# مجـــــال
# الظواهر الكهربائية

## الوحدة الثالثة

# التحريـــض الكهرومغناطيسي

# INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE


| عناصر الوحدة | | | العناصر الفرعية | الصفحة |
|---|---|---|---|---|
| 1 | التحريض الكهرومغناطيسي | 1 – 1 | ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي | 64 |
| | | 2 –1 | مفهوم التدفق المغناطيسي | 67 |
| | | 3 – 1 | قانون فراداي | 69 |
| | | 4 – 1 | قانون لنز | 71 |
| | | 5 – 1 | عبارة القوة الكهربائية المحركة المتحرضة | 73 |
| 2 | التحريض الذاتي | 1 _ 2 | مفهوم التدفق الذاتي في التيار المستمر | 74 |
| | | 2 _ 2 | مفهوم التدفق الذاتي في التيار المتناوب | 75 |
| | | 3 – 2 | ذاتية دارة مغلقة | 77 |
| | | 4 – 2 | عبارة القوة الكهربائية المحركة للتحريض الذاتي | 78 |
| | | 5 – 2 | التوتر بين طرفي وشيعة | 79 |
| | | 6 – 2 | الطاقة المخزنة في وشيعة | 80 |
| 3 | تمارين محلولة | | تمارين محلولة ( 19 تمرين) | 81- 99 |

## المكتسبات القبلية :

السنة الثالثة متوسط

الوحدة – 12: شروط رؤية جسم. . . . . ص 128 .

الوحدة – **13 :** مفهوم الخيال ، . . . . . ص 138 .

الوحدة – **14**: المرآة الكروية. . . . . ص 150 .

## الوسائل التعليمية و المراجع :

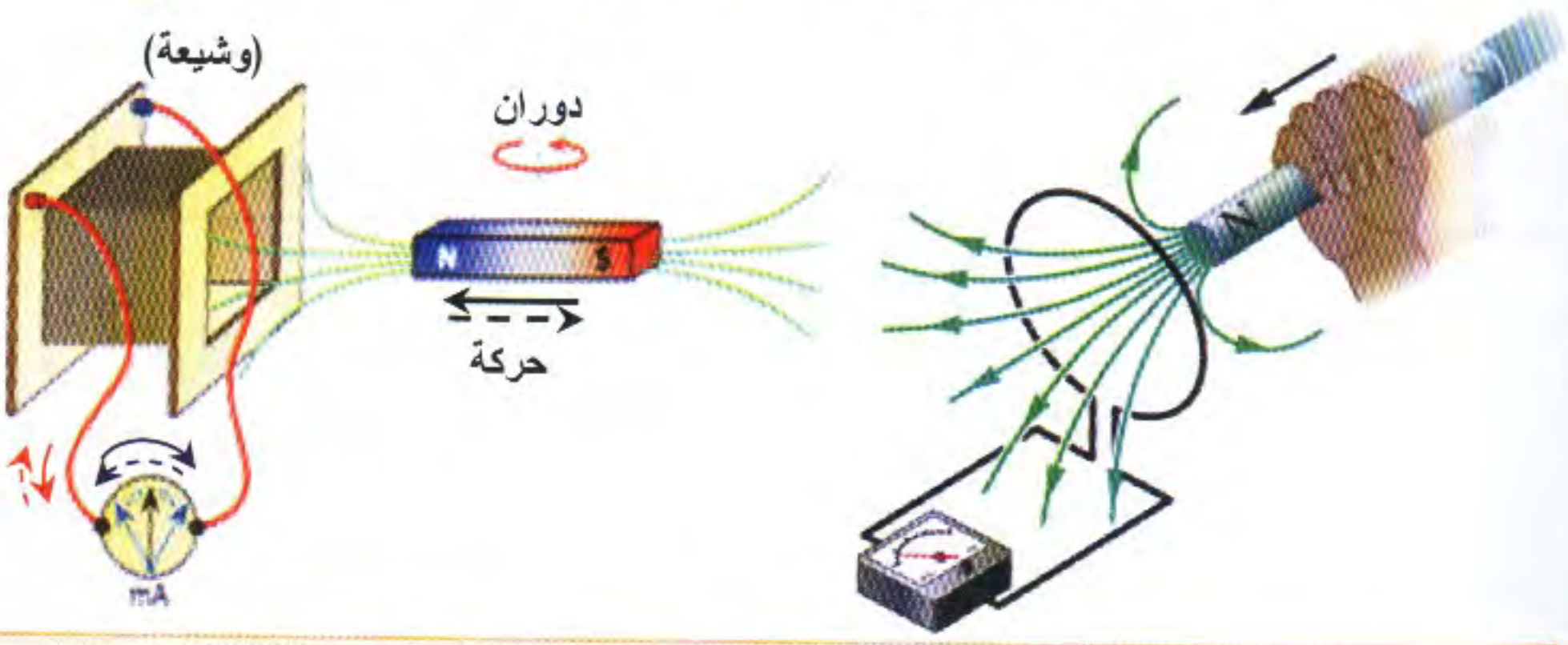
1 – منهاج مادة العلوم الفيزيائية للسنة الثانية من التعليم الثانوي .

2 – الكتاب المدرسي .

3 – مراجع وكتب مدرسية عربية و فرنسية .

3 – بحوث متعددة في الواب .

# التحريض و التحريض الذاتي




إذا كان لتيار كهربائي القدرة على توليد حقل مغناطيسي فهل من الممكن أن تولد حركة مغناطيس (أو كهرومغناطيس) تيارا كهربائيا ؟ أو بعبارة أخرى هل يمكن تحويل الطاقة الميكانيكية بوساطة مغناطيسية إلى طاقة كهربائية ؟ ما الفرق بين المحرك الكهربائي و المولد الكهربائي ؟ وما هو المبدأ الذي يقوم عليه هذا الأخير .وما هو عمل محول كهربائي ؟

هذه التساؤلات وأخرى مرتبطة بها سنجيب عليها من خلال عناصر هذه الوحدة : التحريض الكهرومغناطيسي .

## الكفاءات المستهدفة :

- إبراز ظاهرة توليد تيار كهربائي .
- إبراز تأثير تغير الحقل المغناطيسي في توليد تيار نتحرض .
- يعرف أن بروز تيار متحرض في دارة كهربائية هو نتيجة لبروز قوة كهربائية متحرضة : قانون للبلاص .
- يفسر ظهور قوة كهربائية محركة عن طريق التغير في التدفق المغناطيسي .
- يفسر جهة التيار الكهربائي المتحرض بقانون لنز .
- الكشف التجريبي عن ظاهرة التحريض الذاتي .
- يفسر مبدأ عمل المنوب .

# التحريض الكهرومغناطيسي

# -1- التحريـــض الكهرومغناطيسي
# Induction électromagnétique

في الوحدتين السابقتين تعرضنا إلى ظاهرتين ، الأولى ومن خلال درسنا تجربة أرستد (*Oersted*) رأينا كيف يولد تيار كهربائي يمر في ناقل حقلا مغناطيسيا يؤثر به على المحيط من حوله (انحراف إبرة مثلا) . أما الظاهرة الثانية فتتمثل في التأثير المتبادل بين تيار كهربائي و حقل مغناطيسي في توليد قوة كهرومغناطيسية وتطبيقاتها المتعددة في الصناعة الكهروميكانيكية وخصوصا المحركات الكهربائية التي تعتمد على مبدأ تحويل الطاقة الكهربائية بواسطة مغناطيس إلى طاقة ميكانيكية .

إذا كان لتيار كهربائي القدرة على توليد حقل مغناطيسي فهل من الممكن أن تولد حركة مغناطيس (أو كهرومغناطيس) تيارا كهربائيا ؟ أو بعبارة أخرى هل يمكن تحويل الطاقة الميكانيكية بوساطة مغناطيسية إلى طاقة كهربائية ؟ ما الفرق بين المحرك الكهربائي و المولد الكهربائي ؟ وما هو المبدأ الذي يقوم عليه هذا الأخير .وما هو عمل محول كهربائي ؟
هذه التساؤلات وأخرى مرتبطة بها سنجيب عليها من خلال عناصر هذه الوحدة : التحريض الكهرومغناطيسي .

## 1 - 1 ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي

### نشاطات أولية عملية إبراز ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي

### نشاط 1 : حركة نسبية بين مغناطيس ووشيعة .

**☐ لماذا هذا النشاط ؟**

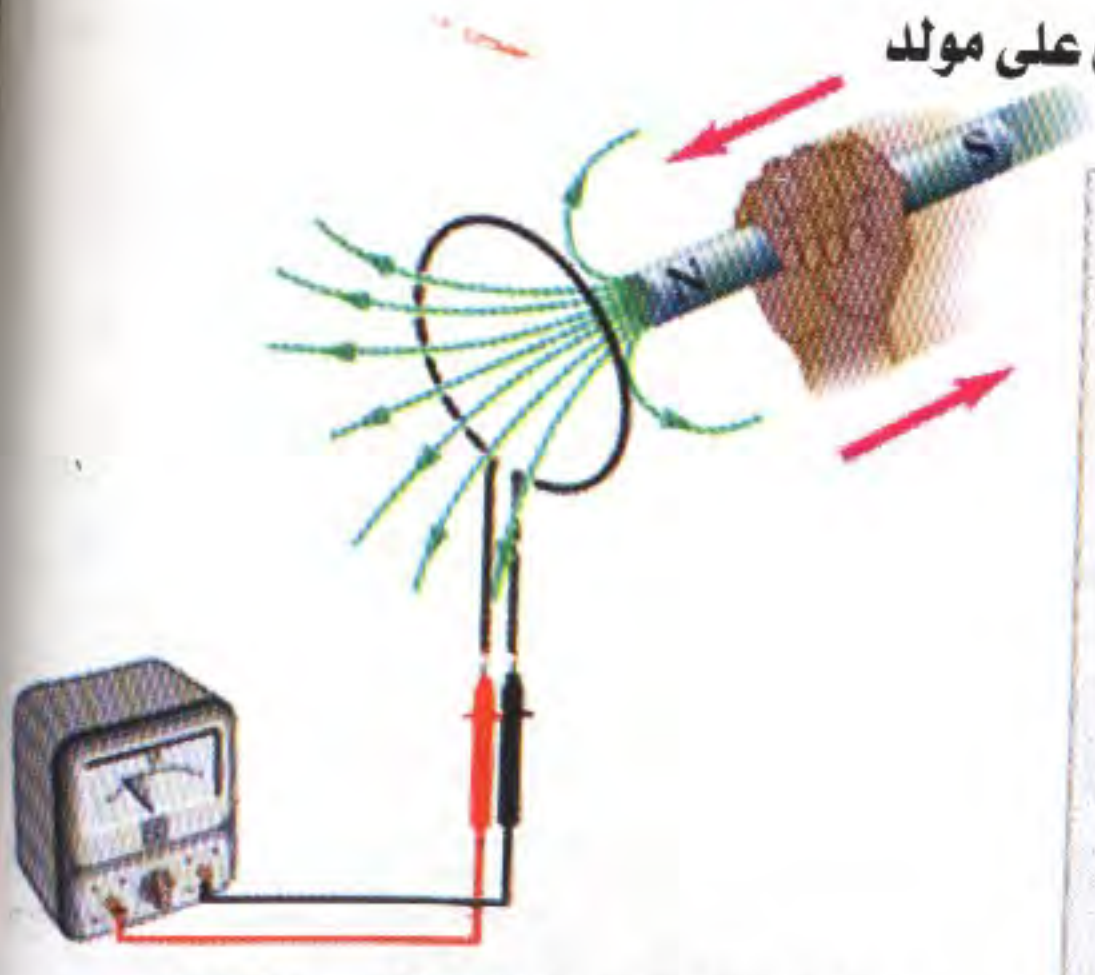
إبراز ظاهرة توليد تيار كهربائي في دارة لا تحتوي على مولد.
نريد من خلال هذا النشاط إبراز تأثير تغير الحقل المغناطيسي في توليد تيار متحرض .

