كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثانية**

المادة : كهرباء ومغناطيسية٢

المحاضرة : الاولى/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

٧

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

المحاضرة الأولى

الحث الكهرومغناطيسي
Electromagnetic Induction

مقدمة:

الحظ العالم أمبير وعلماء آخرون، مثل أراغو "F. Arago" وبيوت "J. B. Biot" خلال العشر سنوات التي تلت عام 1820م، اكتشافات عديدة ومهمة حول المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار كهربائي في الموصلات. وأعقب ذلك دراسة القوى بين موصلين يحملان تيارين كهربائيين وكذلك بين المغناطيسات (Magnets) والموصلات التي تمر بها تيارات كهربائية. وفي خلال العام 1830م و 1831م اكتشف العالم فاراداي (M. Faraday) من بريطانيا وهنري (J. Henry) من الولايات المتحدة ولنز (H. Lenz) من روسيا إمكانية الحصول على تيار كهربائي باستعمال المجالات المغناطيسية وكان للعالم فاراداي الأسبقية في اكتشاف الحقائق من هذه الظاهرة.

- **قانون فاراداي:**

Faraday's Law

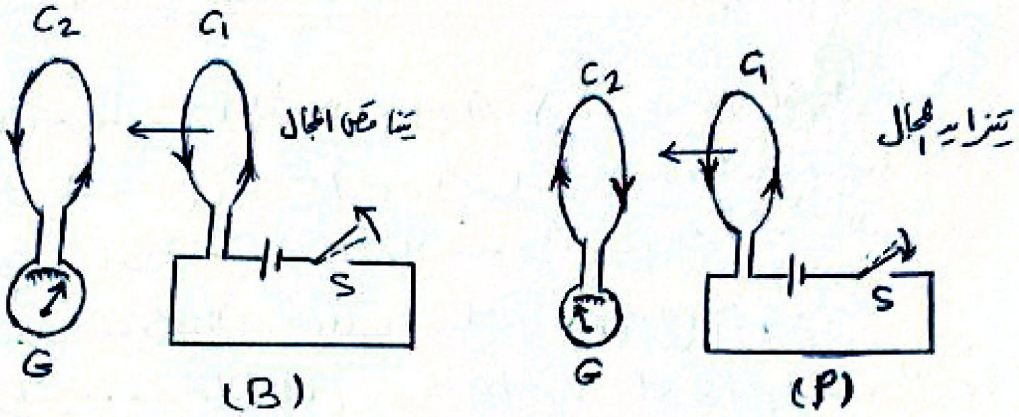
تابع فاراداي تجاربه حيث استبدل المغناطيس بدائرة كهربائية متكونة من ملف ابتدائي C_1 وبطارية B ومقاومة متغيرة ومفتاح S بينما أبقى على الدائرة الأخرى المكونة من ملف ثانوي C_2 يتصل طرفاه بجلفانومتر G. كما في الشكل (1)

فإذا مر تيار في الملف الابتدائي C_1 فإنه لا يصحب مرور تيار في الملف الثانوي C_2 كما هو الوجه حركة نسبية (Relative motion) ويكون عند لحظة غلق الدائرة وفتحها يحدث تيار قصير في الملف C_2 وفي هذه الحالة تتكون الحركة النسبية من نمو أو اضمحلال (growth or decay) المجال المغناطيسي الناتج عن التيار المار في الملف C_1.

- ويمكن تلخيص اتجاه التيار التأثيري في الملف الثانوي كما يلي:

يكون اتجاه التيار التأثيري عكس اتجاه التيار الابتدائي في حالة الاقتراب أو ازدياد التيار الابتدائي أو غلق الدائرة الابتدائية. بينما يكون اتجاه التيار التأثيري في اتجاه التيار الابتدائي في حالة الابتعاد أو نقصان شدة التيار الابتدائي أو فتح الدائرة الابتدائية.

