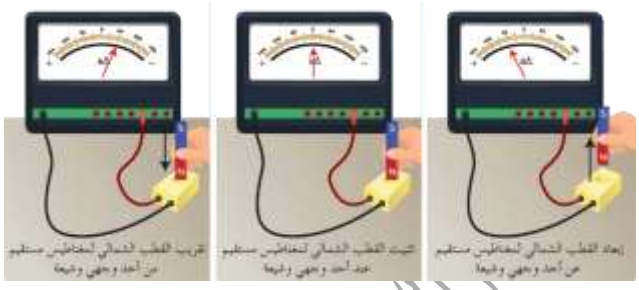
التحريض الكهرطيسي

قانونُ فارادي: تجربة (1):

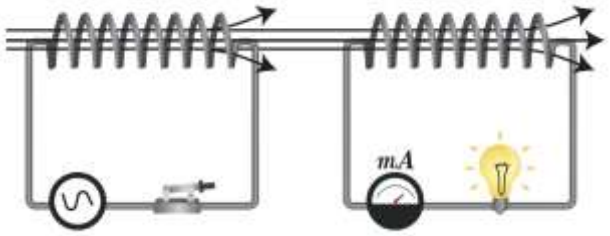


عند اقتراب أو ابتعاد القطب الشمالي لمغناطيس مستقيم من وجه الوشيعة يزداد (عند الاقتراب) أو يتناقص (عند الابتعاد) التدفق المغناطيسي في الوشيعة (دارة مغلقة) فتنشأ قوّةٌ محرّكةٌ كهربائيّةٌ مُتحرّضة تعمل على توليد تيار متحرض .

يسمى التيار المتولد عن تغير التدفق المغناطيسي عبر الدارة بالتيار المتحرض ويسمى المغناطيس المتحرك بالمحرض وتسمى حادثة توليد التيار المتحرض بواسطة المغناطيس المحرض بحادثة التحريض الكهرطيسي .

وعند توقف المغناطيس المحرض عن الحركة يصبح التدفق المغناطيسي عبر الدارة ثابتاً فينعدم التيار المتحرض .

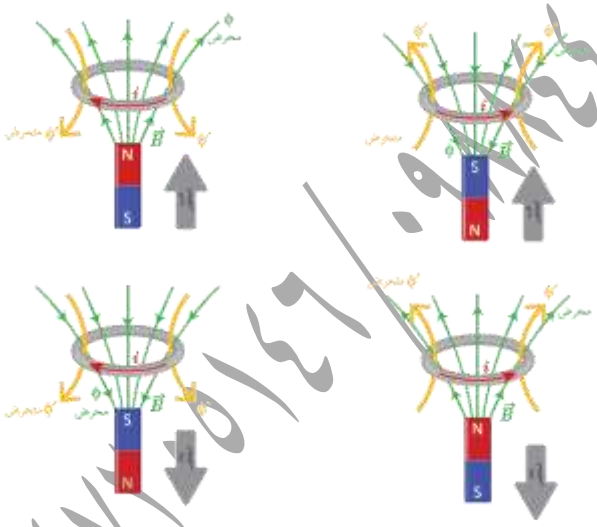
تجربة (2):



نصلُ طرفَي الوشيعةِ الأولى بمأخذِ لمولّدِ تيّارٍ كهربائيٍّ مُتناوبٍ جيبي ثم نضعُ الوشيعةَ الثانية ليكونَ محورُها مُنطبقاً على محورِ الوشيعةِ الأولى وأصلُ طرفيها بوساطةِ أسلاكِ التوصيلِ إلى المِصباحِ الكهربائيّ ومقياسِ ميكرو أمبير نغلقُ دارةَ الوشيعةِ الأولى ونراقبُ المِصباحَ الكهربائيّ ومقياسَ الميلي أمبير في الدّارة الثّانية فيتولّدُ تيّارٌ كهربائيٌّ في الدّارةِ الثّانيةِ على الرّغمِ من عدمِ وجودِ مُولّدٍ فيها ، وهو ناتجٌ عن التّحريضِ الكهرطيسيّ ويُدعى بالتيّارِ الكهربائيّ المُتحرّض ويعلّلُ ذلكَ أنّ الوشيعةَ الأولى تولّد حقلاً مغناطيسيّاً مُتناوباً جيبيّاً فيتغيّرُ التّدفّقُ المغناطيسيّ الذي يجتازُ الوشيعةَ الثّانية، وتتولّدُ قوّةٌ محرّكةٌ كهربائيّةٌ مُتحرّضة تسبّبُ مرورَ التيّارِ الكهربائيّ المُتحرّض .

نص قانونُ فارادي: يتولّدُ تيّارٌ كهربائيٌّ مُتحرّضٌ في دارةٍ مُغلقةٍ إذا تغيّرَ التّدفّقُ المغناطيسيّ الذي يجتازُها ويدومُ هذا التيّارُ بدوامِ تغيُّرِ التّدفّقِ لينعدم عند ثبات التدفق المغناطيسيّ المحرّض .

قانون لنز:



1) إنّ تقريبَ القطبِ الشّمالي من أحدِ وجهَي الوشيعةِ يولّدُ فيها تيّاراً كهربائيّاً مُتحرّضاً فيولّدُ بدورِه حقلاً مغناطيسيّاً مُتحرّضاً ، جهتُه بعكسِ جهةِ الحقلِ النّاجمِ عن المغناطيسِ المُحرّضِ الذي قرّبناه من وجهِ الوشيعة، وكذلك الأمر بالنّسبة إلى تقريبِ القطبِ الجنوبيّ .

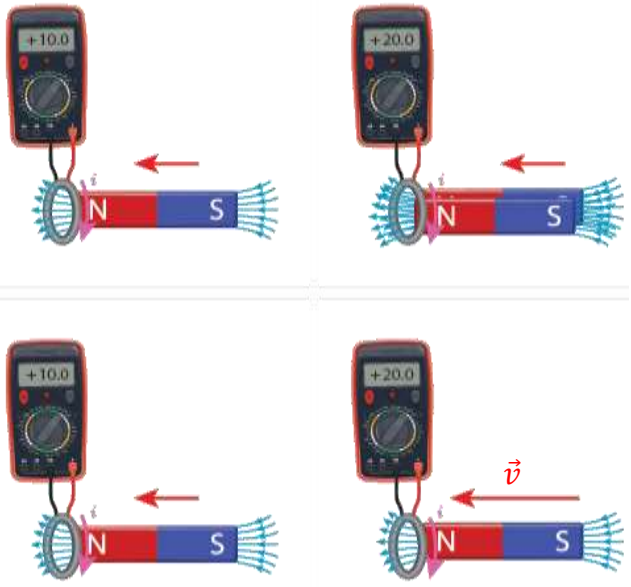
2) إنّ إبعادَ القطبِ الشّمالي للمغناطيس المُحرِّض عن أحدِ وجهَي الوشيعةِ يؤدّي إلى تولّد تيّار مُتحرِّض في الوشيعةِ يولّد بدوره حقلاً مغناطيسيّاً مُتحرِّضاً تتّفقُ جهتُه مع جهةِ الحقلِ الناجمِ عن المغناطيسِ المُحرِّض، وكذلك الأمرُ بالنّسبة إلى إبعادِ القطبِ الجنوبيّ.

3) تسعى الوشيعةُ لإبقاص التّدفّق المغناطيسيّ الذي يجتازُها في حالِ تزايدِ التّدفّقِ المغناطيسيّ المُحرِّض النّاجم عن تقريب المغناطيس.