**☐ أحضر الأدوات التالية :**

قضيب مغناطيسي ، حلقة ، جهاز غالفانومتر ، وشيعة ، أسلاك توصيل ، نابض ، حامل و راسم اهتزاز مهبطي .

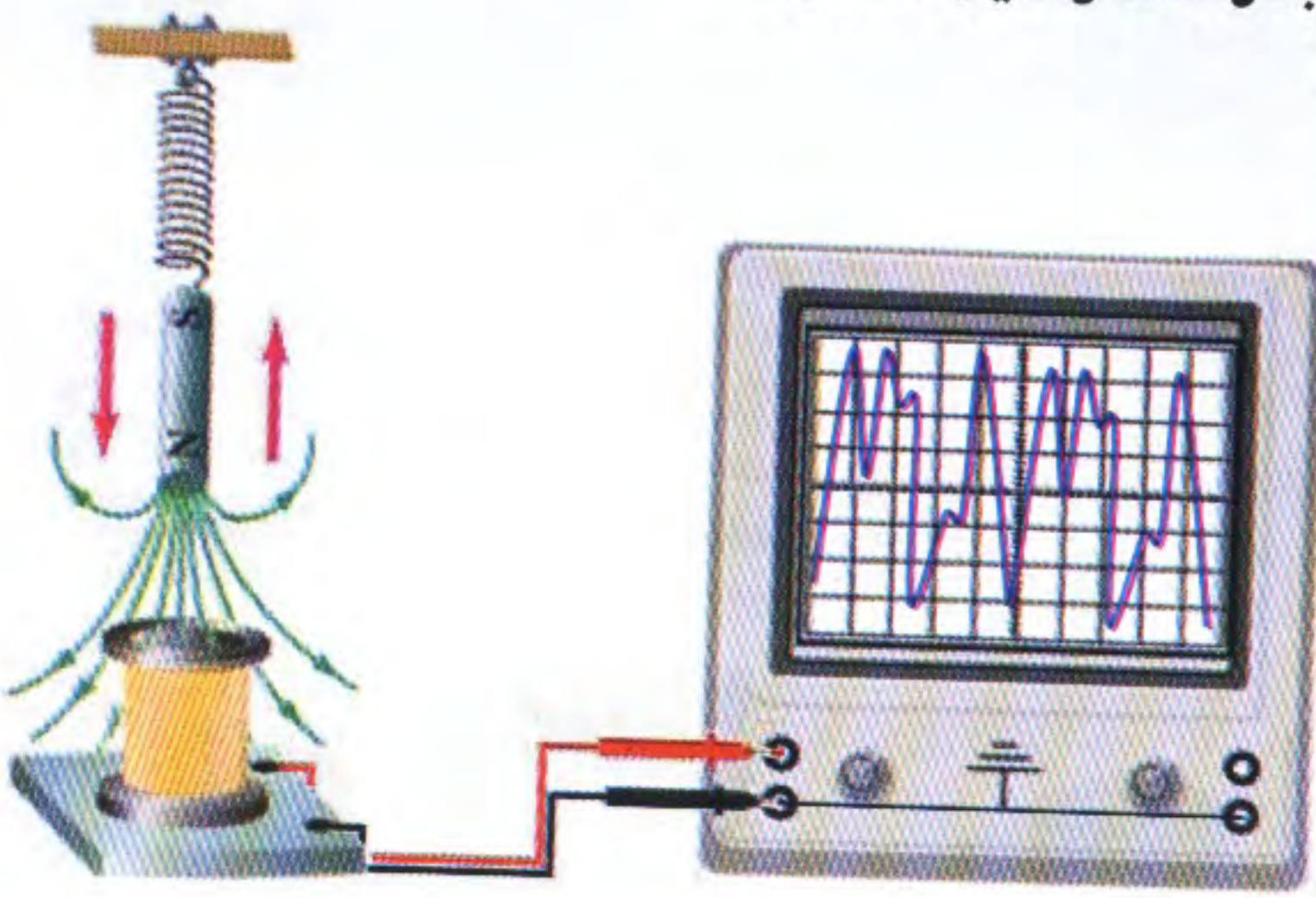
**التجربة الأولى : إبراز توليد تيار في دارة لا تحتوي على مولد**

صل الحلقة مباشرة بمقياس الغلفانومتر ثم أمسك القضيب المغناطيسي باليد بحيث يكون قطبه الشمالي نحو الأمام ثم حركه وفق محور الحلقة ذهابا وإيابا كما هو مبين بالوثيقة – 1 ؛ ماذا تلاحظ ؟
أوقف الحركة ؛ هل تحصلت على نفس النتيجة ؟
أعد التجربة مقربا هذه المرة القطب الجنوبي للمغناطيس ؛ ماذا تلاحظ ؟
أعد التجربة السابقة وهذا بتثبيت المغناطيس و تحريك الحلقة .
قارن نتائج هذه التجربة مع ما استنتجته سابقا .




وثيقة – 1 : تحريك المغناطيس يولد تيار

## التجربة الثانية : إبراز بعض خصائص التيار المتحرض.



وثيقة – 2 : حركة المغناطيس تولد تيار متحرض

أربط وشيعة بمدخلي راسم اهتزاز مهبطي كما هو مبين بالوثيقة 2- .
بواسطة نابض مرن ، علق المغناطيس بحيث يكون محوره منطبق مع محور الوشيعة .
عند ازاحة النابض عن وضع توازنه وتركه ، ماذا تشاهد على شاشة الراسم . ماذا تقول عن التيار المتولد في دارة الوشيعة فيما يخص شدته واتجاهه ؟

❑ المشاهدات:

عند تقريب أو إبعاد أحد قطبي المغناطيس من أحد وجهي الوشيعة في دارة مغلقة ينحرف مؤشر جهاز الغلفانومتر في اتجاه أو في آخر دلالة على مرور تيار كهربائي
جهة التيار المتولد في دارة الوشيعة تتعلق بجهة حركة القضيب ونوعية قطبه .
شدة التيار المتواد في دارة الوشيعة غير ثابتة وتتغير بتغير الزمن

## نتيجة أولى:

بالرغم من عدم وجود مولد كهربائي في دارة الوشيعة فلقد تم توليد تيار كهربائي في دارتها المغلقة جراء حركة نسبية (تأثير متبادل) بين المغناطيس و الوشيعة هذه الظاهرة تسمى : **ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي.**
**المغناطيس يسمى المحرض و الوشيعة تسمى المتحرض**

## نشاط 2 : دارة في حقل مغناطيسي متغير

### ❑ لماذا هذا النشاط ؟

نريد من خلال هذا النشاط إبراز تأثير تغير الحقل المغناطيسي في توليد تيار متحرض

### ❑ أحضر الأدوات التالية

منبع لتوليد التيار المستمر(=) و المتناوب(~) وشيعتين لهما نفس المحور ، مقياس غالفانومتر وأسلاك توصيل كهربائية

نضع الوشيعتين ($B_1$) ، ($B_2$) جنبا إلى جنب ونوصل الأولى بقطبي المولد الكهربائي حيث نترك القاطعة مفتوحة أما الوشيعة الثانية فنربطها مباشرة بجهاز الغلفانومتر ، ثم تحقق التجربتين التاليتين :

التجربة الأولى : أنظر الوثيقة – 3 .

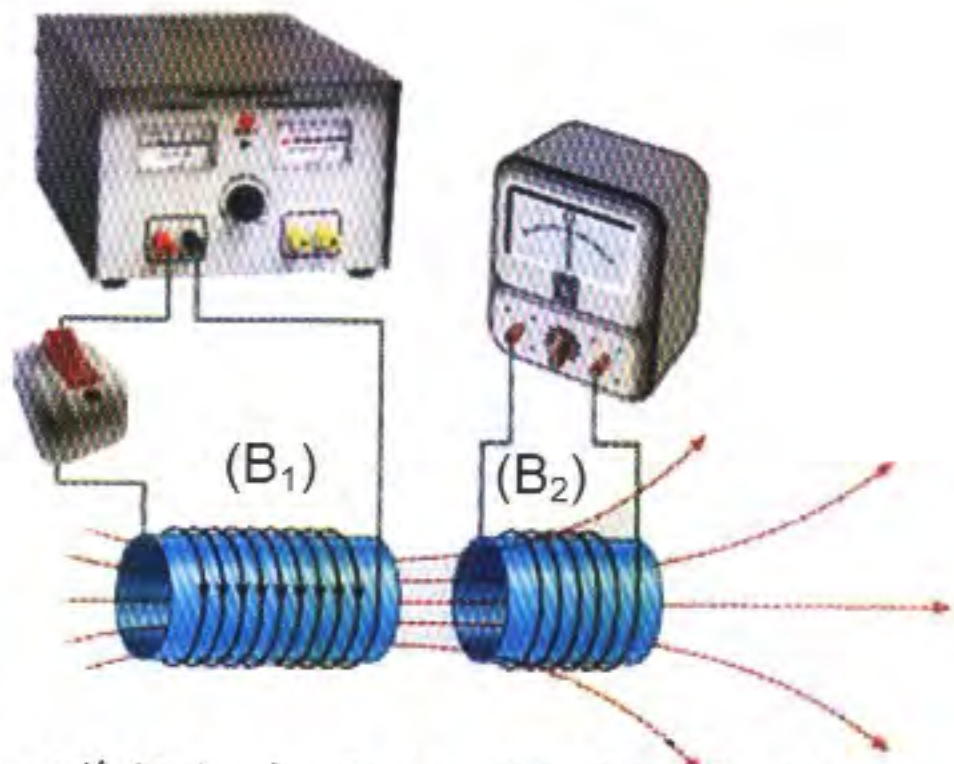
نغذي الوشيعة ($B_1$) بتيار مستمر(=) ؛ هل يولد تيار متحرض قي دارة الوشيعة ($B_2$) :

- عند فتح أو إغلاق القاطعة ؛ ما سبب ذلك ؟
- أثناء مرور تيار مستمر بصفة دائمة ؛ لماذا ؟

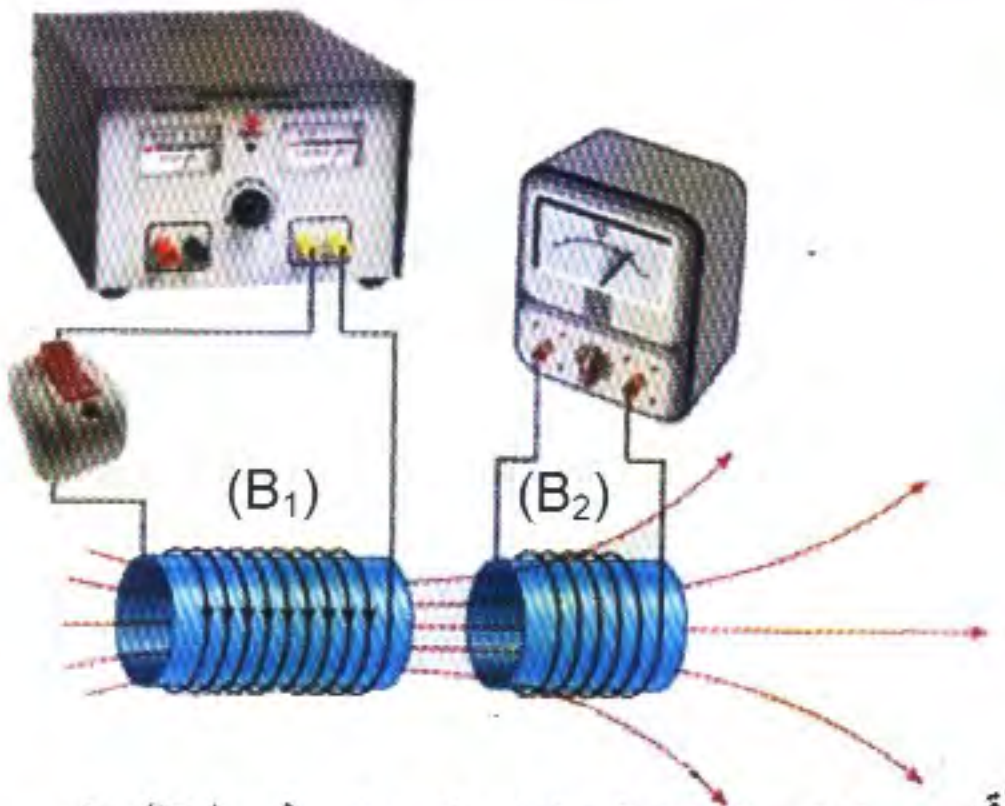
التجربة الثانية : أنظر وثيقة الشكل– 4 .

