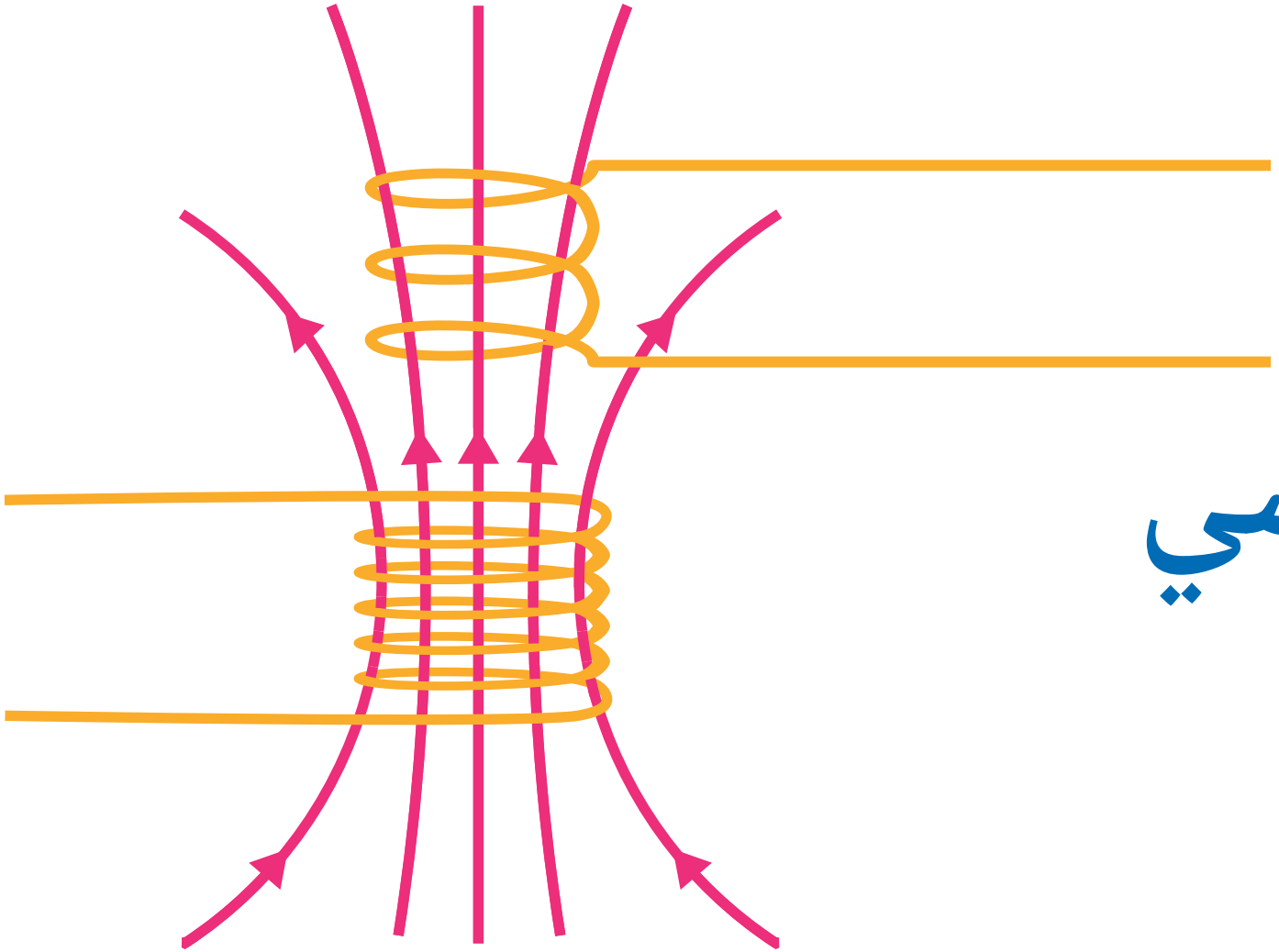


الحث الكهرومغناطيسي

أهداف الدرس

ستتمكَّن من:

- فهم أن الملف الموصِّل الذي يمر به تيار متغير يولد تيارًا مستحثًّا في ملف آخر نتيجة لتغير المجال المغناطيسي الذي يولِّده الملف الأول
- ربط القوة الدافعة الكهربية المستحثَّة بمعدل تغيُّر الفيض المغناطيسي ومعامل الحث المتبادَل لملفين عدد لفاتهما متساوٍ، باستخدام المعادلتين $\varepsilon = \frac{-N\Delta\Phi_m}{\Delta t}$، $N\Delta\Phi_m = m\Delta I$
- فهم أن المجال المغناطيسي الناتج عن ملف يمر به تيار يؤدي إلى تغير في التيار الموجود في الملف
- ربط معدل تغير التيار المستحثِّ في ملف بمعامل حثه الذاتي والقوة الدافعة الكهربية المتولدة خلاله والفيض المغناطيسي الناتج عن التيار، باستخدام المعادلتين $\varepsilon = \frac{-L\Delta I}{\Delta t}$، $L = \frac{N\Delta\Phi_m}{\Delta I}$

تذكَّر

تولِّد الأسلاك التي يمرُّ بها تيار كهربي مجالات مغناطيسية حولها. وإذا تغيَّرت شدَّة التيار المار في السلك مع الزمن، فإن المجال المغناطيسي الذي يولِّده السلك يتغيَّر أيضًا.

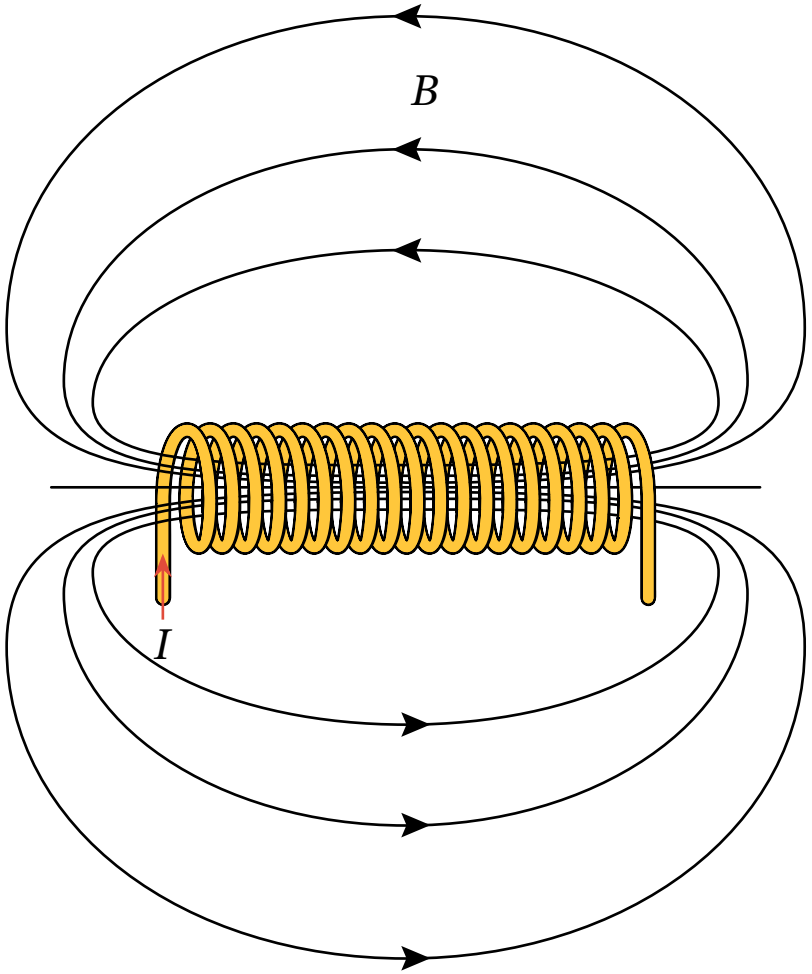
عندما يتعرض ملف موصل لمجال مغناطيسي متغير، يُستحَثُّ فرق جهد في الملف. تُعرَف هذه العملية باسم الحث الكهرومغناطيسي، أو ببساطة الحث.