4) تسعى الوشيعةُ لزيادةِ التّدفّق المغناطيسيّ الذي يجتازُها في حالةِ إبقاصِ التّدفّق المغناطيسيّ المُحرِّض النّاجم عن إبعادِ المغناطيس.

نص قانونُ لنز: إنّ جهةَ التّيار المُتحرِّض في دارةٍ مُغلَقة تكونُ بحيثُ يُنتِجُ أفعالاً تعاكِسُ السّببَ الذي أدّى إلى حدوثه.

القوّة المُحرِّكة الكهربائيّة المُتحرِّضة:



هي فرق الكمون بين طرفي الدارة والناتج عن تغير التدفق المغناطيسي خلال تغير الزمن.

تتناسبُ القوّةُ المُحرِّكة الكهربائيّة المُتحرِّضة ε:

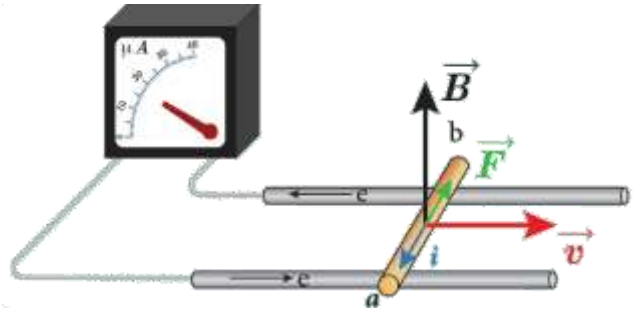
1) طرداً مع تغيّر التدفق المغناطيسيّ المُحرِّض $d\Phi$.

2) عكساً مع زمنِ تغيُّر التّدفُّق المغناطيسيّ المُحرِّض dt.

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

حيثُ تنسجمُ الإشارة السّالبة مع قانونِ لنز.

التعليل الإلكتروني لنشوء التيّار المُتحرِّض والقوّة المُحرِّكة الكهربائيّة المُتحرِّضة:

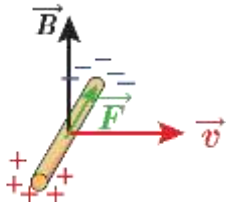


ندحرجُ السّاق النّاقلة على السكتين فينحرفُ مؤشّرُ مقياس الميكرو أمبير دليل مرور تيّار كهربائيّ مُتحرِّض نعلل ذلك بأنه:

عند تحريكِ السّاق بسرعةٍ ثابتةٍ عموديّاً على خطوطِ الحقل المغناطيسيّ فإنّ الإلكتروناتِ الحرّةَ في السّاق ستتحرّكُ بهذه السّرعة وسطيّاً ومع خضوعها لتأثير الحقل المغناطيسيّ المُنتظم فإنّها تخضعُ لتأثيرِ القوّة المغناطيسيّة $\vec{F} = e\vec{v}\Lambda\vec{B}$

وبتأثيرِ هذه القوّة تتحرّكُ الإلكتروناتُ الحرّة في السّاق وتتولّدُ قوّةٌ مُحرِّكةٌ كهربائيّةٌ تحريضيّةٌ تسبّبُ مرورَ تيّارٍ كهربائيّ مُتحرِّض عبرَ الدّارة المغلقة جهتُه الاصطلاحيّة بعكسِ جهةِ حركة الإلكتروناتِ الحرّة أي بعكسِ جهةِ القوّة المغناطيسيّة.

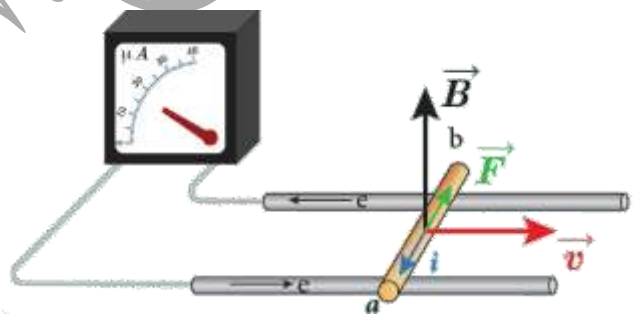
عند فتح الدّارة:



عندَ تحريكِ السّاق بسرعةٍ $\vec{v}$ على سكّتين معزولتين في منطقةٍ يسودُها حقلٌ مغناطيسيٌّ تنشأُ القوّةُ المغناطيسيّة وبتأثيرِ هذهِ القوّةِ تنتقلُ الإلكتروناتُ الحرّةُ من أحدِ طرفي السّاق الذي يكتسبُ شحنةً موجبةً، وتتراكمُ في الطّرفِ الآخرِ الذي يكتسبُ شحنةً سالبةً فينشأُ بينَ طرفي السّاق فرقاً في الكمونِ يمثّلُ القوّةَ المحرّكةَ الكهربائيّةَ المُتحرّضة.

تطبيقاتُ التّحريض الكهرطيسيّ:

1. مبدأُ المولِّد:



لندرس نظرياً تحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائيّة:

عندَ تحريكِ السّاق بسرعةٍ ثابتةٍ $\vec{v}$ عموديّةٍ على شُعاعِ الحقلِ المغناطيسيِّ المُنتظمِ $\vec{B}$ خلالَ فاصلٍ زمنيٍّ Δt تنتقلُ الساق مسافة: $\Delta x = v\Delta t$ فيتغيّرُ السّطحُ بالمقدار:

$$\Delta S = L\Delta x = Lv\Delta t$$

فيتغيّرُ التّدفّقُ المغناطيسيُّ بالمقدار:

$$\Delta\Phi = B\Delta S = BLv\Delta t$$

فتتولّدُ قوّةٌ محرّكةٌ كهربائيّةٌ مُتحرّضة قيمتُها المُطلقة:

$$\varepsilon = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \frac{BLv\Delta t}{\Delta t} = BLv$$

وبما أنّ الدّارةَ مُغلقةٌ يمرُّ تيّارٌ كهربائيٌّ مُتحرّضٌ شدّتُه:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{BLv}{R}$$

فتكونُ الاستطاعةُ الكهربائيّةُ النّاتجة:

$$P = \varepsilon i$$

$$P = (BLv) \times \left(\frac{BLv}{R}\right)$$

$$P = \frac{B^2L^2v^2}{R}$$

ولكن عندَ تحريكِ السّاق بسرعةٍ $\vec{v}$ تنشأُ قوّةٌ كهرطيسيّةٌ، جهتُها بعكسِ جهةِ حركةِ السّاق المُسبّبةِ لنشوءِ التّيارِ المُتحرّض، ولاستمرارِ تولّدِ التّيارِ يجبُ التّغلّبُ على هذهِ القوّةِ الكهرطيسيّة بصرف استطاعةٍ ميكانيكيّة p'.

$$P' = Fv$$

لكن: $F = iLB\sin\frac{\pi}{2} \Rightarrow F = iLB$

والتيار المتحرض: $i = \frac{BLv}{R}$

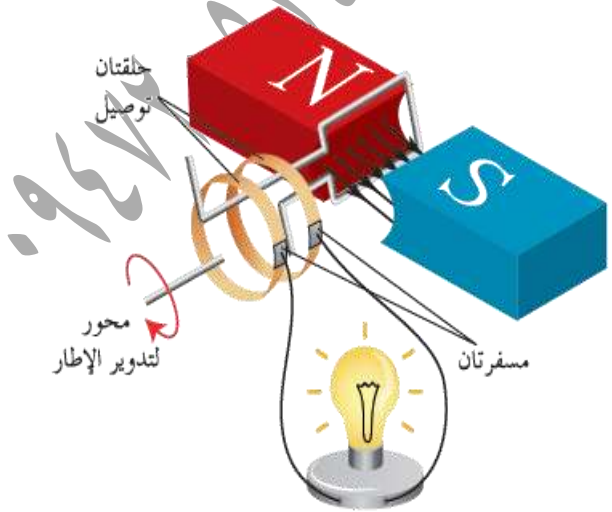
نعوّضُ: $P' = \mathrm{F}v = iLBv = \frac{BLv}{R}LBv$

$$P' = \frac{B^2L^2v^2}{R}$$

وبموازنةِ العلاقتين نجدُ أنّ: $P' = P$.