نغذي الوشيعة ($B_1$) بتيار متناوب(~) :

- هل يولد تيار متحرض في دارة الوشيعة ($B_2$) ؟ أعطي تفسيرا لذلك .
- ماذا تقول عن شدة التيار المتحرض عندما نغير شدة التيار بالزيادة أو بالنقصان في دارة ($B_1$) ؟ أو بتغيير الوشيعة ($B_1$) بأخرى عدد حلقاتها أكبر أو اصغر .




شكل–3 : توليد تيار متحرض في ($B_2$) أثناء غلق أو فتح دارة ($B_1$)




شكل– 4 : توليد تيار متحرض في ($B_2$) عند تمرير تيار متناوب في دارة ($B_1$)

❑ المشاهدات:

عند تغذية الوشيعة ($B_1$) بتيار مستمر نلاحظ ما يلي :

عند غلق أو فتح القاطعة ، يولد تيار متحرض في دارة الوشيعة ($B_2$) .

عندما يكون التيار المستمر دائم المرور، فإن تحريك إحدى الوشيعتين بالنسبة للأخرى يولد تيارا متحرضا.

عند تغذية الوشيعة ($B_1$) بتيار متناوب (متغير الاتجاه و الشدة) نلاحظ مرور تيار متحرض بصفة دائمة في دارة الوشيعة ($B_2$)

تزداد شدة التيار المتحرض (أو تنقص) بزيادة شدة الحقل المحرض (أو بنقصانه) .

## نتيجة ثانية :

كل دارة لا تحتوي على مولد كهربائي موضوعة في حقل مغناطيسي متغير يولد فيها تيارا متحرضا .

الوشيعة ($B_1$) تسمى المحرض و الوشيعة ($B_2$) تسمى المتحرض .

❑ تفسير ظاهرة التحريض المغناطيسي

من نتائج النشاطين السابقين (حركة نسبية بين مغناطيس و وشيعة ثم دارة في حقل مغناطيسي متغير) تبين أنه يمكن إنتاج تيار كهربائي في دارة مغلقة لا تحتوي على مولد انطلاقا من حقل مغناطيسي . الظاهرة تسمى بالتحريض المغناطيسي . ولتفسير ذلك ، نقول أنه في الحالتين هناك تغييرا في الحقل المغناطيسي للمحرض هذا التغير ينجم عنه تغيرا في خطوط الحقل عبر الدارة المغلقة للمتحرض وبالتالي يتولد تيارا متحرضا يدوم مدة هذا التغير وينعدم عند زواله . وهذا يقودنا حتما إلى تناول مقدار جديد يسمى التدفق المغناطيسي .

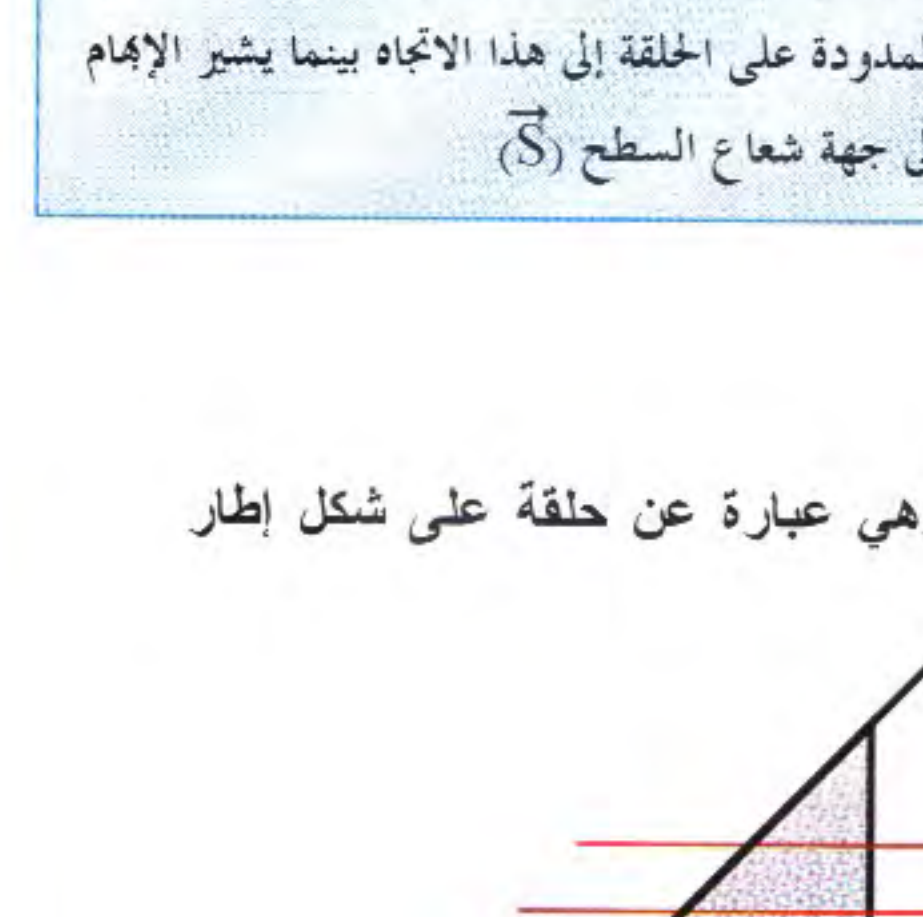
# 1 – 2 مفهوم التدفق المغناطيسي

لغويا كلمة تدفق تعني مرور شيء (ماء ، ضوء ، أشخاص ...) عبر حيز ما (فتحة أنبوب ، سطح زجاجي ، باب ...). فيزيائيا التدفق المغناطيسي يعبر عن كمية خطوط الحقل المغناطيسي التي تجتاز سطح دارة مغلقة (حلقة ، وشيعة ....)

## ❑ تعريف شعاع السطح $\vec{S}$

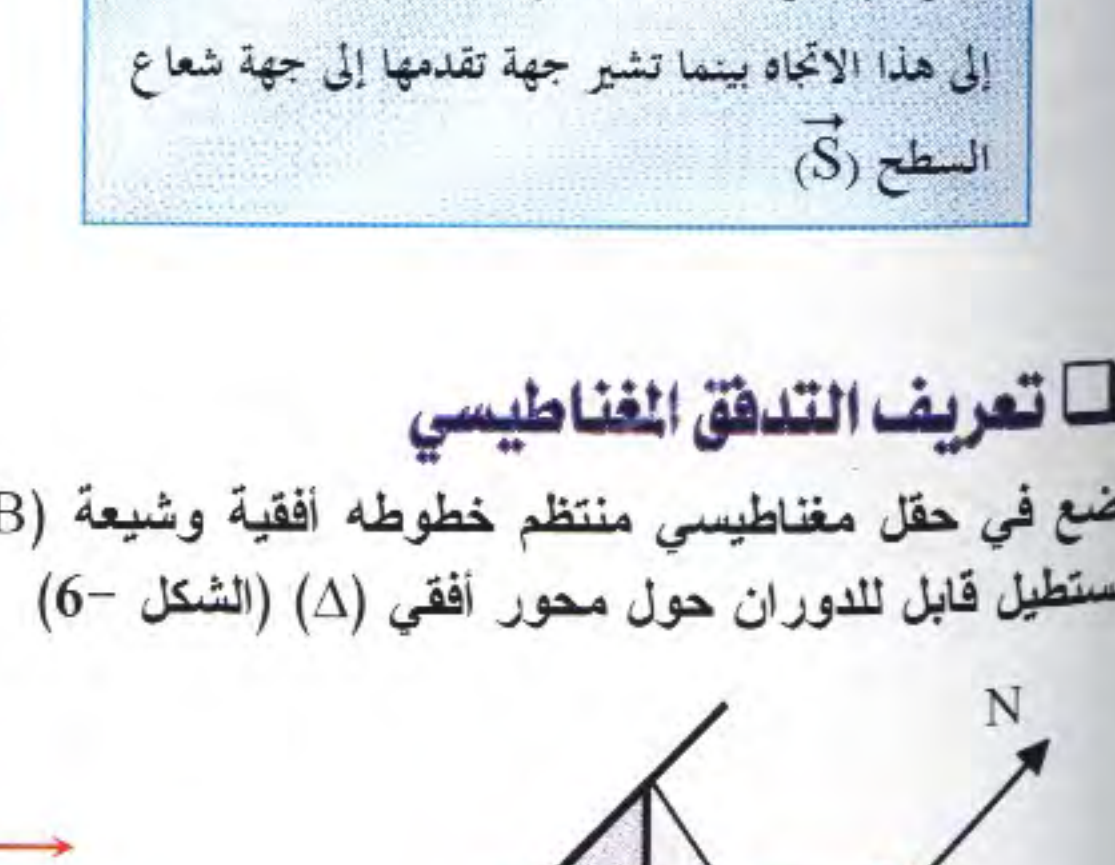
ليكن (P) محيط مغلق و موجه ، مساحته S . إن شعاع السطح $\vec{S}$ لهذا المحيط له الخصائص التالية :

- نقطة التطبيق : مركز السطح المغلق .
- الحامل : عمودي على السطح S .
- الجهة : تحدد بقاعدة اليد اليمنى أو قاعدة سدادة ماكسوال وثيقة 5 – a و b .