ما هو الحث الذاتي؟

تعريف: الحث الذاتي

الحث الذاتي لموصل هو قدرة الموصل على مقاومة تغير التيار المار فيه بسبب ما ينتج عن هذا التغير من تغيير المجال المغناطيسي الصادر عن التيار.

حكاية القوة الدافعة المستحثة في ملف



افترض أن لدينا ملفًا لولبيًا يمرُّ به تيار، كما هو موضَّح في الشكل المقابل. عندما تكون شدَّة التيار ثابتة، يتولَّد مجال مغناطيسي ثابت داخل حلقات الملف اللولبي.

افترض أننا زدنا فرقًا. سيؤدي ذلك إلى حدوث السلسلة الآتية من التغيرات:

أولًا: تؤدي الزيادة في فرق الجهد إلى زيادة شدَّة التيار التي تؤدِّي إلى زيادة المجال المغناطيسي حول الملف اللولبي.

زيادة فرق الجهد ← زيادة شدة التيار ← زيادة المجال المغناطيسي

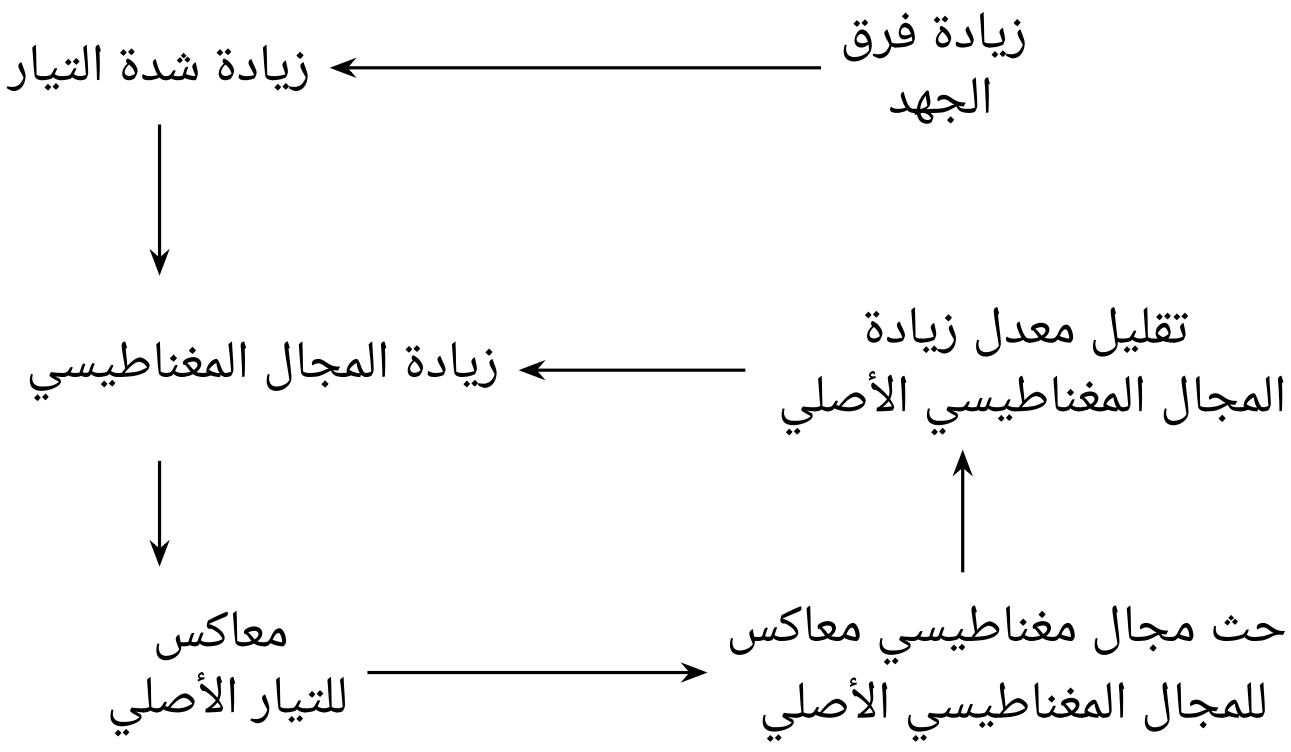
حكاية القوة الدافعة المستحثة في ملف (متابعة)

تؤدِّي الزيادة في المجال المغناطيسي لحث تيار في الاتجاه المعاكس في الملف اللولبي.