وبهذا تكونُ قد تحوّلت الطّاقةُ الميكانيكيّةُ إلى طاقةٍ كهربائيّة.

2. مولد التيار المتناوب الجيبي:



0947205146
0988440574

وصفه: يتكوّن من إطار مؤلف من N لفة متماثلة مساحة كلٍّ منها S أسلاكه ناقلة ومعزولة ومَلفوفة بالاتّجاه ذاته يدور حول محور في منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ ويتّصل طرفا المَلف بحلقتين R_1, R_2، بحيث يمرّ محور الدّوران بمركز هاتين الحلقتين، وتدور الحلقتان بدوران المَلف ويمسّ كلّ حلقة مسفرة معدنية (ناقلة) (k_1, k_2)، وتتصل هاتان المسفرتان المَلفَ بالدّارة الخارجيّة كما في الشكل السابق.

استنتاج العلاقة المحدّدة للقوّة المحرّكة الكهربائيّة المتحرّضة:

بفرض أنّه في لحظة ما أثناء الدّوران كان النّاظم على مستوي الإطار يصنع مع شعاع الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ زاوية قدرها α، فيكون التّدفّق المغناطيسي Φ الذي يجتاز سطح الإطار:

$$\bar{\Phi} = NBs\cos\alpha$$

فإذا كانت السّرعة الزّاوية لدوران الإطار ω ثابتة، فإنّ الزّاوية α التي يدورها المَلف في زمن قدره t:

$$\alpha = \theta' = \omega t$$

نعوّض فنجد: $\bar{\Phi} = NBS\cos\omega t$

وتكون القوّة المحرّكة الكهربائيّة المتحرّضة ε:

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

$$\bar{\varepsilon} = NSB\omega\sin\omega t$$

تكون ε عظمى عندما: $\sin\omega t = 1$

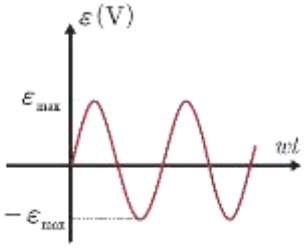
نعوض: $\varepsilon_{max} = NSB\omega$ فنجد أن:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{max}\sin\omega t$$

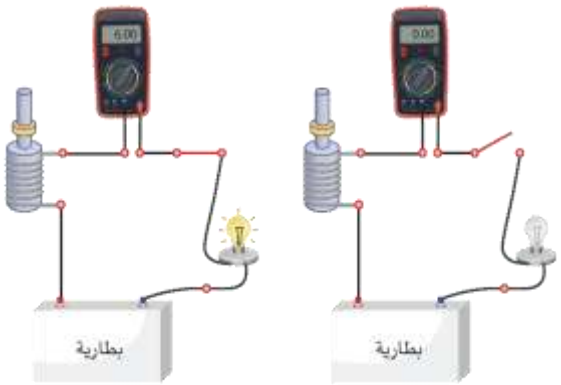
وبذلك نحصل على التيار المتناوب الجيبي لأنّ:

القوّة المحرّكة الكهربائيّة المتحرّضة ε متناوبة جيبيّة لحظية.

عند رسم تغيّرات ε بدلالة ωt نحصل على المنحني البياني الآتي:



3. مبدأ المُحرّك:



- عندَ إغلاقِ القاطعةِ ومنعِ المُحرّك من الدّوران يتوهّجُ المصباحُ ويدلُّ المقياسُ على مرورِ تيّارٍ كهربائيٍّ له شدّةٌ معيّنة.
- عندَ السّماحِ للمُحرّك بالدّوران تبدأُ سرعتُه بالازديادِ فيقلّ توهّجُ المصباح وتنقصُ دلالةُ المقياس ممّا يدلُّ على مرورِ تيّارٍ كهربائيٍّ شدّتُه أصغرُ.
- تتولّدُ في المُحرّك قوّةٌ مُحرّكةٌ كهربائيّةٌ تحريضيّةٌ عكسيّةٌ مُضادّةٌ للقوّة المُحرّكة الكهربائيّة المُطبّقة بين قطبي المولّد، وتزدادُ بازديادِ سرعةِ دوران المُحرّك.
- يوجدُ في المُحرّك وشيعةٌ يمرُّ فيها تيّارٌ كهربائيٌّ تدورُ بتأثيرِ حقلٍ مغناطيسيٍّ وبسببِ هذا الدّوران يتغيّرُ التّدفّقُ المغناطيسيُّ من خلالِ الوشيعةِ ممّا يسبّبُ تولّدَ قوّةٍ مُحرّكةٍ تحريضيّةٍ عكسيّةٍ تتوقّفُ على سرعةِ دوران المُحرّك.

بحث التحريض الكهرطيسي

لندرسَ نظرياً تحوُّلَ الطّاقةِ الكهربائيَّةِ إلى طاقةٍ ميكانيكيَّة في المُحرِّك:

عندَ مرورِ التّيارِ الكهربائيِّ في السّاقِ الخاضعةِ لتأثيرِ الحقلِ المغناطيسيِّ المُنتظَمِ $\vec{B}$، فإنّها تتأثّرُ بقوّةٍ كهرطيسيّةٍ شدتها:

$$F = ILB$$

تعملُ القوّةُ الكهرطيسيّة على تحريكِ السّاقِ بسرعةٍ ثابتةٍ $\vec{v}$، وتكونُ الاستطاعةُ الميكانيكيةُ الناتجة: $P' = Fv$

$$P' = ILBv$$

لكنْ عندَ انتقالِ السّاقِ مسافةَ Δx، فإنّ التّدفّقَ المغناطيسيَّ يتغيّرُ بالمقدار: $\Delta\Phi = BLv\Delta t$

فتتولّدُ في الساقِ قوّةٌ محرّكةٌ كهربائيّةٌ مُتحرّضةٌ عكسيّةٌ تعاكسُ مرورَ تيّارِ المولّدِ فيها تُعطى قيمتُها المُطلقةُ بالعلاقة:

$$\varepsilon' = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = BLv$$

ولاستمرارِ مرورِ تيّارِ المولّدِ يجبُ تقديمُ استطاعةٍ كهربائيّة:

$$P = \varepsilon' I$$

$$P = BLvI$$

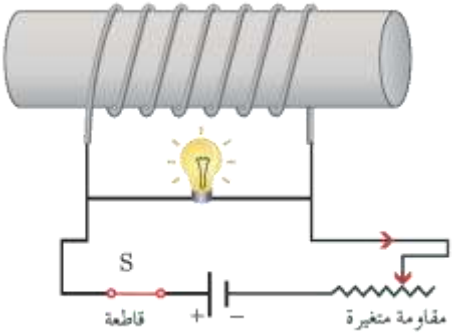
بالموازنةِ نجدُ: $P' = P$

وبهذا الشّكلِ تتحوّلُ الطّاقةُ الكهربائيّةُ إلى طاقةٍ ميكانيكيّة.