وثيقة 5 –b : قاعدة اليد اليمنى

نختار جهة موجبة حيث تشير جهة أصابع اليد اليمنى المدودة على الحلقة إلى هذا الاتجاه بينما يشير الإبهام إلى جهة شعاع السطح $(\vec{S})$

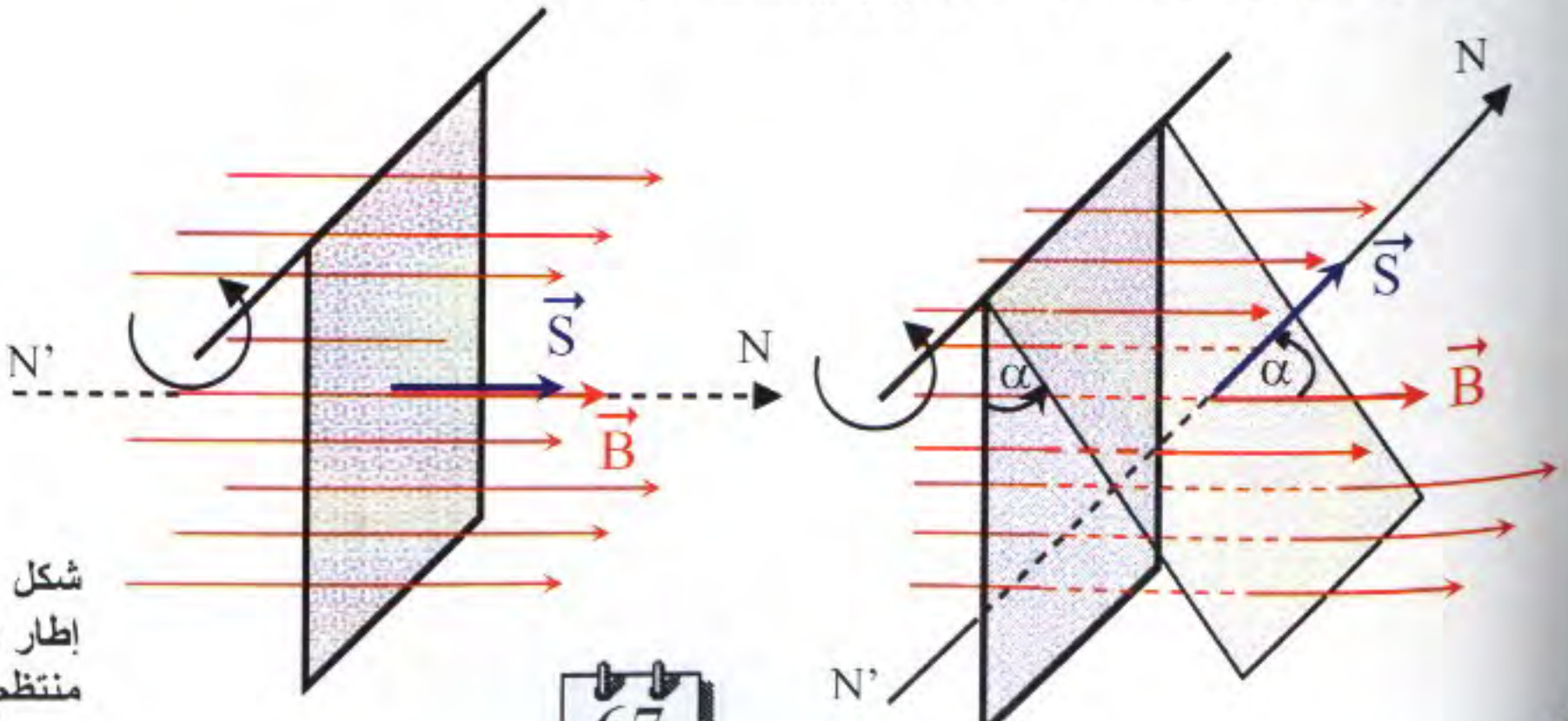



وثيقة 5 –a : قاعدة ماكسويل

نختار جهة موجبة حيث تشير جهة دوران السدادة إلى هذا الاتجاه بينما تشير جهة تقدمها إلى جهة شعاع السطح $(\vec{S})$

## ❑ تعريف التدفق المغناطيسي

نضع في حقل مغناطيسي منتظم خطوطه أفقية وشيعة (B) وهي عبارة عن حلقة على شكل إطار مستطيل قابل للدوران حول محور أفقي (Δ) (الشكل –6)




شكل – 6 : حلقة بشكل إطار في حقل مغناطيسي منتظم

# التحريض الكهرومغناطيسي

تعرف التدفق المغناطيسي للحقل $\vec{B}$ عبر السطح المغلق (S) لدارة مغلقة بالجداء السلمي :

$\Phi = \vec{B}.\vec{S}$ أو $\Phi = B.S.\cos\alpha$

B : تقدر بالتسلا (T) و تقاس بالتسلامتر

S : تقدر بالمتر مربع ($m^2$) .

$\Phi$: تقدر بالويبر (Wb) و يقاس بالويب-متر

مع : $\alpha = (\vec{S}, \vec{B})$

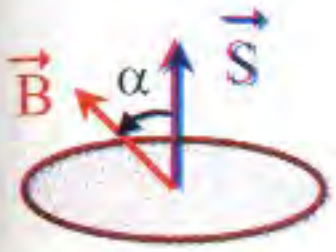
في النظام الدولي للوحدات ، تقدر وحدة التدفق بالويبر (*weber*) : wb

**هام جدا :**

1) يتبين من خلال هذا التعريف أن التدفق المغناطيسي هو مقدار جبري ، إشارته تتعلق بقيمة الزاوية $\alpha$ .
2) بالنسبة لوشيعة تحتوي على عدد من الحلقات N ، يكون التدفق المغناطيسي الذي يعبرها :

$$\Phi(\text{وشيعة}) = N.\vec{B}.\vec{S} = N.B.S.\cos\alpha$$

## تطبيق :




شكل – 7 .

❑ التدفق المغناطيسي عبر حلقة (شكل – 7) :

حلقة نصف قطرها $r = 5\ cm$ موضوعة في حقل مغناطيسي منتظم $B = 0.4\ T$ ، شعاعه يصنع زاوية $\alpha$ مع الناظم على السطح .

أحسب قيمة التدفق المغناطيسي من أجل الزوايا $0°$ ، $45°$ ، $90°$ و $180°$ .

- طويلة شعاع السطح : $\|\vec{S}\| = \pi.r^2 = 7.85 \times 10^{-3}\ m^2$
- قيم التدفق المغناطيسي تحسب من العلاقة : $\Phi = BS.\cos\alpha$

| $\alpha(°)$ | 0 | 45 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|
| $\Phi$(wb) | $3.14 \times 10^{-3}$ | $2.20 \times 10^{-3}$ | 0 | $-3.14 \times 10^{-3}$ |

❑ التدفق المغناطيسي عبر حلزونية تضم N حلقة (الشكل –8) :

حلزونية تظم N= 100 حلقة ، نصف قطرها $r = 5\ cm$ .

توضع الحلزونية في حقل مغناطيسي منتظم ، طويلته 0.4 T ويصنع شعاعه زاوية $\alpha$ مع الناظم على السطح .أحسب التدفق المغناطيسي الذي يعبر الحلزونية من أجل الزوايا : $0°$ ، $45°$ ، $90°$ و $180°$ .

شكل – 8 .

- طويلة شعاع السطح : $\|\vec{S}\| = \pi.r^2 = 7.85 \times 10^{-3}\ m^2$
- كل حلقة من الحلزونية يعبرها تدفقا : $\Phi_1 = BS.\cos\alpha$
- مجموع الحلقات (N) للحلزونية يعبرها التدفق : $\Phi = N.B.S = N.B.S.\cos\alpha$

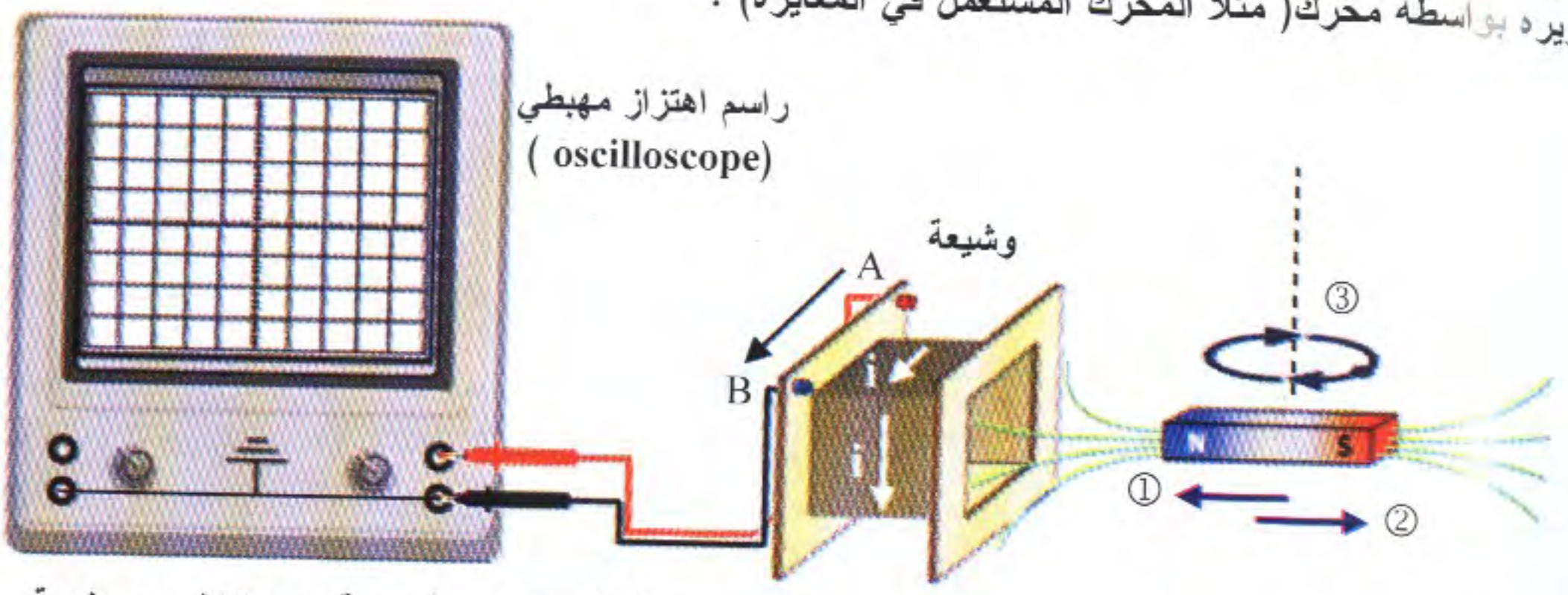
| $\alpha(°)$ | 0 | 45 | 90 | 180 |
|---|---|---|---|---|
| $\Phi$(wb) | $3{,}14 \times 10^{-1}$ | $2{,}20 \times 10^{-1}$ | 0 | $-3{,}14 \times 10^{-1}$ |

# التحريض الكهرومغناطيسي

## 1 - 3 قانون فراداي

### نشاط عملي إبراز وجود القوة المحركة الكهربائية المتحرضة

نصل طرفي وشيعة براسم اهتزاز مهبطي ( أحد طرفيها بالمدخل $y_1$ و الطرف الثاني لها بالأرضي) كما هو مبين بالوثيقة -9 ؛ ونضع أمام أحد وجهيها قضيب مغناطيسي يمكن تحريكه أفقيا وفق محور الوشيعة أو تدويره بواسطة محرك( مثلا المحرك المستعمل في المعايرة) .




وثيقة – 9 : حركة نسبية بين مغناطيس ووشيعة

### الانجاز العلمي:

عندما نقرب بسرعة القطب الشمالي (N) للمغناطيس من الوشيعة ، نشاهد على شاشة الراسم مخطط الاهتزاز البياني ① شكل10 –a .

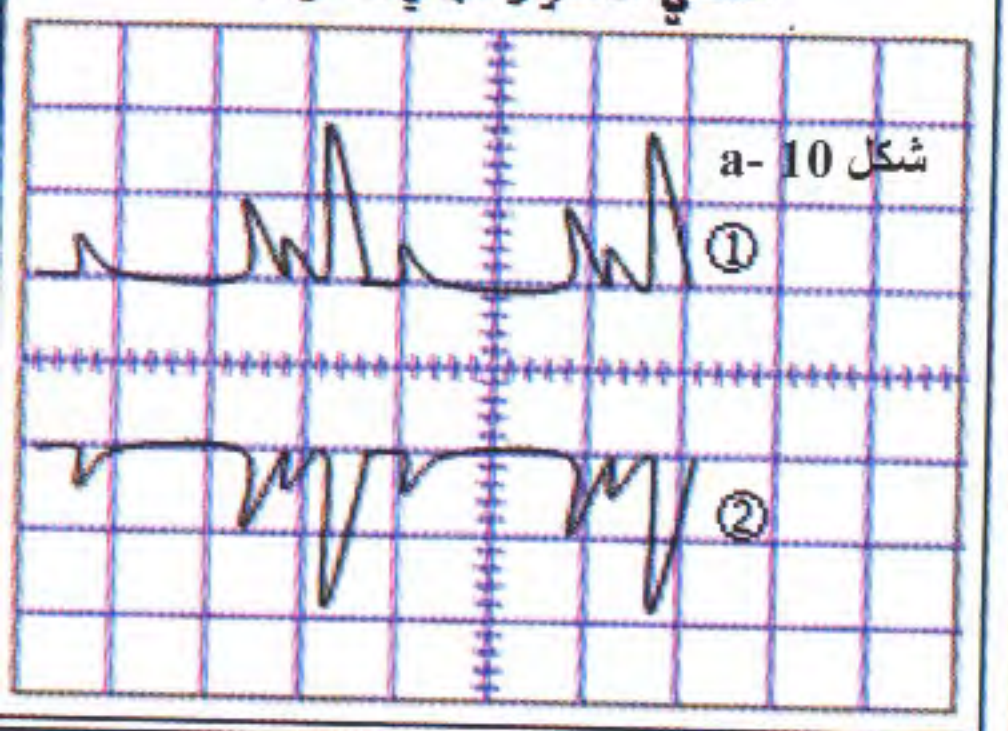
عندما نبعد بسرعة القطب الشمالي (N)للمغناطيس من الوشيعة ، نشاهد على شاشة الراسم مخطط الاهتزاز البياني ② شكل 10 –a.