يولد ذلك مجالًا مغناطيسيًّا معاكِسًا، وهو ما يقلل **معدل تزايد** المجال المغناطيسي الأصلي.

يظل المجال المغناطيسي في ازدياد؛ مما يستمر في حث تيار معاكس، ولكن قيمته أقل بسبب تناقص معدل زيادة المجال، وهكذا حتى يستقر على قيمة ثابتة جديدة.

تزداد شدة التيار والمجال في الملف بمعدل يتناقص باستمرار، حتى يتوقَّف في النهاية عن الزيادة.



حكاية القوة الدافعة المستحثة في ملف (متابعة)

ثمَّة أمرٌ مُهِمٌّ علينا إدراكه فيما يتعلَّق بهذه السلسلة من التغيُّرات، وهو أنها تقلِّل من **معدل زيادة** شدَّة التيار وشدَّة المجال المغناطيسي إلى أن يَصِلا إلى الصفر، لكنها لا تجعل قيمتَيْهما سالبتين.

وهذا يعني أن زيادة فرق الجهد عبر الملف اللولبي:

- لا تؤدِّي إلى زيادة شدَّة التيار في الملف اللولبي دون حدٍّ.
- لا تؤدِّي إلى انخفاض شدَّة التيار في الملف اللولبي إلى أقلَّ من قيمته الابتدائية.
- لا تؤدِّي إلى اهتزاز التيار في الملف اللولبي.

وهذا التغيُّر في شدَّة التيار يحدث خلال فترة زمنية معيَّنة. وينطبق هذا أيضًا على شدَّة المجال المغناطيسي حول الملف اللولبي.

تُعرَف هذه الظاهرة باسم **الحث الذاتي**، وهو التغيُّر في شدَّة التيار المار في الموصِّل نتيجة تعرضه لمجال مغناطيسي متغير مع الزمن، والناتج عن تغير التيار المار في الموصل ابتداءً.

تعريف: الحث الذاتي

معادلة: الحث الذاتي

إذا كان ε فرق الجهد المُستحَث عبر الموصِّل، و $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ معدَّل تغيُّر شدَّة التيار المار في الموصِّل مع الزمن، وL معامل الحث الذاتي للموصل، فإن:

$$\varepsilon = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right).$$

ورياضيًّا، يُعبَّر عن حث الموصِّل بأنه ثابت التناسب بين فرق الجهد المُستحَث عبر الموصِّل (الذي ينتج عنه التيار المستحث المعاكس في الملف اللولبي كما ذكر سابقا) والمعدَّل الذي تتغيَّر به شدَّة التيار المار في الموصِّل مع الزمن.

تُشير إشارة السالب في المعادلة إلى قطبية (اتجاه) فرق الجهد المُستحَث. ويولِّد هذا الجهد تيارًا يُعاكس التغيُّر في شدَّة التيار مع الزمن، $\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

مثال ١: استخدام معامل الحث الذاتي لتحديد الزمن الذي يستغرقه التيار ليتغيَّر بمقدار محدَّد

يتغير التيار المار بملفٍّ مُوَلِّدًا فَرْقَ جهد مستحثٍّ بين طرفيه يساوي $1.2\,\text{V}$. معامل الحث الذاتي للملف $125\,\text{mH}$. ما الزمن اللازم ليزيد الملف من شدَّة التيار المار عبره بمقدار $0.25\,\text{A}$؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

تربط العلاقة الآتية فرق الجهد بين طرفَي الملف ومعامل الحث الذاتي له والتغيُّر في شدَّة التيار مع الزمن:

$$\varepsilon = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

نُوجِد أولًا التغيُّر في الزمن Δt.

$$\Delta t = \frac{(-L \times \Delta I)}{\varepsilon}$$

مثال ١ (متابعة)