التّحريضُ الذّاتيّ:

لدينا دارةٌ موضحةٌ بالشكلِ تتألفُ من وشيعةٍ ومصباحٍ وأبالٍ كهربائيّةٍ ومُقاومةٍ مُتغيّرةٍ مع زالقٍ (مُعدّلة) وقاطعةٍ وأسلاكٍ توصيل.

نغلقُ القاطعة، ونحرّكُ الزّالقةَ حتّى تصبحَ إضاءةُ المصباحِ خافتةً.



- عندَ فتحِ القاطعةِ يتوهّجُ المصباحُ بشدةٍ قبلَ أن ينطفئ، ممّا يدلُّ على حصولِ المصباحِ على الطّاقةِ من مصدرٍ آخرَ غيرِ المولّدِ؛ لأنّ دارتَه مفتوحةٌ ولا يوجدُ في الدّارةِ إلا الوشيعة، ويحدثُ هذا نتيجةَ التّحريضِ الذّاتيِّ في الوشيعة، حيثُ أنّ فتحَ القاطعةِ يؤدّي إلى تناقصِ شدّةِ التّيارِ المارّ في الوشيعة، فيتناقصُ تدفّقُ الحقلِ المغناطيسيِّ المُتولّدِ في الوشيعة خلالَ الوشيعةِ ذاتِها، الأمرُ الذي يولّدُ قوّةً كهربائيّةً مُحرّكةً مُتحرّضةً في الوشيعةِ أكبرَ من القوّةِ المُحرّكةِ الكهربائيّةِ للمولّد، لأنّ زمنَ تناقصِ الشّدّةِ مُتناهي الصغر حيثُ تكونُ قيمةُ $\frac{di}{dt}$ أعلى ما يمكنَ لحظةَ فتحِ القاطعة.
- عندَ إغلاقِ القاطعةِ من جديدٍ يتوهّجُ المصباحُ ثمّ يعودُ إلى ضوئِه الخافت، حيثُ تتزايدُ شدّةُ التّيارِ وبالتّالي يتزايدُ تدفّقُ الحقلِ المغناطيسيِّ المُتولّدِ عن الوشيعةِ عبرَ الوشيعةِ ذاتِها، فيتولّدُ فيها قوّةٌ محرّكةٌ كهربائيّةٌ مُتحرّضةٌ تمنعُ مرورَ التّيارِ المولّدِ فيها، ويمرُّ تيّارُ المتحرّضِ في المصباحِ فقط مُسبّباً توهّجَه قبلَ أن تخبوَ إضاءتُه بسببِ تناقصِ قيمةِ $\frac{di}{dt}$ للتيارِ المتحرّضِ وازديادِ مرورِ تيّارِ المولّدِ تدريجيّاً في الوشيعةِ حتّى ثباتِ الشّدّةِ فتنعدمُ القوّةُ المُحرّكةُ الكهربائيّةُ المُتحرّضةُ في الوشيعة.

إنّ الوشيعةَ قامت بدورِ مُحرّضٍ ومُتحرّضٍ في آنٍ واحد، لذلك ندعو الدّارةَ بالدّارةِ المُتحرّضةِ الذاتيةِ وندعو الحادثةَ تحريضاً ذاتيّاً.

ذاتيّةُ الوشيعة: تُعطى شدّةُ الحقلِ المغناطيسيِّ المتولّدِ عن مرورِ تيّارٍ في الوشيعةِ بالعلاقة:

$$B = 4\pi \times 10^{-7}\frac{Ni}{\ell}$$

0947205146
0988440574

ويكون تدفّقُ هذا الحقل من خلال الوشيعة ذاتها:

$$\bar{\Phi} = NSB$$

$$\bar{\Phi} = NS(4\pi \times 10^{-7}\frac{Ni}{\ell})$$

$$\bar{\Phi} = 4\pi \times 10^{-7}\frac{N^2S}{\ell}i$$

نلاحظ أنّ أمثال شدّة التيار مقدارٌ ثابتٌ يميّزُ الوشيعة، يدعى ذاتيّة الوشيعة L واحدةُ قياسها في الجملة الدّوليّة هي الهنري H وهو: ذاتيّة دارة مُغلقة يجتازُها تدفّقٌ مغناطيسيٌّ قدرُه ويبر واحد عندما يمرُّ فيها تيارٌ، قدرُه أمبير واحد.

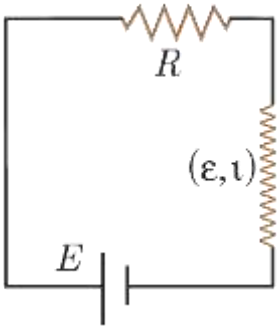
$$L = 4\pi \times 10^{-7}\frac{N^2S}{\ell}$$

نعوض فنجد: $\bar{\Phi} = Li$

فتصبح علاقة القوّة المُحرّكة الكهربائيّة المُتحرّضة الذّاتيّة بدلالة شدّة التيار المُتغيّر الذي يجتازُها: $\bar{\varepsilon} = -\frac{d\bar{\Phi}}{dt}$

$$\bar{\varepsilon} = -L\frac{di}{dt}$$

الطّاقةُ الكهرطيسيّةُ المُختزَنة في وشيعةٍ:



نربطُ وشيعةً ذاتيتُها L، على التّسلسل مع مُقاومةٍ أومية R ومولّدٍ قوّته المُحرّكة الكهربائيّة E، كما في الدّارة الموضّحة بالشّكل:

بحسب قانون كيرشوف الثّاني:

$$\sum \bar{E} = Ri$$
$$\bar{E} + \bar{\varepsilon} = Ri$$
$$\bar{E} - L\frac{di}{dt} = Ri$$

$$\bar{E} = Ri + L\frac{di}{dt}$$

نضربُ طرفي العلاقة بـ idt فنجد:

$$Eidt = Ri^2dt + Lidi$$

يمثّلُ المقدار $Eidt$ الطّاقة التي يقدّمُها المولّد خلال الزّمن dt، وهذه الطّاقة تنقسمُ إلى قسمين:

القسمُ الأول: Ri^2dt يمثّلُ الطّاقة الضّائعة حراريّاً بفعل جول في المُقاومة خلال الزّمن dt.

القسمُ الثّاني: $Lidi$ يمثّلُ الطّاقة الكهرطيسيّة المُختزَنة في الوشيعة خلال الزّمن dt.

وتختزنُ الوشيعة طاقةً كهرطيسيّة E_L في لحظة t عندما تزدادُ شدّةُ التيار المارّة في الدّارة من الصّفر إلى قيمتها النهائية I.

$$E_L = \int_0^I Lidi$$

$$E_L = \frac{1}{2}LI^2$$

وهي العلاقة المُحدّدة للطّاقة الكهرطيسيّة المُختزَنة في الوشيعة

ويمكن أن تُكتب بالشّكل:

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

$$E_L = \frac{1}{2}\Phi I$$

تطبيق: وشيعةٌ طولُها $20\ cm$ وطولُ سلكها $40\ m$ بطبقةٍ واحدةٍ مقاومتُها الأومية مُهمَلةٌ والمطلوب:

1) احسبْ ذاتيّة الوشيعة.

