$E = \frac{q_{\max}^2}{2C} \cos^2 \omega_0 t + \frac{1}{2} L \omega_0^2 q_{\max}^2 \sin^2 \omega_0 t$$

3. الاختصار مع  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$  يصبح الحد الثاني  $\frac{q_{\max}^2}{2C} \sin^2 \omega_0 t$  ، و  $\cos^2 + \sin^2 = 1$

$$E = \frac{1}{2} \frac{q_{\max}^2}{C} = \text{const}$$

وبالطريقة نفسها  $E = \frac{1}{2} L I_{\max}^2$  . «الطاقة الكلية للدائرة المهتزة  $(L, C)$  مقدار ثابت في كل لحظة وتمثل بخط مستقيم يُوازي محور الزمن» الكتاب، الصفحة 126:

$$E = \frac{1}{2} \frac{q_{\max}^2}{C} = \frac{1}{2} L I_{\max}^2$$



طاقة المكثفة وطاقة الوشيعة ومجموعهما خلال دور واحد، الكتاب، الصفحة 126. الرسم من عندنا.

وإن كانت للوشيعة مقاومة صغيرة تبددت الطاقة تدريجياً حرارةً بفعل جول، فتتخامد الاهتزازات، الكتاب، الصفحة 125.

في اللحظة التي تنعدم فيها شحنة المكثفة في دائرة مهتزة  $(L, C)$  ، طاقة الوشيعة:

$$\text{كيف أبدأ؟ الطاقة الكلية ثابتة، و } E_C = \frac{q^2}{2C} .$$

(أ) معدومة أيضاً

(ب) تساوي نصف الطاقة الكلية

(ج) تساوي الطاقة الكلية

ج. نعم:  $E_C = 0$  ، ف  $E_L = E = \frac{1}{2} L I_{\max}^2$  ، والتيار عندئذٍ أعظمي.

## من الكتاب: ثلاث مسائل

المسألة المحلولة، الكتاب، الصفحتان 126 و 127: نشحن مكثفًا سعته  $1 \mu\text{F}$  تحت توتر  $100 \text{ V}$  ، ثم نصلها في اللحظة  $t = 0$  بوشيعية ذاتيتها  $10^{-3} \text{ H}$  ومقاومتها مهملة. احسب الشحنة والطاقة عند  $t = 0$  ، ثم التواتر، ثم الشدة العظمى.

$$q_{\max}, E, f_0, I_{\max} = ?$$

1. الشحنة  $C = 10^{-6} \text{ F}$  :

$$q_{\max} = CU = 10^{-6} \times 100 = 10^{-4} \text{ C}$$

2. الطاقة الطاقة المخزنة في المكثف:

$$E = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \times 10^{-6} \times 10^4 = 5 \times 10^{-3} \text{ J}$$

3. التواتر  $\omega_0 = \sqrt{LC} = \sqrt{10^{-9}} \approx 3.16 \times 10^{-5} \text{ s}$  :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \approx 1.99 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \approx 5.03 \times 10^3 \text{ Hz}$$

4. الشدة العظمى  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  :

$$I_{\max} = \frac{q_{\max}}{\sqrt{LC}} = \frac{10^{-4}}{3.16 \times 10^{-5}} \approx 3.16 \text{ A}$$

يقرب الكتاب الدور إلى  $2 \times 10^{-4} \text{ s}$  ، فيحصل على  $5000 \text{ Hz}$  و  $I_{\max} = \pi \text{ A} \approx 3.14 \text{ A}$  . الفرق أقل من واحد بالمئة، والطريقتان صحيحتان:

$$I_{\max} \approx 3.16 \text{ A}$$

المسألة الأولى، الكتاب، الصفحة 130: دائرة مهتزة من مكثف شحنة كل من لبوسيه  $0.5 \mu\text{C}$  إذا طُبّق بينهما  $50 \text{ V}$  ، ومن وشيعية طولها  $10 \text{ cm}$  وطول سلكها  $16 \text{ m}$  بطبقة واحدة، مقاومتها مهملة. احسب التواتر والشدة العظمى.

$$f_0, I_{\max} = ?$$

1. السعة  $q = 0.5 \times 10^{-6} \text{ C}$  :

$$C = \frac{q}{U} = \frac{0.5 \times 10^{-6}}{50} = 10^{-8} \text{ F}$$

2. الذاتية كما في الدرس السابق،  $L = 10^{-7} \frac{\ell'^2}{\ell}$  مع  $\ell' = 16 \text{ m}$  و  $\ell = 0.1 \text{ m}$  :

$$L = 10^{-7} \times \frac{256}{0.1} = 2.56 \times 10^{-4} \text{ H}$$

3. التواتر  $\sqrt{LC} = \sqrt{2.56 \times 10^{-12}} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ s}$  :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 9.95 \times 10^4 \text{ Hz}$$