- لقد استنتج فاراداي من مجموع تجاربه أن التغير في العدد المغناطيسي Φ الذي يخترق الملف C_2 هو العامل المؤثر في انتاج القوة الدافعة الكهربائية الحثية ((التأثيرية)) بغض النظر عن كيفية هذا التغير يحدث بواسطة مغناطيس أو بواسطة ملف آخر متحرك أو ثابت



الشكل (1): ملفان أحدهما يصل ببطارية والآخر بجلفانومتر:
P- غلق دائرة الملف الابتدائي B- فتح الملف الابتدائي

- قانون فاراداي ينص على:

" تناسب القوة الدافعة الكهربائية التأثيرية ε المتولدة في دارة مغلقة مع معدل التغير في التدفق المغناطيسي $d\Phi/dt$ خلال هذه الدارة "

ولإثبات ذلك فعند تحريك السلك (ab) مسافة قدرها dx إلى اليمين فإن مساحة المستطيل $abdc$ الدارة المغلقة سوف تنقص بمقدار: الشكل (2)

$dS = \ell . dx$ ؛ ℓ: طول طول (السلك ab)

وعند ذلك تتغير التدفق المغناطيسي خلال الدارة بالمقدار:

$$d\Phi = B.dS = B\ell.dx$$

B: الحث المغناطيسي واحدته (ويبر/متر^2 Wb/m^2).

بقسمة طرفي المعادلة على dt نجد أن:

$$\frac{d\Phi}{dt} = B\ell.\frac{dx}{dt} = B\ell v$$

v: السرعة (m/s).

بالمقارنة مع المعادلة $\varepsilon = \frac{dw}{dq} = B\ell v$

حيث أن القوة الدافعة الكهربائية لمصدر تعرف بأنها النسبة بين الشغل المبذول (العمل) لتحريك الشحنة وبين كمية هذه الشحنة. [(E.M.F) تقاس بواحدة (جول/كولوم أو الفولت V)]

يتم الحصول على قيمة القوة الدافعة الحثية ε:

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

• أما اتجاه التيار الحثي والقوة الدافعة الكهربائية الحثية فيحددهما قانون لينز (Lenz's law) الذي ينص على:

((يكون للتيار الحثي اتجاه بحيث يعطي فيضاً مغناطيسياً له اتجاه يعاكس التغير في الفيض المغناطيسي الأصلي المسبب له))

أي أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية ε عكسية بحيث تكون موجبة عندما تكون $d\Phi/dt$ سالبة وتكون سالبة عندما تكون $d\Phi/dt$ موجبة.

فتصبح العلاقة كما التالي:

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

حيث يعطى التدفق المغناطيسي بالمعادلة:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

$$\Rightarrow \varepsilon = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

واذا كانت ε ناتجة عن حركة ملف عدد لفاته N في مجال مغناطيسي فإن:

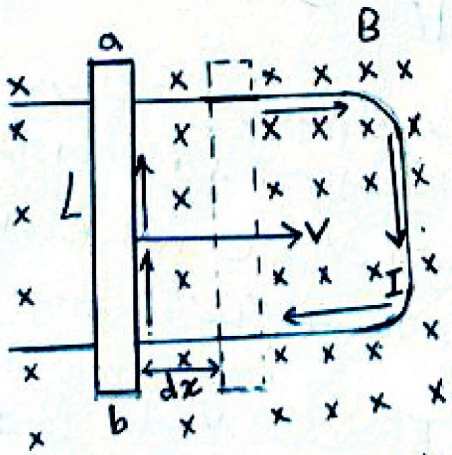
$$\varepsilon = -\frac{d(N\Phi)}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

واذا كانت R هي مقاومة الملف فإن قيمة التيار التأثيري المارفيه يعطى بالمعادلة:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{N}{R}\cdot\frac{d\Phi}{dt}$$

أما الشحنة التأثيرية فتعطى من المعادلة التالية

$$dq = Idt = -\frac{N}{R}\,d\Phi$$



الشكل (2): ينزلق قضيب موصل طوله L على قضيبين آخرين يأخذ شكل الحرف U في مجال مغناطيسي.