2) إذا كان نصفُ قطر اللّفة الواحدة $4\ cm$ فاحسبْ عددَ لفّات الوشيعة.

3) نمرّرُ في الوشيعة تيّاراً كهربائيّاً تزدادُ شدّته بانتظام من الصّفر إلى $10\ A$ خلال $0.5\ S$ احسب القوة المُحرّكة الكهربائيّة المُتولّدة داخل الوشيعة مُحدّداً جهة التيار المُتحرّض.

4) احسب الطّاقة الكهرطيسيّة المُختزَنة في الوشيعة.

الحل: 1) $L = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N^2 S}{\ell}$

لكن عددُ اللّفات يُعطى بالعلاقة: $N = \frac{\ell'}{2\pi r}$

وسطحُ الوشيعة يعطى بالعلاقة: $s = \pi r^2$

نعوض: $L = 4\pi \times 10^{-7} \frac{(\frac{\ell'}{2\pi r})^2 \pi r^2}{\ell}$ فنجد بعد الاختصار:

$$L = 10^{-7} \frac{\ell'^2}{\ell} = 10^{-7} \times \frac{1600}{0.2}$$

$$L = 8 \times 10^{-4}\ H$$

2) لفة $N = \frac{\ell'}{2\pi r} = \frac{40}{2\pi \times 4 \times 10^{-2}} = \frac{4000}{25} = 160$

3) $\bar{\varepsilon} = -L\frac{di}{dt} = -8 \times 10^{-4} \frac{10}{0.5}$

$$\bar{\varepsilon} = -16 \times 10^{-3} V$$

بالتالي $\vec{B}$ مُحرِض، $\vec{B}'$ مُتحرِض على حاملٍ واحدٍ وبجهتين مُتعاكِستين.

4) $E_L = \frac{1}{2} L I^2$

$$E_L = \frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-4} \times 100 = 4 \times 10^{-2}\ J$$

اختبر نفسي:

أولاً: اختر الإجابةَ الصَّحيحة في كلٍّ ممّا يأتي:

1) وشيعةٌ طولُها $\ell = 10\ cm$ وطولُ سلكِها $\ell' = 10\ m$ فقيمةُ ذاتيّتها:

a) $10^{-4} H$ b) $10^{-6} H$

c) $10^{-8} H$ d) $10^{-7} H$

الإجابة الصحيحة: a) $L = 10^{-4} H$

توضيح اختيار الإجابة: $L = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N^2}{\ell} s$

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \frac{(\frac{\ell'}{2\pi r})^2 \pi r^2}{\ell} = 10^{-7} \frac{(\ell)'^2}{\ell}$$

$$L = 10^{-7} \frac{(10^2)}{10 \times 10^{-2}} = 10^{-4} H$$

2) في تجربةِ السّكّتين التّحريضيّة حيثُ الدّارة مُغلقة تكونُ القيمةُ المُطلقة لشدّةِ التيّار المُتحرِّض:

a) BLv b) $\frac{BLv}{R}$

c) 0 d) $-\frac{BLv}{R}$

ثانياً: ماذا تتوقّعُ أن يحدُثَ في كلٍّ من الحالاتِ الآتيةِ مُعلّلاً إجابتِكَ:

1) في تجربةِ السّكّتين التّحريضيّة حيثُ الدّارةُ مُغلقةٌ، نزيدُ سرعةَ تدحرُجِ السّاقِ على السّكّتين.

الحدث: تزداد شدة التيار المتحرض.

التعليل: لأن شدة التيار المتحرض تتناسب طرداً مع سرعة التدحرج v $i = \frac{BLv}{R} = const$

2) تقريبُ القطبِ الشّمالي لمغناطيس من أحدِ وجهَي وشيعةٍ يتّصلُ طرفاها بعضِهما البعض.

الحدث: يتولد تيار متحرض في الوشيعة بحيث يصبح وجه الوشيعة المقابل للقطب الشمالي وجها شماليا.

التعليل: تقريب القطب الشمالي للمغناطيس يسبب تزايد التدفق المغناطيسي المُحرض الذي يجتاز حلقات الوشيعة فحسب قانون لنز تكون جهة التيار المتحرض بحيث تنتج أفعالا تعاكس السبب الذي أدى إلى حدوثه لهذا فالوجه الشمالي يتنافر مع القطب الشمالي ليمنع عملية التقريب.

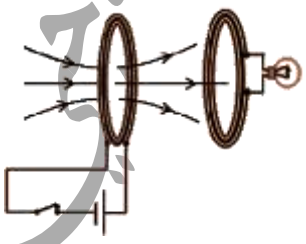
3) تقريبُ القطبِ الشّمالي لمغناطيس من أحدِ وجهَي حلقةٍ نحاسيّةٍ دارتُها مفتوحةٌ.

الحدث: يتولد قوة محركة كهربائية متحرضة مساوية لفرق الكمون بين طرفي الحلقة.

التعليل: تتأثر الإلكترونات الحرة بقوة لورنز المغناطيسية فتنتقل وتتراكم شحنات سالبة عند طرف الحلقة وشحنات موجبة عند الطرف الآخر للحلقة فينشأ فرق في الكمون بين طرفي الحلقة.

ثالثاً: أجِبْ عن الأسئلةِ الآتيةِ:

1) مَلفّان مُتقابلان الأوّلُ موصولٌ إلى بيلٍ كهربائيٍّ والثاني إلى مصباحٍ هل يضيء المصباحُ إذا كانَ المَلفّان ساكنين؟ في حالِ النفي ماذا نفعل ليضيءَ المِصباحُ؟ ولماذا؟



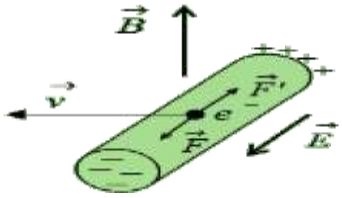
الحل: لا يضيء المصباح إذا كان الملفان ساكنين لأن التدفق المغناطيسي للحقل المغناطيسي الناجم عن الملف الأول لا يتغير من خلال الملف الثاني.

ليضيء المصباح يجب أن يتغير التدفق المغناطيسي للحقل المغناطيسي الناجم عن الملف الأول ويمكن تحقيق ذلك:

- بفتح وغلق القاطعة باستمرار في دارة الملف الأول فتتغير شدة الحقل المغناطيسي الناجم عن الملف الأول وبالتالي يتغير التدفق المغناطيسي لهذا الحقل من خلال الملف الثاني فيتولد تيار كهربائي متحرض يسبب إضاءة المصباح.
- تحريك أحد الملفين نحو الآخر.
- استبدال البيل الكهربائي بمنبع تيار كهربائي متناوب.

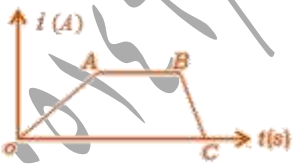
2) في تجربةِ السّاقِ المُتحرّكةِ بوجودِ الحقلِ المغناطيسيِّ المُنتظِمِ في دارةٍ مفتوحةٍ، تتراكمُ الشّحناتُ المُوجبةُ في طرفٍ والشّحناتُ السّالبةُ في طرفٍ آخرَ، ويستمرُّ التّراكمُ إلى أنْ يصلَ إلى قيمةٍ حدّيّةٍ يتوقّفُ عندَها. فسّرْ ذلك.