عندما ندير بواسطة محرك المغناطيس الموضوع بجوار الوشيعة ، نشاهد على شاشة الراسم مخطط الاهتزاز البياني ③ شكل 10–b .

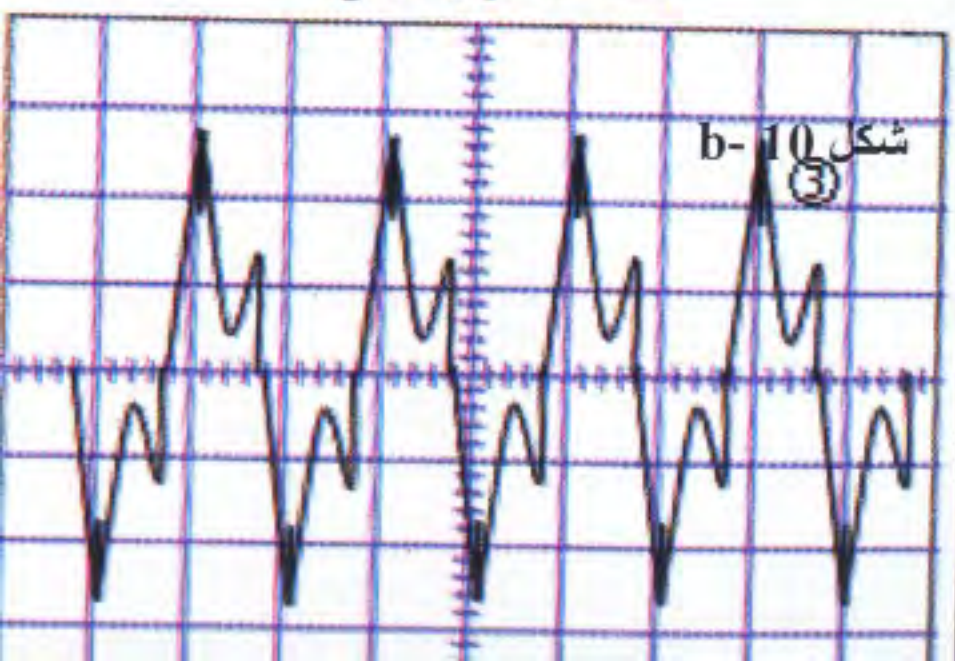
بالاعتماد على مخططات الاهتزاز البياني في كل تجربة ، بين :

1) ماذا تمثل المخططات المشاهدة على الشاشة .
2) متى يتولد تيار متحرض .
3) بماذا يتعلق اتجاه التيار المتحرض .

مخطط الاهتزاز البياني① و②




مخطط الاهتزاز البياني③



# التحريض المغناطيسي

## تفسير الظواهر المشاهدة

عند تقريب القطب الشمالي (N) للمغناطيس ، يُولد في الوشيعة تيارا متحرضا i شدته موجبة وينعدم عندما تتوقف الحركة في نفس الوقت ينشأ بين طرفي الوشيعة توترا متحرضا $u_{BA} > 0$ (المخطط ①) .
عند إبعاد القطب الشمالي (N) للمغناطيس ، يُولد في الوشيعة تيارا متحرضا i شدته سالبة و ينعدم عندما تتوقف الحركة و في نفس الوقت ينشأ بين طرفي الوشيعة توترا متناوبا متحرضا $u_{BA} < 0$ (المخطط ②) .
عندما ندير المغناطيس ، يتولد في الوشيعة توترا (f.e.m) متحرضا وهو كما يبدو بالمخطط ③ ، دالة دورية في الزمن موجبة وسالبة بالتناوب. إنه مبدأ عمل المنوبات (*les alternateurs*)

## نتيجة النشاط (القوة المحركة الكهربائية المتحرضة)

### قانون فراداي (القانون الأساسي للتحريض)

إن وجود تيار كهربائي متحرض i في دارة مغلقة هو نتيجة لبروز قوة كهربائية محركة متحرضة (f.e.m.i) مرتبطة بتغير التدفق المغناطيسي $\Delta\Phi$ تدوم مدة هذا التغير ، عرفها فراداي كما يلي :
كل تغير في التدفق المغناطيسي (مهما كانت طريقته) عبر دارة (لا تحتوي على مولد) ، يولد تيارا متحرضا يدوم مدة هذا التغير وتكون هذه الدارة مقرا لقوة محركة كهربائية متحرضة (f.e.m.i) ، تتناسب :

- طردا مع التغير في التدفق المغناطيسي المحرض $\Delta\Phi$ .
- وعكسا مع المدة الزمنية $\Delta t$ لهذا التغير .

عبارتها المتوسطة تعطى بالعلاقة التالية :

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

$\Delta\Phi$ : تقدر بالويبر (Wb) و تقاس بالويب – متر
$\Delta t$ : تقدر بالثانية (S) .
e : تقدر بالفولط (Volt) و تقاس بالفولط – متر

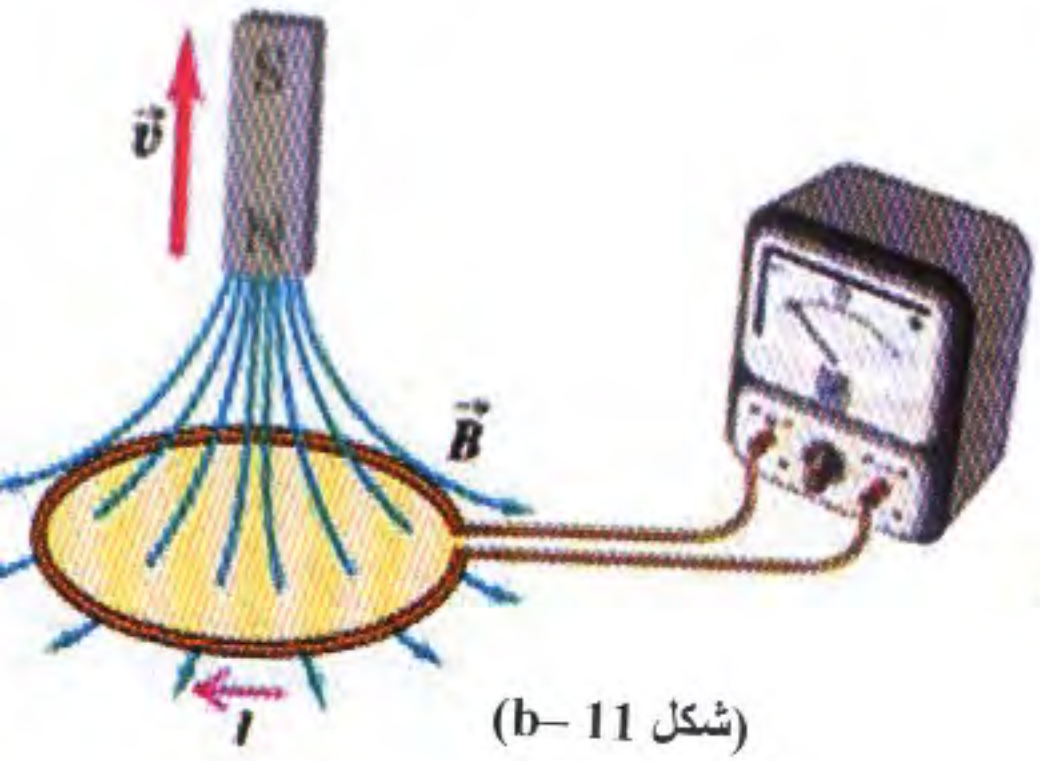
من هنا جاء التعريف الرسمي للويبر **Weber** (Wb) . الويبر هو التدفق المغناطيسي الذي يعبر حلقة وينتج قوة كهربائية محركة متحرضة قيمتها **1 volt** عندما يتغير هذا التدفق خلال زمن قدره **1 S** .

## 1 – 4 قانون لنز (جهة التيار المتحرض)

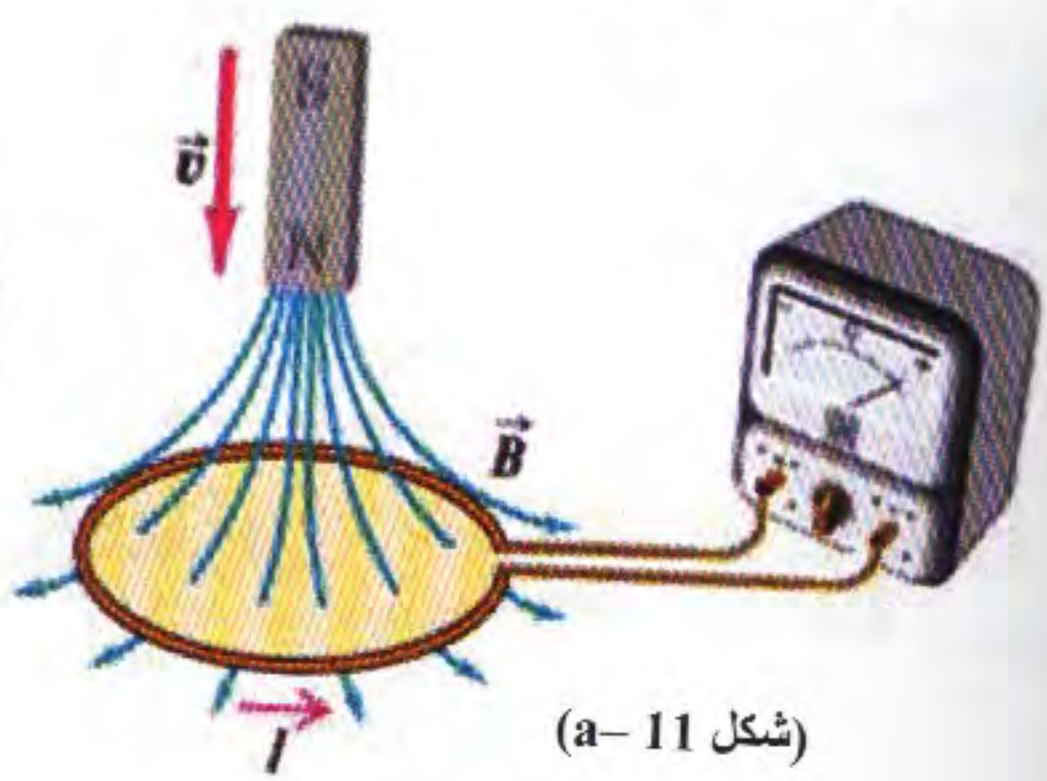
ركب دارة مكونة من حلقة (أو وشيعة مسطحة) موصولة بجهاز ميكرو أمبيرمتر ، ذي صفر مركزي وبواسطة قضيب
غناطيسي ، نقوم بالتجربتين التاليتين :

### التجربة الأولى :

1. نقرب بسرعة القطب الشمالي (N) للقضيب مغناطيسي من الوشيعة (شكل 11 –a) . ما هي جهة
مرور التيار في الوشيعة ؛ استنتج نوع وجه الوشيعة الذي ولده هذا التيار المتحرض ؟
2. أبعد القطب الشمالي (N) بسرعة عن الوشيعة (شكل 11 –b) ؛ ما هي جهة التيار المتحرض في
الوشيعة ؛ استنتج وجه الوشيعة الذي ولده هذا التيار .