مسألة (1): ملف حلزوني طويل عدد لفاته 200 لفة في السنتيمتر. يحمل تياراً شدته 1,5 A وقطر الملف 2 cm وضع عند مركز ملف مكون من عشر لفات بحيث يكون المجال المغناطيسي موازياً لمحور الملف الأصلي، فإذا نقص التيار في الملف الحلزوني 1,5 A بمعدل مرة كل 0,05 s إلى الصفر ثم زيد في الاتجاه المضاد ليصل إلى 1,5 A في الثانية. فما مقدار القوة الدافعة الكهربائية التأثيرية في الملف الصغير أثناء تغيير التيار؟

الحل: نحسب أولاً قيمة الحث المغناطيسي داخل الملف الحلزوني B.

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = 4\pi \times 10^{-7} \times 200 \times 10^2 \times 1,5 = 3,8 \times 10^{-2} \text{ wb/m}^2$$

ثم نحسب مساحة مقطع الملف الصغير وهي تساوي مساحة مقطع الملف الكبير S.

$$S = \pi r^2 = \pi (1 \times 10^{-2})^2 = 3,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Phi = BS = 3,8 \times 10^{-2} \times 3,1 \times 10^{-4} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ wb}$$

هذا الفيض يتغير إلى $(-1,2 \times 10^{-5})$ wb خلال $\frac{5}{100}$ من الثانية.

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{(-1,2 \times 10^{-5}) - (1,2 \times 10^{-5})}{0,05} = -4,8 \times 10^{-4} \text{ V}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -10 \times (-4,8 \times 10^{-4}) = 4,8 \times 10^{-3} \text{ V}$$

ولاحظ أن ε موجبة لأن $d\Phi/dt$ سالبة.

مسألة (2): ملف عدد لفاته 1000 لفة ومقاومته 400 Ω ملفوف على عصا خشبية نصف قطرها 1 cm فإذا وضع الملف في مجال مغناطيسي متجه 9000 أمبير. لفة/متر وكان موازياً لمحور العصا ثم انخفض المجال فجأة إلى الصفر فاحسب مقدار الشحنة المارة خلال حلقة نحاسية قدرها مقاومتها 200 أوم متصلة مع الملف، وما قيمة الشحنة لو انخفض المجال إلى الصفر.

الحل: حسب المعادلتين: $I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{N}{R}\frac{d\Phi}{dt}$ ، $dq = I\,dt = -\frac{N}{R} d\Phi$

$$IR = N\frac{\phi}{t} = N\frac{BS}{t} = N\frac{\mu_0 HS}{t}$$ نستنتج مايلي:

$$\therefore q = It = \frac{N}{R}\mu_0 HS$$

حيث S مساحة الملف، N عدد لفاته و R المقاومة الكلية للدارة.

$$q = \frac{1000}{(200+400)} \times 4\pi \times 10^{-7} \times 9000 \times \pi(0,01)^2 = 5,92 \times 10^{-6} C$$

$$dq = -\frac{N}{R} d\phi \Rightarrow q = -\frac{N}{R}\int d\phi$$

$$= -\frac{N}{R}\int_{H_1}^{H_2} \mu_0 S\, dH = \frac{N}{R}\mu_0 S(H_1 - H_2)$$

$$\Rightarrow q = \frac{1000}{600} \times 4\pi \times 10^{-7}(0,01)^2 \pi(9000 - 4500)$$