4. الشدة العظمى الشحنة العظمى  $0.5 \times 10^{-6} \text{ C}$  :

$$I_{\max} = \frac{q_{\max}}{\sqrt{LC}} = \frac{0.5 \times 10^{-6}}{1.6 \times 10^{-6}} = 0.3125 \text{ A}$$

الشدة العظمى ليست الشحنة العظمى: بينهما النبض الخاص:

$$I_{\max} = \omega_0 q_{\max}$$

المسألة الرابعة، الكتاب، الصفحة 131: مكثف سعتها  $10^{-12} \text{ F}$  تُشحن بفرق كمن  $10^3 \text{ V}$  ، ثم توصل بوشية ذاتيتها  $16 \text{ mH}$  مقاومتها مهمة. احسب الشحنة والطاقة، ثم التواتر، واكتب تابعي الشحنة والشدة ومبدأ الزمن لحظة الوصل.

$$q, E, f_0, \bar{q}, \bar{i} = ?$$

1. الشحنة والطاقة  $q = CU$  و  $E = \frac{1}{2} CU^2$  :

$$q = 10^{-12} \times 10^3 = 10^{-9} \text{ C}$$

$$E = \frac{1}{2} \times 10^{-12} \times 10^6 = 5 \times 10^{-7} \text{ J}$$

2. ما يحدث تتفرغ المكثف في الوشية فتنشأ اهتزازات كهربائية حرة، غير متخادمة لأن المقاومة مهمة. النبض والتواتر،  
:  $L = 16 \times 10^{-3} \text{ H}$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{1.6 \times 10^{-14}}} \approx 7.91 \times 10^6 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \approx 1.26 \times 10^6 \text{ Hz}$$

3. تابع الشحنة الشحنة عظمى لحظة الوصل، ف  $\bar{q} = 0$  :

$$\bar{q} = 10^{-9} \cos(7.91 \times 10^6 t)$$

4. تابع الشدة  $I_{\max} = \omega_0 q_{\max} \approx 7.91 \times 10^{-3} \text{ A}$  ، والشدة تسبق الشحنة بـ  $\frac{\pi}{2}$  :

$$\bar{i} = 7.91 \times 10^{-3} \cos\left(7.91 \times 10^6 t + \frac{\pi}{2}\right)$$

الزمن  $t$  بالثانية، والشحنة بالكولون، والشدة بالأمبير. وفي التابعين النبض  $\omega_0$  ، لا التواتر  $f_0$  :

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

## التيارات عالية التواتر

في نشاط الكتاب، الصفحة 127، مكثفة سعتها من رتبة  $10^{-8} \text{ F}$  ووشية ذاتيتها من رتبة  $10^{-4} \text{ H}$  ، فيكون

$$f_0 = \frac{10^6}{2\pi} \approx 1.6 \times 10^5 \text{ Hz} \text{ و } T_0 = 2\pi\sqrt{10^{-12}} = 2\pi \times 10^{-6} \text{ s}$$

وللوشية ممانعة  $Z_L = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$  ، فإن كانت  $r$  مهمة آلت إلى رديّة الوشية  $X_L = \omega L = 2\pi fL$  ،  
تتناسب طردياً مع التواتر. وممانعة المكثفة  $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$  تتناسب عكساً مع التواتر. الكتاب، الصفحة 128.

**تذكر:** «تُبدي الوشية ممانعة كبيرة جداً للتيارات عالية التواتر فيمر فيها تيار شدة المنتجة ضعيفة جداً.» و«تُبدي المكثفة ممانعة صغيرة جداً للتيارات عالية التواتر فيمر فيها تيار شدة المنتجة كبيرة.» الكتاب، الصفحة 128.

أيّ العنصرين يسهل مرور التيار عالي التواتر؟

**كيف أبدأ؟** كيف تتغير  $X_L = \omega L$  و  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  حين يكبر  $\omega$  ؟

(أ) الوشية

(ب) المكثفة

(ج) كلاهما بالقدر نفسه

ب. نعم:  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  تصغر كلما كبر التواتر.

---

المصدر: الفيزياء، الصفحات 121 إلى 128 من الطبعة الرسمية 2025 / 2026.