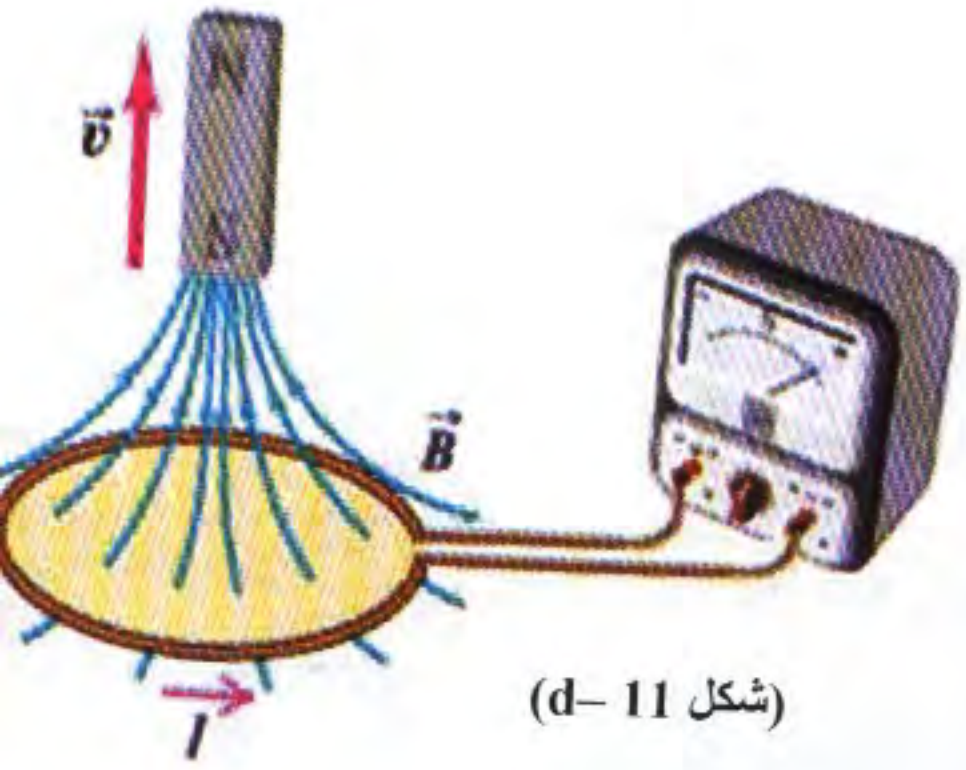
(شكل 11 –b)



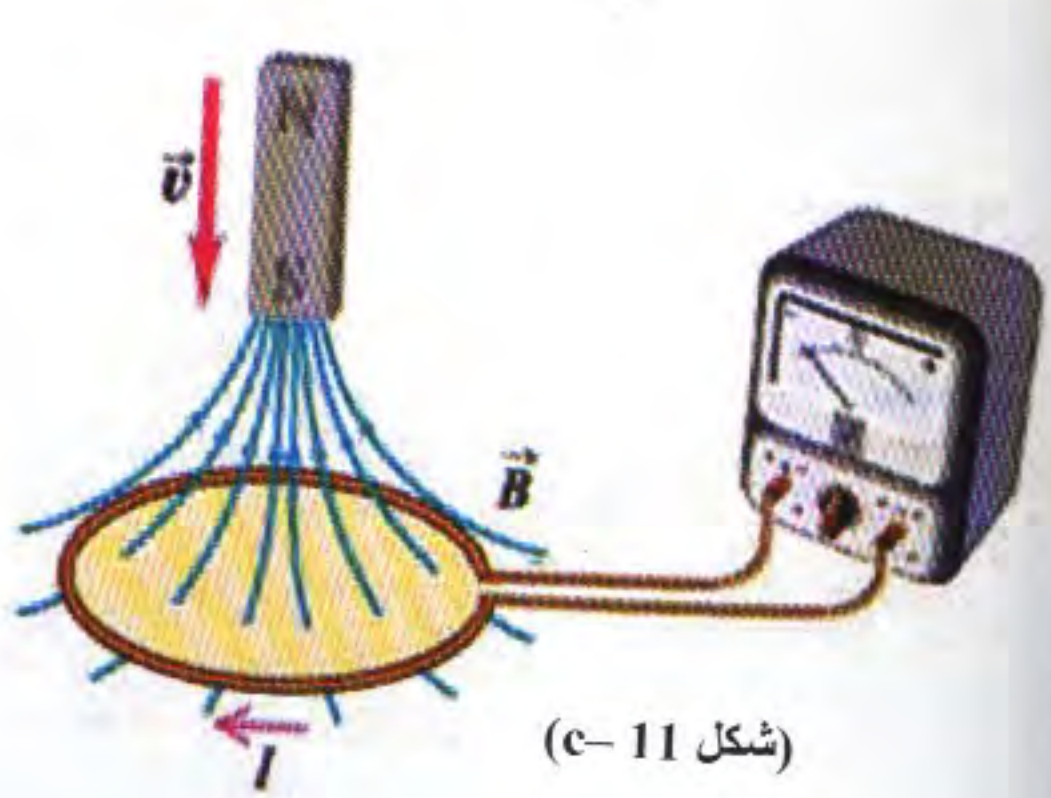
(شكل 11 –a)

### التجربة الثانية :

3. نقرب بسرعة القطب الجنوبي (S) لقضيب مغناطيسي من الوشيعة(شكل –11–c) . ما هي جهة مر
التيار في الوشيعة ؛ استنتج نوع وجه الوشيعة الذي ولده هذا التيار المتحرض ؟
4. أبعد القطب الجنوبي (S) بسرعة عن الوشيعة (شكل –11–d) ؛ ما هي جهة التيار المتحرض في
الوشيعة ؛ استنتج وجه الوشيعة الذي ولد هذا التيار .



(شكل 11 –d)



(شكل 11 –c)

## ☐ المشاهدات و التفسير :

نعلم أن كل وشيعة يمر فيها تيار كهربائي تولد حقلا مغناطيسيا وتكتسب بذلك وجهان شمالي و جنوبي ، نحددهما بواسطة إحدى القواعد المعروفة ( رجل أمبير ، اليد اليمنى ... الخ .)

وطبقا للقانون العام للتحريض المغناطيسي نعلم أن كل تغير في التدفق المغناطيسي ($\Delta\Phi$) يولد تيارا متحرضا (i) في الدارة المتحرضة ( هنا الوشيعة) وبدوره يولد هذا التيار المتحرض (i) في الدارة المتحرضة حقلا مغناطيسيا متحرضا .

من خلال إشارة جهاز الميكرو أمبير – متر يمكننا الكشف عن جهة التيار المتحرض وبتطبيق قاعدة رجل أمير(مثلا) ، نحدد بكل سهولة الوجهين الشمالي و الجنوبي للوشيعة .

- عند تقريب القطب الشمالي (N) للمغناطيس ، يولد التيار المتحرض في الوشيعة وجها شماليا (N) .
- عند إبعاد القطب الشمالي (N) للمغناطيس ، يولد التيار المتحرض في الوشيعة وجها جنوبيا (S)
- عند تقريب القطب (S) للمغناطيس ، يولد التيار المتحرض في الوشيعة وجها جنوبيا (S) .
- عند إبعاد القطب الجنوبي (S) للمغناطيس ، يولد التيار المتحرض في الوشيعة وجها شماليا (N)

## نتيجة النشاط : جهة التيار المتحرض

### ☐ قانون لنز (جهة التيار المتحرض)

للتيار الكهربائي المتحرض جهة ، تجعله يعاكس بأفعاله السبب الذي أنشأه (أو ولده) .

### ☐ قانون فاراداي – لنز (القوة الكهربائية المحركة اللحظية)

إن العلاقة الواردة في قانون فراداي $E = \Delta\Phi/\Delta t$ ، تمثل الــ ق.ك.م المتوسطة بين اللحظتين t و $t + \Delta t$

– عندما يكون المجال الزمني $\Delta t$ غير متناهي في الصغر ، العلاقة الواردة في قانون فراداي $E = \Delta\Phi/\Delta t$ تمثل الــ ق.ك.م المتوسطة بين اللحظتين t و $t + \Delta t$ .

– وعندما يكون نفس المجال قصير جدا ويتناهى إلى الصفر ، يتناهى تغير التدفق $\Delta\Phi$ هو أيضا إلى الصفر و النسبة $\Delta\Phi/\Delta t$ تنتهي إلى نهاية تسمى تعريفا بمشتق التدفق المغناطيسي بالنسبة للزمن :

$$e(t) = \lim_{\Delta t \to 0} E = \frac{d\Phi}{dt}$$

ولجعل قانون فاراداي ينسجم مع قانون لنز (للتيار المتحرض جهة يعاكس بافعاله السبب الذي أدى إلى نشوءه) تكتب عبارة القوة الكهربائية المحركة المتحرضة اللحظية على النحو التالي :

$$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

الطرف الثاني لهذه العلاقة يقرأ كما يلي :
مشتق التدفق المغناطيسي بالنسبة للزمن .

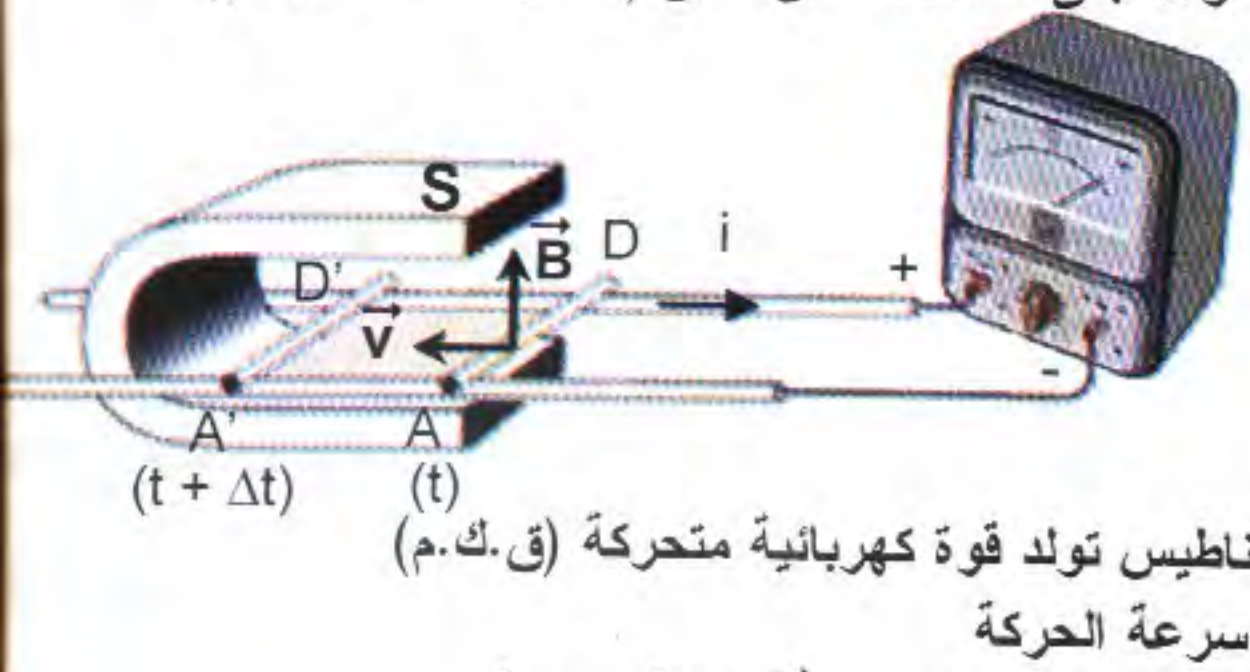
لتطبيق هذه العلاقة يجب معرفة الدالة القابلة للاشتقاق $\Phi = f(t)$ ، وإلا نتعامل مع الــ.ق.ك.م المتحرضة المتوسطة :

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

الطرف الثاني لهذه العلاقة يقرأ كما يلي :
تغير التدفق المغناطيسي على تغير الزمن .