$$= 2,96 \times 10^{-6} C$$

٥. الحث الذاتي: Self Inductance

يمر تيار شدته I في ملف عدد لفاته N لفة. فإذا كان التيار ثابتاً ثم تغيرت شدته بواسطة مقاومة متغيرة. فإن هذا التغير في التيار يؤدي إلى تغير الفيض المغناطيسي ϕ داخل هذا الملف نفسه وبذا تتولد في الملف ذاته قوة دافعة تأثيرية عكسية ذاتية ع تقاوم التغير المسبب لها طبقاً لقاعدة لنز. فإذا زاد التيار الأصلي I فإن ع الذاتية تتولد في اتجاه مضاد له. واذا نقص التيار الأصلي فإن ع الذاتية تتولد في اتجاه نفسه ويتوقف عدد خطوط الحث المتصلة بالدارة والناتجة عن التيار المار بهذه الدارة على الخواص الهندسية للدارة، أي على شكلها وحجمها وعدد لفاتها ... الخ. ولكن بصرف النظر عن هندسة الدارة فإن كثافة التدفق عند أي نقطة تتناسب طردياً مع التيار الذي ينتجه ولذا فإن التدفق أيضاً يتناسب مع التيار.

$$\phi \propto I$$

$$\phi = KI$$

حيث K ثابت يتوقف على العوامل الهندسية للدارة إذا كانت N عدد لفات الملف فإن
القوة الدافعة التأثيرية تعطى بالعلاقة التالية المعروفة بقانون فاراداي:

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dI}\cdot\frac{dI}{dt} = -NK\cdot\frac{dI}{dt}$$

فإذا رمز لحاصل الضرب NK برمز واحد وليكن L فإن:

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi}{dt} = -NK\cdot\frac{dI}{dt} \Rightarrow \boxed{\mathcal{E} = -L\frac{dI}{dt}}$$

ويسمى الثابت L معامل الحث الذاتي (coefficient of self inductance) أو باختصار
الحث الذاتي (self inductance)

ويعرف الحث الذاتي أنه "القوة الدافعة التأثيرية الذاتية المتولدة في ملف عندما تتغير شدة
التيار في الملف نفسه بمعدل وحدة شدة التيار في الثانية".

وحدة قياس الحث الذاتي $L = V/(A/s)$ أو ما سمي بالهنري (Henry)
وهو الوحدة الخاصة بمعامل الحث الذاتي لدارة تتولد فيها قوة دافعة تأثيرية ذاتية قدرها
(1 Volt) عندما تتغير شدة التيار في الدارة بمعدل (1 A/s).

من المعادلتين يمكن أن يوجد تعبير آخر لمعامل الحث الذاتي حيث يلاحظ أن:

$$N\frac{d\Phi}{dt} = L\frac{dI}{dt}$$

وبتكامل الطرفين.

$$N\int d\Phi = L\int dI \Rightarrow N\Phi = LI + \text{Constant}$$

وبما أن Φ تساوي صفراً عندما يتلاشى التيار، فإن ثابت التكامل يساوي صفراً

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

ويمكن فهم معنى الحث الذاتي إذا فهم أن كل لفة من لفات الملف تعمل بمثابة ملف ثانوي
بالنسبة للفة التي تجاورها فينتج في هذه اللفة تيار مضاد عند غلق الدارة. فزيادة شدة التيار
يعمل على تأخير الوقت الذي يلزم فيه التيار حتى يبلغ قيمته الثابتة.

أو العظمى. وبالمثل إذا انقصت شدة التيار أو انقطع التيار فإن كل لفة في الملف تتولد فيها قوة دافعة كهربائية عكسية تعمل على تأخير اضمحلال التيار ووصوله إلى قيمته الثابتة (الصغرى أو الصفر)