الحل:



إن تراكم الشحنات الكهربائية على طرفي الساق يولّد حقلا كهربائيا $\vec{E}$ يتجه من الطرف الذي يحمل شحنات كهربائية موجبة إلى الطرف الذي يحمل شحنات كهربائية سالبة يؤثر هذا الحقل الكهربائي في الإلكترون الحر بقوة كهربائية $\vec{F'}$ جهتها تعاكس جهة القوة المغناطيسية $\vec{F}$ (قوة لورنز) المؤثرة في هذا الإلكترون ثم تزداد شدة الحقل الكهربائي بازدياد تراكم الشحنات الكهربائية مما يزيد من شدة هذه القوة الكهربائية لتصبح مساوية لشدة القوة المغناطيسية (قوة لورنز) فتتوقف حركة الإلكترونات.

3) يبيّنُ الخطُّ البيانيُّ المرسومُ جانباً تغيّراتِ تيّارِ المُولّدِ المارّ في الوشيعةِ في حادثةِ التّحريضِ الذّاتيِّ.



a) ماذا تُمثّلُ كلٌّ منَ المراحلِ: (BC ,AB ,OA).

b) أيُّهما أكبرُ القوّةُ المُحرّكةُ الكهربائيّةُ المُتحرّضةُ عندَ إغلاقِ أو فتحِ الدّارةِ

c) في أيِّ المراحلِ تزدادُ الطّاقةُ الكهرطيسيّةُ المُختزنةُ في الوشيعةِ؟ وفي أيِّ المراحلِ تكونُ ثابتةً؟ وفي أيِّ المراحلِ تتناقصُ الطّاقةُ الكهرطيسيّةُ المُختزنةُ في الوشيعة.

الحل: a) المرحلة OA تزايد شدة التيار الكهربائي المار في الوشيعة فيتوهج المصباح نسبيا ثم يعود لإضاءته الخافتة.

المرحلة AB ثبات شدة التيار الكهربائي المار في الوشيعة فتثبت شدة إضاءة المصباح.

المرحلة BC تناقص شدة التيار الكهربائي المار في الوشيعة فيتوهج المصباح بشدة ثم ينطفئ.

b) عند فتح الدارة تكون القوة المحركة الكهربائية المتحرضة أكبر من القوة المحركة الكهربائية المتحرضة عند غلق القاطعة لأن القيمة المطلقة للقوة المحركة الكهربائية المتحرضة $\bar{\varepsilon} = -L\frac{\bar{di}}{dt}$ تتناسب عكساً مع dt وزمن تناقص شدة التيار في المرحلة BC أصغر من زمن تزايد التيار في المرحلة $0A$ لذا تكون القوة المحركة الكهربائية المتحرضة أكبر عند فتح الدارة.

c) تزداد الطاقة الكهرطيسية المختزنة في الوشيعة في المرحلة $0A$ وتكون الطاقة الكهرطيسية المختزنة في الوشيعة ثابتة في المرحلة AB وتتناقص الطاقة الكهرطيسية المختزنة في ذاتية الوشيعة في المرحلة وتتحول BC إلى طاقة كهربائية.

4) وشيعة يمرّ فيها تيار كهربائي متغير شدته i:

a) اكتب عبارة شدة الحقل المغناطيسي المتولد داخلها نتيجة مرور التيار.

b) اكتب عبارة التدفق المغناطيسي للحقل المغناطيسي.

c) استنتج العلاقة المحددة للقيمة الجبرية للقوة المحركة الكهربائية المتحرضة الآنية الذاتية المتحرضة فيها موضحاً متى تنعدم قيمة هذه القوة.

الحل: a) $B = 4\pi \times 10^{-7}\frac{N}{\ell}I$

b) $\Phi = \text{NBS}\cos\alpha$ لكن:

$$\alpha = 0 \Rightarrow \cos\alpha = 1 \Rightarrow \Phi = NBS$$

c) $$\Phi = N\left(4\pi \times 10^{-7}\frac{N}{\ell}I\right)S$$

$$\Phi = N\left(4\pi \times 10^{-7}\frac{N^2}{\ell}S\right)I$$

$$\Phi = LI$$

$$\varepsilon = -\frac{\overline{d\Phi}}{dt} = -L\frac{di}{dt}$$

تنعدم قيمة هذه القوة المحركة الكهربائية المتحرضة الآنية الذاتية عند ثبات قيمة التيار.

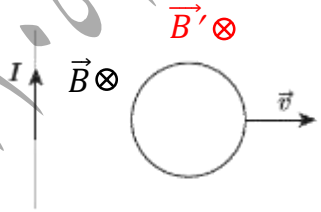
5) في الشكل المجاور ملفٌ دائري نحركه بسرعة ثابته عمودية على السلك المستقيم المطلوب:

a) حدّدْ على الرسم جهة الحقل المغناطيسي المتولد عن مرور التيار الكهربائي في السلك المستقيم عند مركز الملف الدائري.

b) حدّد على الرسم جهة الحقل المغناطيسي المتحرض المتولد في الملف، وجهة التيار الكهربائي المتحرض.

c) صِفْ ما يحدث إذا أوقفنا الملف عن الحركة، معللاً إجابتك؟

الحل: a) + b) جهة التيار المتحرض بنفس جهة دوران عقارب الساعة



c) إذا أوقفنا الملف الدائري عن الحركة تثبت شدة الحقل المغناطيسي المحرض وبالتالي يصبح تغير التدفق المغناطيسي المحرض معدوم فتنعدم القوة المحركة الكهربائية المتحرضة وتنعدم شدة التيار المتحرض.

رابعاً: حُلَّ المسائلَ الآتية:

المسألة الأولى: مَلفٌّ دائريٌّ، يتألَّفُ من 100 لفّةٍ مُتماثلة، نصفُ قطرهِ الوسطيِّ $4\ cm$، نصل طرفيه بمقياس أمبير موصولاً على التَّسلسل معَ مقاومةٍ أوميةٍ قيمتُها 20Ω، نقرّبُ من أحدِ وجهَي المَلفِّ القطبَ الشّمالي لمغناطيسٍ مُستقيمٍ، فتزدادُ شدَّةُ الحقلِ المغناطيسيِّ الذي يخترقُ لفّاتِ المَلفِّ الدّائريِّ بانتظامٍ من الصّفرِ إلى $0.08T$ خلال $2S$ والمطلوب:

1) احسبْ قيمةَ القوّةِ المحرّكةِ الكهربائيّةِ المُتحرّضةِ المُتولّدةِ في المَلفِّ الدّائريِّ مُحدّداً جهةَ التّيارِ الكهربائيِّ المُتحرّض.

2) ما نوعُ الوجهِ المُقابلِ للقطبِ الشّمالي؟

3) احسبْ شدّةَ التّيارِ المارّةِ في المَلفِّ.

4) احسبِ الاستطاعةَ الكهربائيّةَ المُتولّدةَ عنِ المَلفِّ الدّائريِّ ثمَّ الاستطاعةَ الحراريّةَ المصروفةَ في المُقاومةِ الأوميةِ وماذا تستنتجُ.

الحل: 1)

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

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{N(\Delta B)S\cos\alpha}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = -\frac{100\times(0.08-0)\times 16\pi\times10^{-4}\times 1}{2}$$

$$\varepsilon = -2\times10^{-2}V$$

بما أنّ $\bar{\varepsilon}<0$ وحسب لنز $\vec{B}$ مُحرض، $\overrightarrow{B'}$ مُتحرض بجهتين متعاكستين أي Φ مُحرض يعاكس Φ' مُتحرض.