بما أن قيمة Δt لا يمكن أن تكون سالبة، يُمكننا أن نفترض أن فرق الجهد تجاهه معاكس للتيار الأصلي (قطبيته سالبة)، وهو ما يعني أنه يساوي $-1.2\,\text{V}$. إذن:

$$\Delta t = \frac{\left(-\left(125 \times 10^{-3}\,\text{H}\right) \times \left(0.25\,\text{A}\right)\right)}{\left(-1.2\,\text{V}\right)} = \frac{\left(\left(0.125\,\text{H}\right) \times \left(0.25\,\text{A}\right)\right)}{\left(1.2\,\text{V}\right)} = 0.0260416\dot{6}\,\text{s}.$$

بتقريب هذا الناتج لأقرب منزلتين عشريتين، نجد أن الزمن اللازم لزيادة شدَّة التيار في الملف بمقدار $0.25\,\text{A}$ يساوي $0.03\,\text{s}$.

تذكير: قانون فاراداي

يُمكننا دمج معادلة الحث وقانون فاراداي، الذي ينصُّ على أن الجهد المُستحَث عبر الموصِّل يتناسب طرديًّا مع التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرَّض له الموصِّل على الزمن. وتحديدًا:

$$\varepsilon = -N \times \left(\frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \right),$$

حيث N عدد لفات الموصِّل، و $\Delta \Phi_m$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي عبر الموصل خلال الفترة الزمنية Δt.

الحث بدلالة الفيض المغناطيسي

بمساواة قانون فاراداي بمعادلة الحث الذاتي السابقة، نحصل على:

$$\varepsilon = -N \times \left(\frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t}\right) = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

$$N \times \Delta \Phi_m = L \times \Delta I$$

$$L = N \times \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta I}.$$

من ذلك يُمكننا استنتاج أن معامل الحث يساوي عدد لفات الموصِّل مضروبًا في التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرَّض له الموصِّل، مقسومًا على التغيُّر في شدَّة التيار المار في الموصِّل.

مثال ٢: حساب معامل الحث الذاتي بمعلومية التغيُّر في التيار والفيض المغناطيسي

تزداد شدَّة التيار المار في لفة سلك بمقدار 180 mA. ينشأ عن هذا التغير تغير في الفيض المغناطيسي بمقدار 0.77 Wb. ما معامل الحث الذاتي للملف؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلة عشرية.

الحل

يُحسَب معامل الحث الذاتي L للملف من المعادلة:

$$L = N \times \frac{\Delta\Phi_m}{\Delta I},$$

حيث N عدد لفات الملف، و $\Delta\Phi_m$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي، و ΔI التغيُّر في شدَّة التيار المار في الملف.

في هذا السؤال، يتكوَّن الملف من لفة واحدة؛ وعليه فإن N يساوي واحدًا.

الفيض المغناطيسي وشدَّة التيار مُعطيان بوحدتَيْ وبر (Wb) وملي أمبير (mA)، على الترتيب.

الوبر هو وحدة الفيض المغناطيسي في النظام الدولي للوحدات. ولنستخدم وحدة شدة تيار تتناسب مع الوبر، علينا أن نحوِّل وحدة شدَّة التيار إلى أمبير.

مثال ٢ (متابعة)

1 000 ملي أمبير يساوي أمبير واحدًا؛ ومن ثَمَّ إذا كان Y هو عدد الملي أمبير، فإن:

$$Y\,\text{mA} = Y \times 10^{-3}\,\text{A}.$$

إذن 180 ملي أمبير تساوي 0.180 أمبير.

بالتعويض بهذه القيمة عن التغيُّر في شدَّة التيار وبالقيمة المُعطاة للتغيُّر في الفيض المغناطيسي في معادلة حساب L، نحصل على:

$$\begin{aligned} L &= (1) \times \frac{(0.77\,\text{Wb})}{(0.180\,\text{A})} \\ &= 4.2\dot{7}\,\text{H}. \end{aligned}$$

بتقريب الناتج لأقرب منزلة عشرية، فإن معامل الحث الذاتي للملف يساوي 4.3 هنري.