- معامل الحث الذاتي لملف حلزوني طويل:

self inductance of a Long Solenoid

إذا مر تيار كهربائي شدته I في ملف حلزوني لفاته متقاربة وعددها n وطوله ℓ ومساحة مقطعه S تكون كمية الحث المغناطيسي B في داخل الملف الحلزوني، حسب المعادلة:

$$B = \mu_0 \frac{nI}{\ell} \quad (Wb/m^2)$$

وإذا لف الملف على مادة فتأثير المغناطيسية μ تصبح المعادلة كالتالي:

$$B = \mu \frac{nI}{\ell} \quad (Wb/m^2)$$

ويكون الفيض المغناطيسي ϕ الناتج عن التيار I هو:

$$\phi = BS = \frac{\mu n I S}{\ell}$$

وبالتعويض في المعادلة $L = \frac{N\phi}{I}$ فيمكن الحصول على:

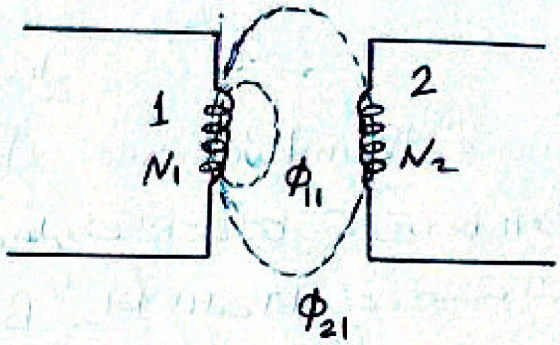
$$L = \frac{\mu . n^2 . S}{\ell}$$

وهذه المعادلة تبين مدى تأثير نفاذية الوسط μ على مقدار معامل الحث الذاتي L في الدارة إذ باستخدام مادة مثل الحديد يمكن الحصول على ملف ذي حث ذاتي كبير.

- الحث المتبادل Mutual Inductance:

إذا فرضنا كما في الشكل التالي أن الملف رقم (1) ملف ابتدائي عدد لفاته N_1 ويمر به تيار شدته I_1، وأن الملف رقم (2) ملف ثانوي مجاور عدد لفاته N_2. إذا تغيرت شدة التيار الابتدائي I_1 فإنه تتولد في الملف الثانوي قوة دافعة تأثيرية ε_2 يتوقف مقدارها طبقاً لقانون فاراداي على معدل تغير الفيض ϕ_{2-1} المخترق الملف (2) نتيجة تغير التيار في الملف (1):

$$\phi_{2-1} \propto I_1 \quad , \quad \phi_{2-1} = K I_1$$



الشكل (2) : دراسة الحث المتبادل بين ملفين

وطبقاً لقانون فاراداي فإن :

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{2-1}}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{2-1}}{dI_1} \cdot \frac{dI_1}{dt}$$

$$\Rightarrow \mathcal{E}_2 = -N_2 \cdot K \frac{dI_1}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt}$$

حيث M ثابت تسمى معامل الحث المتبادل (Coefficient of mutual inductance)

أو باختصار الحث المتبادل (mutual inductance) ويعرف بأنه ،

(القوة الدافعة الكهربية المتولدة في دائرة ما عندما يتغير التيار في دارة مجاورة بمعدل وحدة شدة التيار في الثانية) .

ووحدة الهنري (Henry) (H) ، أي وحدات الحث الذاتي نفسها .

ويمكن استنتاج تعبير آخر للحث المتبادل كما يلي :

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{2-1}}{dt} = -M \frac{dI}{dt}$$

بحذف dt وإجراء التكامل نحصل على :

$$N_2 \Phi_{2-1} = M I_1 + Const$$

وحيث إن $\Phi_{2-1} = 0$ عندما $I_1 = 0$

$$N_2 \Phi_{2-1} = M I_1 \quad ; \quad M = \frac{N_2 \Phi_{2-1}}{I_1}$$

وبالمثل عندما يمر تيار I_2 في الملف (2) فإنه سيؤثر بدوره في الملف رقم (1) وبهذا فإن المعادلتين يمكن كتابتهما كما يلي:

$$M = \frac{N_1 \Phi_{1-2}}{I_2}$$

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi_{1-2}}{dt} = -M \frac{dI_2}{dt}$$