2) الوجه المقابل للقطب الشمالي وجه شمالي يدور فيه التيار المتحرض بعكس دوران عقارب الساعة.

3) $$i = \frac{\bar{\varepsilon}}{R} = -\frac{2\times10^{-2}}{20} = -10^{-3}A$$

4) $$P = \varepsilon i = -2\times10^{-2}\times-10^{-3}$$

$$P = 2\times10^{-5}\ Watt$$

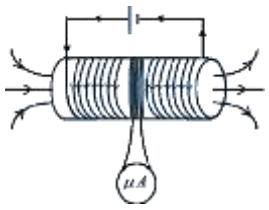
$$P' = Ri^2 = 20\times10^{-6} = 2\times10^{-5}\ Watt$$

أي أنّ الاستطاعة الكهربائية تحولت إلى استطاعة حرارية.

المسألة الثّانية: 1) لدينا وشيعةٌ، طولُها $30cm$، ، قطرُها $4\ cm$، تحوي 1200 لفة، نمرّرُ فيها تيّاراً شدّتُه $4A$ احسب شدة الحقل المغناطيسيِّ في مركزِ الوشيعة.

2) نلفُّ حولَ القسمِ المتوسطِ من الوشيعةِ مَلفّاً يحوي 100 لفةٍ معزولةٍ، ونصلُ طرفيه بمقياسٍ غلفانيٍّ، بحيثُ تكونُ المُقاومةُ الكلّيّةُ للدّارةِ الجديدةِ 16Ω علل نشوء التيار المتحرض في الملف الدائري وما دلالةُ المقياسِ عندَ قطعِ التّيارِ عنِ الوشيعةِ خلال $0.5\ S$ تكونُ المُقاومةُ الكلّيّةُ للدّارةِ الجديدةِ تتناقصُ فيها الشّدّةُ بانتظام؟

الحل:



1)

$$B = 4\pi\times10^{-7}\frac{N}{\ell}I$$

$$B = 12.5\times10^{-7}\frac{1200}{30\times10^{-2}}\times 4$$

$$B = 2\times10^{-2}\ T$$

2) تلعب الوشيعة دور جملة محرّضة والملف جملة متحرّضة وعند قطع التيار عن الوشيعة يتناقص التدفق المغناطيسي المحرّض الناتج عن الوشيعة الذي يجتاز الملف وهذا يؤدي حسب قانون فاراداي إلى نشوء تيار متحرّض في الملف.

$$i = \frac{\bar{\varepsilon}}{R} = -\frac{\Delta\Phi}{R\,\Delta t} = -\frac{N\,\Delta B\,S\cos\alpha}{R\,\Delta t}$$

$$i = -\frac{100\,(0-2\times10^{-2})\,\pi(2\times10^{-2})^2\times1}{16\times0.5}$$

$$i = \frac{8\pi\times10^{-4}}{8} = \pi\times10^{-4}\ A$$

المسألة الثّالثة: في تجربة السّكّتين الكهرطيسيّة يبلغ طول السّاق النّحاسيّة المُستندة عموديّاً عليهما $30\ cm$ وكتلتها $60g$ والمطلوب:

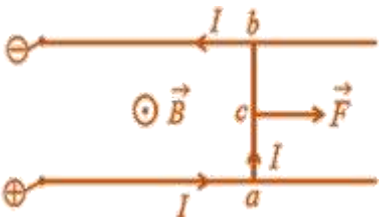
1) احسبْ شدّة الحقل المغناطيسي المُنتظم المُؤثّرة عموديّاً في السّكّتين لتكون شدّة القوّة الكهرطيسيّة مُساويةً مِثلي ثقل السّاق وذلك عندَ إمرار تيّار كهربائي شدّته $20A$.

2) احسبْ عمل القوّة الكهرطيسيّة المُؤثّرة في السّاق إذا تدحرجت بسرعةٍ ثابتةٍ قدرُها $0.4\ m.s^{-1}$ لمدة ثانيتين .

3) نرفعُ المولّد من الدّارة السّابقة، ونستبدله بمقياس غلفاني، وندحرجُ السّاق بسرعةٍ وسطيّةٍ ثابتةٍ $5m.s^{-1}$ ضمن الحقل السّابق استنتجْ عبارة القوّة المُحرّكة الكهربائيّة المُتحرّضة ثمّ احسبْ قيمتها ثم احسبْ شدّة التّيار المُتحرّض بافتراض أنّ المُقاومة الكلّيّة للدّارة ثابتةٌ وتساوي 5Ω ثم ارسم شكلاً توضيحياً يبين جهة كل من $(\vec{v},\vec{B})$ وجهة التّيار المُتحرّض.

4) احسب الاستطاعة الكهربائيّة النّاتجة، ثمّ احسب شدّة القوّة الكهرطيسيّة المُؤثّرة في السّاق في أثناء تدحرجها .

الحل: 1)



$$F = 2W = 2mg$$

$$F = 2 \times 60 \times 10^{-3} \times 10$$

$$F = 1.2\ N$$

$$F = ILB \sin\theta$$

$$1.2 = 20 \times 30 \times 10^{-2} \times B \times 1$$

$$B = \frac{1.2}{20 \times 30 \times 10^{-2} \times 1} = 0.2T$$

2) طريقة(1): $W = F\Delta x = F v t$

$$W = 1.2 \times 0.4 \times 2 = 0.96\ J$$

طريقة(2): $W = I\,\Delta\Phi$

$$W = IB\Delta S = IBL\Delta x = IBLv\Delta t$$

$$W = 20 \times 0.2 \times 30 \times 10^{-2} \times 0.4 \times 2$$

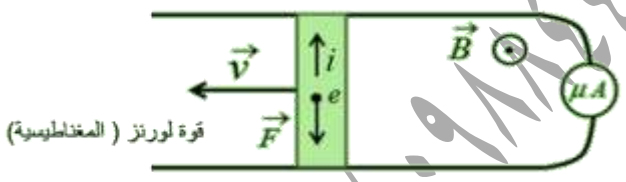
$$W = 0.96\ J$$

3) $$\varepsilon = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \left|\frac{B\,\Delta S}{\Delta t}\right| = \left|\frac{B\,L\,\Delta x}{\Delta t}\right| =$$

$$\varepsilon = \left|\frac{B\,L\,v\,\Delta t}{\Delta t}\right| = B\,L v =$$

$$\varepsilon = 0.2 \times 30 \times 10^{-2} \times 5 = 0.3\ V$$

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0.3}{5} = 0.06\ A$$



4) $$P = \varepsilon i$$

$$P = 0.3 \times 6 \times 10^{-2} = 18 \times 10^{-3}\ Watt$$

$$F = I\,L\,B\,\sin\theta$$

$$F = 0.06 \times 30 \times 10^{-2} \times 0.2 \times 1$$

$$F = 36 \times 10^{-4}\ N$$

المسألة الرابعة: سكّتان نحاسيّتان مُتوازيتان، تميل كلٌّ منهما على الأفق بزاوية 45^0، تستندُ إليهما ساقٌ نحاسيّة طولها $L = 40\ cm$ ، تخضعُ بكاملها لتأثير حقلٍ مغناطيسي مُنتظمٍ

شاقولي شدّته $0.8\ T$ نُغلقُ الدّارة، ثمّ نترُكِ لتنزلقَ دونَ احتكاكٍ بسرعةٍ ثابتةٍ، قيمتُها $2m.s^{-1}$ والمطلوب:

1) بيّنِ أنّه تنشأ قوّةٌ كهرطيسيّة تعيقُ حركةَ السّاق.