## 1 – 5 عبارة الـ ق.ك.م المتحرضة بالنسبة لناقل متحرك في حقل مغناطيسي منتظم

**نشاط :** ناقل AD أسطواني من النحاس طوله $\ell$ بإمكانه الحركة على سكتين أفقيتين (تجهيز السكتين للبلاص) البعد بينهما d ، بسرعة ثابتة $\vec{v}$ ، في مكان يوجد به حقل مغناطيسي منتظم شعاعه $\vec{B}$ عمودي على مستوي السكتين . نقبل أن مناحي AD ، $\vec{v}$ و $\vec{B}$ تبقى متعامدة مثنى مثنى (الشكل – 12 الموالي) .




**المطلوب :** بين أن حركة الناقل داخل الحقل المغناطيسي تولد قوة كهربائية متحركة تحريضية (E) ثم أوجد عبارتها .

### المشاهدات :

- عند انتقال القضيب بين فرعي المغناطيس تولد قوة كهربائية متحركة (ق.ك.م)
- سعة الـــ ق.ك.م تتناسب طردا مع سرعة الحركة
- إشارة الـــ ق.ك.م تتعلق بجهة شعاع الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ وجهة الحركة .

### التفسير :

بين اللحظتين t و $t + \Delta t$ المتقاربتين ، الناقل $AD = \ell$ ، ينجز مسافة $AA' = d = v.t$ ويقطع تدفقا مغناطيسيا $\Delta\Phi$ مساويا للتدفق عبر المساحة $S = AA'D'D$ ، الممسوحة من طرف القضيب .

$\Delta\Phi = \vec{B}.\vec{S}$ حيث : $(\vec{S}, \vec{B}) = 0$

وعليه ، يكون : $\Delta\Phi = B.S.\cos 0 = B.S$

$= B.\ell.d$

ونتيجة لتغير التدفق أثناء الحركة في الدارة وطبقا لقانون فراداي–لنز ، تنشأ في الدارة AA'D'D ، قوة كهربائية محركة متحرضة متوسطة عبارتها :

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -B.\ell\frac{d}{\Delta t}$$

وبما أن $v = \frac{d}{\Delta t}$ ، نستنتج ما يلي :

$$\boxed{E = -B.\ell.v}$$

وبالمثل ، نبرهن في حالة تغير عنصري للتدفق المغناطيسي $(d\Phi)$ خلال المجال الزمني العنصري $(dt)$ ، أن عبارة القوة الكهربائية المحركة المتحرضة اللحظية تعطى بالعلاقة :

$$\boxed{e(t) = -B.l.v}$$

- e (t) : فولط (volt : V)
- B : تسلا (tesla : T)
- l : متر (mètre : m)
- v : متر/ثانية (e/seconde : m)

### شدة التيار المتحرض .

إذا كانت للدارة المتحرضة (*circuit induit*) مقاومة مكافئة $R = \Sigma r$ ، تستنتج الشدة المتوسطة للتيار طبق لقانون بوييه (*Pouillet*) من العلاقة التالية :

$$\boxed{E = \Sigma r.i \Rightarrow I = \frac{E}{R}}$$

- i : أمبير (ampère : A)
- E : فولط (volt : V)
- R : أوم (ohm : Ω)

# 2- التحريـــض الذاتـــي

# L auto_induction

لقد رأينا في الفقرات السابقة أن كل تيار يجتاز وشيعة يولد حقلا مغناطيسيا . التدفق عبر هذه الوشيعة يسمى تدفقا خاصا (أو تدفقا ذاتيا) .
وبالمقابل كل تغير في التدفق الذاتي يولد طبقا لظاهرة التحريض في الدارة المغلقة الموافقة ق.ك.م متحرضة ذاتية (أو للتحريض الذاتي) .
ظاهرة التحريض الذاتي تحدث في دارة تلعب دور المحرض و المتحرض في نفس الوقت

**نشاط** **عملي** **ابراز ظاهرة التحريض الذاتي**

### ❐ لماذا هذا النشاط ؟

1 – نريد أن نكشف تجريبيا على ظاهرة التحريض الذاتي
2 – إبراز تأثير التدفق الخاص في توليد تيار متحرض
3 – إبراز تأثير مدة تغير الزمن على شدة التيار

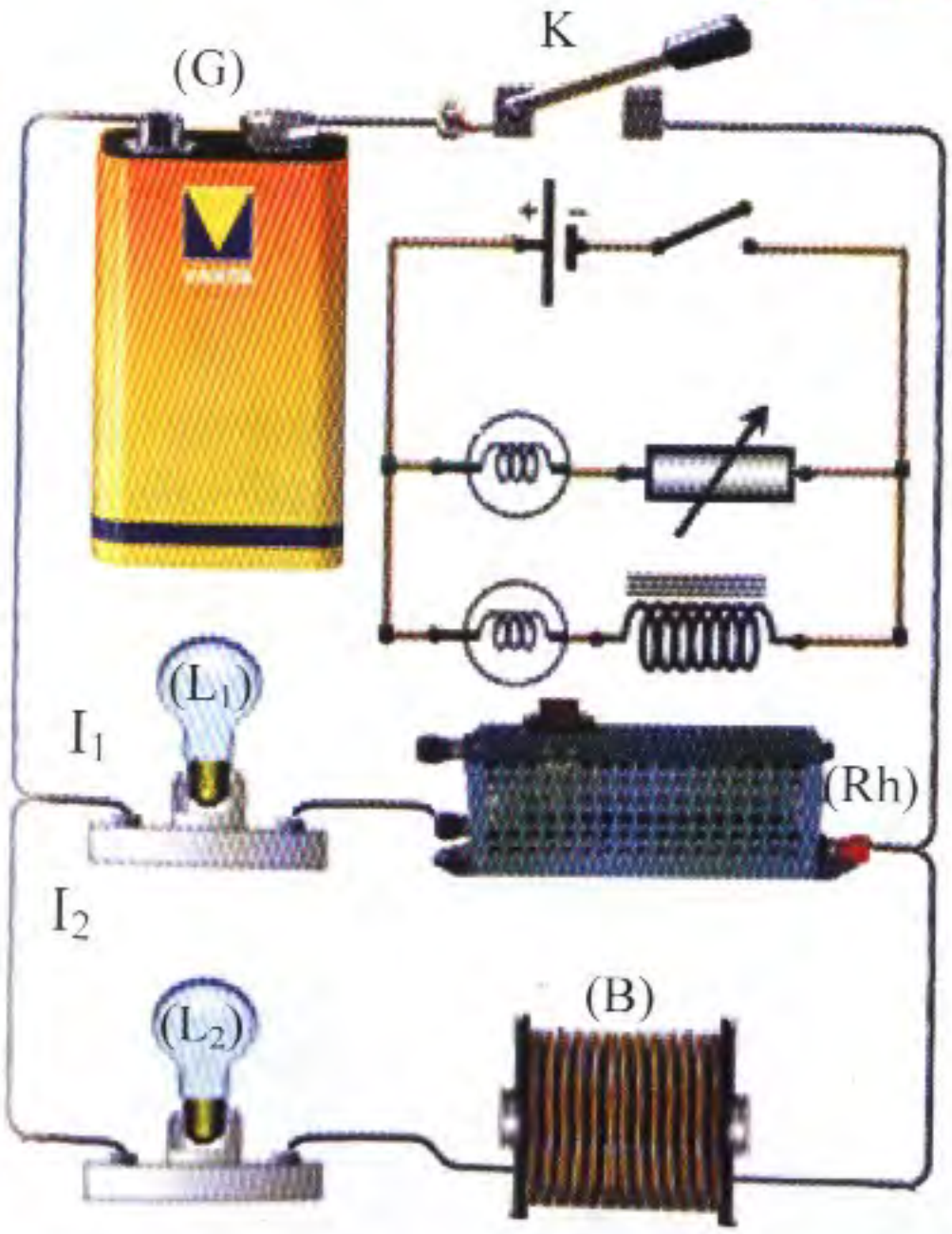
### ❐ الأدوات : مولد للتيار المستمر(عمود كهربائي)

و التيار المتناوب(G.BF) ، قاطعة يدوية ، مصباحين متماثلين ، معدلة ، وشيعة ، مقاومة ، أسلاك توصيل و راسم اهتزاز مهبطي .

## 2 – 1 مفهوم التدفق الذاتي في التيار المستمر

### ❐ الانجاز العلمي

ننجز الدارة الكهربائية المبينة في الشكل- 1 والتي تحتوي على مولد كهربائي (G) يغذي فرعين يتكونان من :
– مصباح ($L_1$) مربوط على التسلسل مع معدلة (Rh) .
– مصباح ($L_2$) مماثل لـــ ($L_1$) مربوط على التسلسل مع وشيعة (B) ذات نواة من الحديد اللين مقاومتها R .
1 – أغلق القاطعة وبواسطة المعدلة غير من مقاومة الفرع الثاني إلى أن يتوهج المصباحان بنفس اللمعان . ماذا تستنتج فيما يخص مقاومة الفرعين و التيار الذي يعبرهما ؟
2 – افتح الدارة ، ماذا تلاحظ ؟
3 – أغلق الدارة من جديد ، ماذا تلاحظ ؟




شكل-1 : تجربة التحريض الذاتي باستعمال تيار

**الظواهر المشاهدة :**

- عندما يتوهج المصباحان بنفس الكيفية يجتازهما نفس التيار ($I_1 = I_2$) ، وتكون مقاومة الفرع الأول مساوية لمقاومة الفرع الثاني .
- عند غلق الدارة يتوهج المصباح ($L_1$) لحظيا ، بينما يكون توهج المصباح ($L_2$) تدريجيا . [ تأخر اشتعال المصباح ($L_2$) بالنسبة للمصباح($L_1$)] .
- عند فتح الدارة ينطفئ ($L_1$) لحظيا بينما يتوهج المصباح ($L_2$) بشدة لمدة وجيزة لينطفئ من جديد . [تأخر انطفاء المصباح ($L_2$) بالنسبة للمصباح ($L_1$) ] .

**تفسير الظواهر:**

أثناء عملية غلق الدارة يمر في الوشيعة تيار شدته متزايدة ($I_2 \rightarrow 0$) فيتولد خلالها حقلا مغناطيسيا تدفقه متغيرا وبذلك و طبقا لقانون فراداي–لنز تكون دارة الوشيعة مقرا لقوة كهربائية تحريضية (f.e.m) ويعبرها تيارا متحرضا جهته تعاكس جهة التيار ($I_2$) وهذا هو سبب تعطيل توهج المصباح ($L_2$) بالنسبة للمصباح ($L_1$) ونفس الشيء يقال خلال عملية فتح الدارة .

## نتيجة أولى :

كل وشيعة يجتازها تيار متغير ، ينشأ فيها تيارا متحرضا يولد تدفقا خاصا يعاكس بأفعاله التدفق الذي أنشأه .

الظاهرة تسمى بالتحريض الذاتي .

الوشيعة في هذه الحالة تلعب دور المحرض و المتحرض .