وإذا فرضنا أن الحث الذاتي يحدث في الملفين هما L_1 و L_2 فإن المعادلتين تصبحان:

$$\mathcal{E}_1 = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - M \frac{dI_2}{dt} \qquad (*')$$

$$\mathcal{E}_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} - M \frac{dI_1}{dt}$$

وبالإشارة التي تسبق M قد تكون موجبة أو سالبة فهي تعتمد على اتجاه التيار المار في الملفين فقد يؤدي التيار في أحد الملفين إلى زيادة أو نقص الفيض المغناطيسي خلال الملف الآخر.

وبأسلوب آخر تفقد الإشارة قبل M على محصلة المجالين المغناطيسيين الناتجين عن الملفين فقد تكون ناتجة عن جمعهما أو الفرق بينهما.

وحيث أن: $M = \sqrt{L_1 . L_2}$.

$$\Rightarrow \mathcal{E}_1 = -L_1 \frac{dI_1}{dt} \pm \sqrt{L_1 L_2} \cdot \frac{dI_2}{dt}$$

$$\mathcal{E}_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} \pm \sqrt{L_1 L_2} \frac{dI_1}{dt}$$

واذا حسبت (dI_1/dt) من المعادلة الأولى وعوضناها في المعادلة الثانية يمكن الحصول على:

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{1/2}$$

مسألة (3): احسب معامل الحث الذاتي لملف حلزوني بدلالة الهواء طوله L متر ومساحة مقطعه $6\times10^{-4}\ m^2$ وعدد لفاته 1000 لفة ثم أوجد معامل حثه الذاتي إذا لف الملف على قضيب من الحديد نفاذيته النسبية 500، ثم احسب القوة الدافعة الذاتية المتولدة فيه إذا تغير التيار المار فيه بمعدل (15 A/s).

الحل: من العلاقة:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 S}{L}$$

$$\Rightarrow L = 4\pi\times10^{-7} \times \frac{10^6 \times 6\times10^{-4}}{1} = 75,4\times10^{-5}\ (H)$$

وفي حالة لف الملف الحلزوني على قضيب من الحديد:

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 S}{L} \Rightarrow L = 500\times 4\pi\times10^{-7} \times \frac{10^6\times6\times10^{-4}}{1} = 0,377\ H$$

$$\mathcal{E} = -L\frac{dI}{dt} = -0,377\times15 = -5,655\ V$$

مسألة (4):

ملف حلزوني طويل طوله L ومساحة مقطعه S وعدد لفاته N_1 التف حول منتصفه ملف آخر صغير عدد لفاته N_2 كما بالشكل احسب:

1- الحث المتبادل بين الملفين إذا كان $N_1 = 10^3\ turns$ و $N_2 = 20\ turns$ و $L = 1m$ و $S = 10\ cm^2$

2- ما قيمة القوة الدافعة في الدارة الثانية عندما تغير التيار في الدارة (1) بمقدار (10 A/s).

الحل: 1- في الملف (1) تكون كثافة الفيض المغناطيسي في اتجاه محوره عندما يمر تيار فيه:

$$B = \mu_0 \frac{N_1 I}{L}\ (Wb/m^2)$$

عندئذ يكون التدفق المار بالمقطع المركزي للملف (2):

$$\Phi = BS = \mu_0 \frac{N_1 I S}{L}$$

ولما كان هذا التدفق يرتبط بالملف (2) فإن معامل الحث المتبادل:

$$M = \frac{N_2 \cdot \Phi}{I} = \mu_0 \frac{N_2 \cdot N_1 \cdot S}{l}$$

$$M = \frac{12,57 \times 10^{-7} \times 10^{-3} \times 10^{3} \times 20}{1} = 25,1\ \mu H$$