2) استنتجِ العلاقةَ المُحدّدةَ للمُقاومةِ الكليّة للدّارة ثمّ احسبْ قيمتَها إذا كانت شدّةُ التيّارِ المُتحرّضِ المُتولد فيها $\sqrt{2}A$.

3) استنتجِ العلاقةَ المُحدّدةَ لكتلةِ السّاقِ، ثمّ احسب قيمتَها.

الحل: 1) عند تحريك الساق بسرعة ثابتة، عمودي على خطوط الحقل المغناطيسي فإنّ كل إلكترون حرّ في الساق سيتحرك بهذه السرعة وسطياً، ومع خضوعه لتأثير الحقل المغناطيسي المنتظم فإنّه يخضع لتأثير القوة المغناطيسية $\vec{F} = e\vec{v} \wedge \vec{B}$ وبتأثير هذه القوّة تتحرك الإلكترونات الحرّة عبر الدارة فيتولّد تيار كهربائي متحرّض ينتج أفعالا تعاكس السبب الذي أدى إلى حدوثه فتنشأ قوة كهرطيسية معاكسة لجهة حركة الساق.

2) عند حركة الساق بسرعة ثابتة $\vec{v}$ خلال الفاصل الزمني Δt تنتقل مسافة $\Delta x = v\,\Delta t$ فتتغير مساحة السطح الذي تخترقه خطوط الحقل المغناطيسي بالمقدار:

$$\Delta S = L\Delta x = L\ v\Delta$$

فيتغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز الدارة بمقدار:

$$\Delta\Phi = \mathrm{B}\ \Delta S\ \cos\alpha = B\ L\ v\Delta t\cos\alpha$$

فتتولّد قوة محرّكة كهربائية متحرّضة قيمتها المطلقة:

$$\varepsilon = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = BLv\cos\alpha$$

فيتولّد تيار كهربائي متحرّض:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = BLv\cos\alpha$$

$$\Rightarrow R = \frac{BLv\cos\alpha}{i}$$

$$R = \frac{0.8 \times 40 \times 10^{-2} \times 2 \times \frac{1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{2}}$$

$$R = 32 \times 10^{-2}\ \Omega$$

3) جملة المقارنة: خارجية.

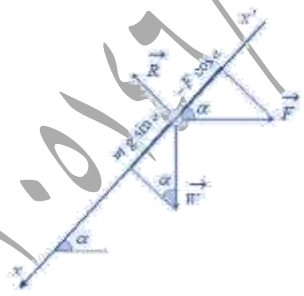
الجملة المدروسة: الساق المتوازنة.

القوى الخارجية المؤثرة: $\vec{W}$ ثقل الساق ـ $\vec{F}$ القوة الكهرطيسية ـ $\vec{R}$ رد فعل السكتين.

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

$$\vec{W} + \vec{F} + \vec{R} = \vec{0}$$

بالإسقاط على $\overrightarrow{xx'}$ يوازي السكتين:



$$mg\sin\alpha - F\cos\alpha + 0 = 0$$

$$mg\sin\alpha = F\cos\alpha$$

$$\Rightarrow m = \frac{F}{g\tan\alpha} = \frac{iLB\sin\frac{\pi}{2}}{g\tan\alpha}$$

$$m = \frac{\sqrt{2} \times 40 \times 10^{-2} \times 0.8 \times 1}{10 \times 1}$$

$$m = 32\sqrt{2} \times 10^{-3}\ Kg$$

المسألة الخامسة: إطارٌ مربعُ الشكلِ طولُ ضلعِه $4cm$، مؤلفٌ من 100 لفةٍ مُتماثلة من سلكٍ نحاسيٍّ معزول، نديرُ الإطارَ حولَ محورٍ شاقوليٍّ مارٍّ من مركزِه ومن ضلعَين أفقيَّين مُتقابلين بحركةٍ دائريّةٍ مُنتظمةٍ تقابل $\frac{10}{\pi}\,Hz$ ضمنَ حقلٍ مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ أفقيٍّ شدتُه $5\times10^{-2}T$ خطوطُه ناظميّة على سطحِ الإطارِ قبلَ الدّوران حيثُ الدّارة مُغلقة ومُقاومتُها $R=4\Omega$ والمطلوب:

1) اكتبِ التّابعَ الزمنيَّ للقوّةِ المُحرّكةِ الكهربائيّةِ المُتحرّضةِ الآنيّةِ النّاشئةِ في الإطار.

2) عيّنِ اللّحظتَين الأولى والثّانية التي تكونُ فيها قيمةُ القوّةِ المُحرّكةِ الكهربائيّةِ المُتحرّضةِ الآنيةِ الناشئةِ معدومةً.

3) اكتبِ التّابعَ الزمنيَّ للتيارِ الكهربائيِّ المُتحرّضِ اللّحظيِّ المارِّ في الإطار. (نهملُ تأثيرَ الحقلِ المغناطيسيِّ الأرضيِّ)

الحل: 1)

$$\bar{\varepsilon}=\varepsilon_{max}\sin\omega t$$

$$\omega=2\pi f=2\pi\times\frac{10}{\pi}=20\,rad.s^{-1}$$

$$\varepsilon_{max}=N\,B\,S\,\omega$$

$$\varepsilon_{max}=100\times5\times10^{-2}\times16\times10^{-4}\times20$$

$$\varepsilon_{max}=16\times10^{-2}\,V$$

$$\bar{\varepsilon}=16\times10^{-2}\sin20t$$

2)

$$\bar{\varepsilon}=16\times10^{-2}\sin20t=0$$

$$\sin20t=0$$

$$20t=\pi k\Rightarrow t=\frac{\pi k}{20}$$

لحظة الانعدام الأولى: $k=0\Rightarrow t=0\,s$

لحظة الانعدام الثانية: $k=1\Rightarrow t=\frac{\pi}{20}\,s$

3)

$$i=\frac{\bar{\varepsilon}}{R}=\frac{16\times10^{-2}\times\sin20t}{4}$$

$$i=4\times10^{-2}\sin20t$$

التفكير الناقد: تعطى القوة المحرّكة الكهربائيّة المتحرّضة الذّاتية بالعلاقة $\varepsilon=-L\frac{di}{dt}$ ناقش العلاقة عندما:

1) عندما تزداد شدّة التّيار المحرّض المارّ في الوشيعة.

2) عندما تتناقص شدّة التّيار المحرّض المار في الوشيعة.

الجواب: 1) عندما تزداد شدة التيار المحرض المار في الوشيعة تزداد الحقل المغناطيسي المحرض المولد من قبل الوشيعة ذاتها فيزداد التدفق المغناطيسي المحرّض وتصبح القوة المحركة الكهربائية المتحرضة أصغر من الصفر ويكون $\vec{B}$ محرض و$\vec{B}'$ متحرض على حامل واحد وبجهتين متعاكستين.

2) عندما تتناقص شدة التيار المحرض المار في الوشيعة تتناقص الحقل المغناطيسي المحرض المولد من قبل الوشيعة ذاتها فيتناقص التدفق المغناطيسي المحرّض وتصبح القوة المحركة الكهربائية المتحرضة أكبر من الصفر ويكون $\vec{B}$ محرض و$\vec{B}'$ متحرض على حامل واحد وبجهة واحدة.

انتهى البحث

ندعوكم للانضمام إلى قناتنا على التيلغرام:
قناة فراس قلعه جي للفيزياء والكيمياء