معامل الحث المتبادل

إذا كان الموصل ينتج مجالًا مغناطيسيًّا متغيرًا، فإن هذا قد يولد فيه تيارًا مستحثًّا، لكنه يمكن أيضًا أن يستحث تيارًا في موصل آخر منفصل. وعندما يتفاعل موصِّلان بهذه الطريقة، فإنهما يُبديان ما يُسمَّى الحث المتبادل.

افترض أن لدينا موصِّلين؛ الموصل الأول والموصل الثاني. يمرُّ بالموصِّل الأول تيار شدَّته I_1، ويولِّد فيضًا مغناطيسيًّا متغيِّرًا عبر الموصِّل الثاني، فيستحث الجهد ε_2.

كما في معادلة الحث السابقة، ترتبط هاتان الكميتان من خلال المعادلة الآتية:

$$\varepsilon_2 = -M_{12} \times \left(\frac{\Delta I_1}{\Delta t}\right).$$

يعتمد الجهد المُستحَث في الموصِّل الثاني، والناشئ عن التيار المار في الموصِّل الأول، على معامل الحث المتبادل من الموصِّل واحد إلى الموصِّل اثنين (M_{12}).

بوجه عام، الحث المتبادل من الموصِّل الأول إلى الموصِّل اثنين يساوي الحث المتبادل من الموصِّل اثنين إلى الموصِّل واحد. أي إن:

$$M_{12} = M_{21}.$$

معامل الحث المتبادل (متابعة)

ولذلك، من المعتاد أن تُكتب المعادلة التي تربط الجهد، ومعامل الحث المتبادل، وشدَّة التيار، كما يأتي:

$$\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right).$$

ففي هذه الصورة غير المحدَّدة، ما زلنا نعتبر أن التيار يتغيَّر في أحد الموصِّلين ليستحث جهدًا في الموصِّل الآخَر عن طريق الحث المتبادل بينهما.

مثال ٣: تحديد فرق الجهد بمعلومية معامل الحث المتبادل

محوِّل ذو قلب حديدي به ملف ابتدائي يتكوَّن من 75 لفة، وملف ثانوي يتكوَّن من 75 لفة أيضًا. معامل الحث المتبادل بين الملفين 15 H. التيار في الملف الابتدائي يتسبب في زيادة من التيار في الملف الثانوي بمعدَّل 1.25 A/s. ما فرق الجهد بين طرفي الملف الثانوي ؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلة عشرية.

الحل

تتغيَّر شدَّة التيار المار في الملف الثانوي للمحوِّل بسبب تغيُّر شدَّة التيار المار في الملف الابتدائي. نعلم أن:

$$\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right),$$

حيث ε الجهد المُستحَث بسبب تغيُّر شدَّة التيار مع الزمن $\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

يُمكننا إيجاد قيمة هذا الجهد بمعلومية معدَّل تغيُّر شدَّة التيار (1.25 A/s) ومعامل الحث المتبادل بين الملفين (15 H). بالتعويض بهاتين القيمتين:

$$\varepsilon = -(15\,\text{H}) \times (1.25\,\text{A/s}).$$

مثال ٣ (متابعة)

الإشارة السالبة في المعادلة السابقة تعكس حقيقة أن التيار المستحث يولد مجالًا مغناطيسيًّا يعاكس المجال المغناطيسي الأصلي. وبالنسبة للجهد فإن الإشارة السالبة تعبر عن تغير القطبية (الاتجاه) وليس المقدار، فيُمكننا إهمال الإشارة السالبة عند إيجاد الجهد:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= (15\,\mathrm{H}) \times (1.25\,\mathrm{A/s}) \\ &= 18.75\,\mathrm{V}.\end{aligned}$$

بتقريب هذا الناتج لأقرب منزلة عشرية، نجد أن فرق الجهد بين الملفين يساوي 18.8 فولت.