2- القوة الدافعة الحثية لدارة (2) قطعنا بالمعادلة

$$\varepsilon_2 = -M \cdot \frac{dI_1}{dt} \Rightarrow \varepsilon_2 = -25,1 \times 10^{-6} \times 10 = -251\ \mu V$$

• توصيل ملفات الحث Inductors Connection

1- على التوالي Inductors Connection :

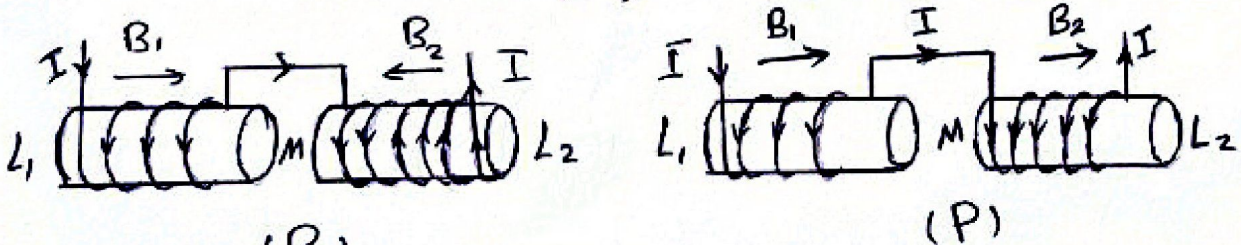
توصل ملفات الحث كما توصل غيرها من العناصر الكهربائية، إما على التوالي أو التوازي أو في شبكات أكثر تعقيداً، وحتى نستطيع مناقشة توصيل الملفات نبدأ بتعريف الحث الذاتي المكافئ كما يلي:

الحث الذاتي المكافئ للشبكة:

• هو نسبة القوة الدافعة الكلية (ذاتية وتبادلية) المتحثة بين طرفي الشبكة إلى معدل تغير التيار المسبب لتوليد هذه القوة.

• إذا افترضنا وجود ملفين أحدهما حثه الذاتي L_1 والثاني حثه الذاتي L_2 ومعامل الحث المتبادل M واتصل هذان الملفان على التوالي ومر بهما التيار I بحيث تكون محصلة العنصر المغناطيسي لهما B_1 و B_2 في اتجاه واحد.

إذا تغيرت شدة التيار المار فيهما فإن القوة الدافعة الكهربائية التأثيرية الذاتية والمتبادلة في كل من الملفين تكون في اتجاه واحد أيضاً.



الشكل (3): توصيل الملفات على التوالي: P- ينتج عند توصيلها ومرور التيار فيهما مجالان مغناطيسيان لهما الاتجاه نفسه
B- متعاكسان في الاتجاه

وتكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف (1) تساوي :

$$\mathcal{E}_1 = L_1 \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt}$$

أما القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف (2) فتساوي :

$$\mathcal{E}_2 = L_2 \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt}$$

وبذلك تكون القوة الدافعة التأثيرية الكلية :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = (L_1 + L_2 + 2M) \frac{dI}{dt}$$

$$\mathcal{E} = L' \frac{dI}{dt}$$

ويمكن إيجاد المحث الذاتي المكافئ L' بسهولة :

$$L' = L_1 + L_2 + 2M \quad (*)$$

وإذا مر التيار I بحيث يؤدي إلى أن تكون B_1 و B_2 في اتجاه ومضاد فإن محصلة القوة الدافعة التأثيرية الذاتية والمتبادلة المتولدة (نتيجة تغير شدة التيار) في الملفين هي :

$$\mathcal{E} = \left(L_1 \frac{dI}{dt} - M \frac{dI}{dt}\right) + \left(L_2 \frac{dI}{dt} - M \frac{dI}{dt}\right)$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = (L_1 + L_2 - 2M) \frac{dI}{dt} = L'' \frac{dI}{dt}$$

$$\therefore L'' = L_1 + L_2 - 2M \quad (**)$$

مكتبة A to Z