مثال ٤: حساب عدد اللفات في ملف محوِّل

يتكوَّن محوِّل من ملف ابتدائي وملف ثانوي، كلٌّ منهما له نفس عدد اللفات، وملفوفان حول قلب حديدي. معامل الحث المتبادل للملفين يساوي $32\,\text{mH}$. تسبب تيار الملف الابتدائي في زيادة الفيض المغناطيسي في القلب بمقدار $4.48\,\text{mWb}$. والتيار المُستحَث في الملف الثانوي فيساوي $1.4\,\text{A}$. كم لفة في الملف؟

الحل

يربط قانون فاراداي بين الجهد المُستحَث عبر موصِّل والتغيُّر في الفيض المغناطيسي مع الزمن من خلال المعادلة:

$$\varepsilon = -N \times \left(\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}\right),$$

حيث ε فرق الجهد المُستحَث، وN عدد اللفات في الموصِّل، و$\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرَّض له الموصِّل مع الزمن.

ثمَّة معادلة أخرى للجهد المُستحَث تتضمَّن معامل الحث المتبادل بين موصِّلين مثل ملفَّي المحوِّل:

$$\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right).$$

مثال ٤ (متابعة)

يُمكن دمج هاتين المعادلتين للحصول على معادلة ثالثة:

$$-N \times \left(\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}\right) = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right).$$

لاحِظ أن الإشارتين السالبتين والكسرين $\frac{1}{\Delta t}$ يَظهَران في كلا الطرفين؛ ومن ثَمَّ يُمكن حذفهما:

$$N \times (\Delta\Phi_m) = M \times (\Delta I)$$

لنقسم الطرفين على $\Delta\Phi$.

$$N = M \times \frac{(\Delta I)}{(\Delta\Phi_m)}$$

يُمكننا الآن إيجاد عدد اللفات في ملف المحوِّل الثانوي بالتعويض بالقِيَم المُعطاة لمعامل الحث المتبادل ($32\,\text{mH}$)، والتغيُّر في شدَّة التيار ($1.4\,\text{A}$)، والتغيُّر في الفيض المغناطيسي ($4.48\,\text{mWb}$).

مثال ٤ (متابعة)

لكن علينا أولًا تحويل معامل الحث المتبادل إلى وحدة الهنري، وتحويل التغيُّر في الفيض المغناطيسي إلى وحدة الوبر.

للتحويل الأول لدينا:

$$1\,000\,\text{mH} = 1\,\text{H}$$
$$1\,000\,\text{mWb} = 1\,\text{Wb}.$$

وللتحويل الثاني لدينا:

$$32\,\text{mH} = 32 \times 10^{-3}\,\text{H} = 0.032\,\text{H}$$
$$4.48\,\text{mWb} = 4.48 \times 10^{-3}\,\text{Wb} = 0.00448\,\text{Wb}.$$

من ثَمَّ:

$$N = (0.032\,\text{H}) \times \frac{(1.4\,\text{A})}{(0.00448\,\text{Wb})} = 10.$$

إذن الملف الثاني في المحوِّل له 10 لفات.

النقاط الرئيسية

- يحدِّد معامل الحث الذاتي لملف المعدَّل الذي يُمكن أن تتغيَّر به شدَّة التيار المار في هذا الملف.
- $\varepsilon = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$؛ حيث ε فرق الجهد عبر الموصِّل، و$\frac{\Delta I}{\Delta t}$ معدل التيار مع الزمن، وL معامل الحث الذاتي للموصل.
- قد يَستحث التيار المتغيِّر الشدَّة في موصِّلٍ تيارًا في موصِّل آخَر، وهذه الظاهرة تُعرَف بالحث المتبادل.
- $\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$؛ حيث ε فرق الجهد طرفَيْ أحد الموصِّلين، وM معامل الحث المتبادل بين الموصِّلين، و$\frac{\Delta I}{\Delta t}$.
- يُمكن دمج معادلتَيْ معامل الحث وقانون فاراداي للحصول على معادلتين جديدتين: $L = N \times \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta I}$، $M = N \times \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta I}$. وهنا L، M هما معامل الحث الذاتي ومعامل الحث المتبادل، على الترتيب، وN عدد لفات الموصِّل، و$\frac{\Delta \Phi_m}{\Delta I}$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي مقسومًا على التغيُّر في شدَّة التيار.