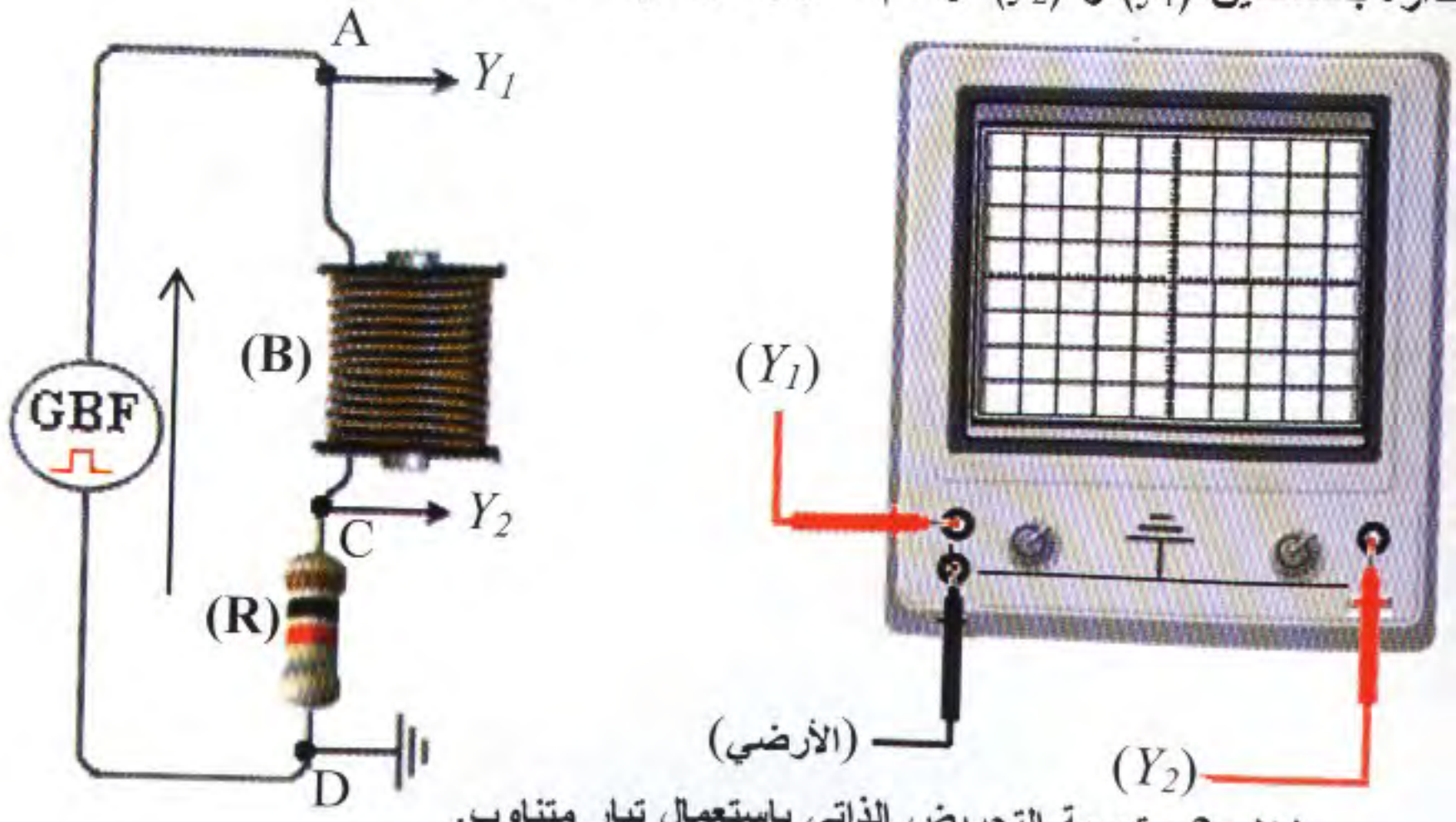
في التيار المستمر ، التحريض الذاتي يظهر عند فتح أو غلق الدارة فقط.

## 2 – 2 مفهوم التدفق الذاتي في التيار المتناوب

في التجربة السابقة رأينا أن ظاهرة التحريض الذاتي في دارة الوشيعة ، تظهر خلال المدة الزمنية القصيرة الموافقة لفتح الدارة أو غلقها . هل هذه النتيجة تبقى صالحة عند استعمال تيار غير مستمر ؟ هذا ما سنراه في التجربة الموالية (الشكل – 2) :

ثنائي قطب (AB) مؤلف من ناقل أومي مقاومته R ، مربوط على التسلسل مع وشيعة ذات نواة من الحديد اللين . نغذي هذا الثنائي القطب بمنبع للتوتر المتناوب (GBF) ، يعطي إشارة مربعة (signal carré).

توصل الدارة بالمدخلين ($y_1$) و ($y_2$) لراسم اهتزاز مهبطي الشكل – 2 .




شكل–2 : تجربة التحريض الذاتي باستعمال تيار متناوب.

# التحريض الكهرومغناطيسي

على شاشة الراسم نشاهد التوترين :

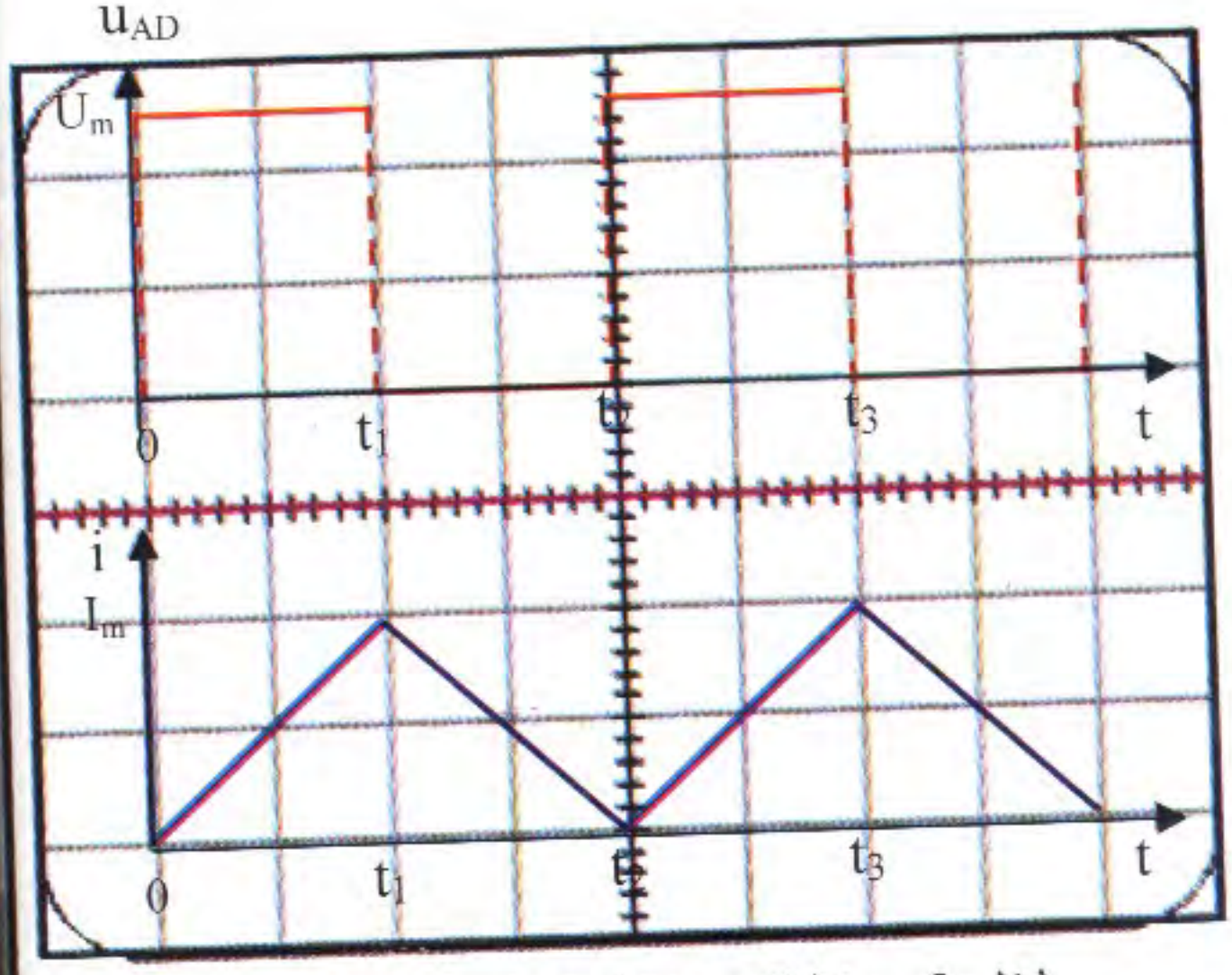
- على المدخل $Y_1$ ، التوتر $u_{AD}(t)$ .....(التوتر بين طرفي المولد *GBF* )
- على المدخل $Y_2$ ، التوتر $u_{CD}(t)$ .....(التوتر بين طرفي الناقل الأومي *R* )

بتطبيق قانون أوم على الناقل الأومي ، نكتب :

$$u_{CD} = R.i$$

ومنه ، نستنتج : $i = \frac{u_{CD}}{R}$

يمكن وبتقريب جيد أن نعتبر المنحنى المشاهد على المدخل $Y_2$ أنه يمثل تغيرات شدة التيار في الدارة $i = f(t)$ .
يعطي الشكل – 3 ، تمثيلا تخطيطيا لما هو مشاهد على شاشة الراسم .




شكل–3 : مخططات الاهتزاز البياني المشاهدة على المخلين $y_1$ و $y_2$ لراسم الاهتزاز المهبطي .

- عند $t = 0$ (لحظة غلق الدارة) ، يأخذ التوتر $u_{AD}$ قيمة عظمى $u_m$ وتبقى هذه الأخيرة ثابتة إلى غاية اللحظة $t_1$ .
  بينما تتزايد شدة التيار تدريجيا وفق دالة خطية معامل توجيهها ثابت ( $\frac{\Delta i}{\Delta t} > 0$ ) إلى أن تأخذ قيمتها العظمى $I_m$ عند اللحظة $t_1$ ؛ نستنتج من ذلك أن شدة التيار لا تأخذ قيمتها العظمى لحظيا .
  (أو بعبارة أخرى نقول أن الوشيعة تأخر إقامة التيار) .
- عند اللحظة $t_1$ ، ينعدم توتر الدارة $u_{AD}$ لحظيا ويبقى معدوما خلال المجال الزمني $\Delta t = t_2 - t_1$ ، بينما وخلال نفس الفترة ، تتناقص شدة التيار وفق دالة خطية معامل توجيهها ثابت ( $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ ) إلى أن تنعدم عند اللحظة $t_2$ ؛ نستنتج من ذلك أن الوشيعة تعطل انعدام التيار في الدارة .

## نتيجة ثانية :

في دارة كهربائية ، تقاوم الوشيعة إقامة أو انعدام التيار الكهربائي ( أي تسعى لمعاكسة تغيرات شدة التيار في الدارة) .

# التحريض الكهرومغناطيسي

## 2 – 3 ذاتية دارة مغلقة

### ❑ ذاتية وشيعة

كل دارة أو جزء من دارة يجتازها تيار i شدته متغيرة يولد في كل نقطة من الفضاء المحيط حقلا مغناطيسيا b يتناسب طردامع شدة التيار i ( $b = k.i$ ) وينتج عن ذلك عبر هذه الدارة تدفقا مغناطيسيا خاصا $\varphi$ يتناسب بدوره مع b وبالتالي مع i .

تعريفا ، يسمى ثابت التناسب بين $\varphi$ و i ، معامل تحريض الدارة (أو الذاتية) و يرمز له بـــ **L** .

$$\varphi = L.i$$

إذن :

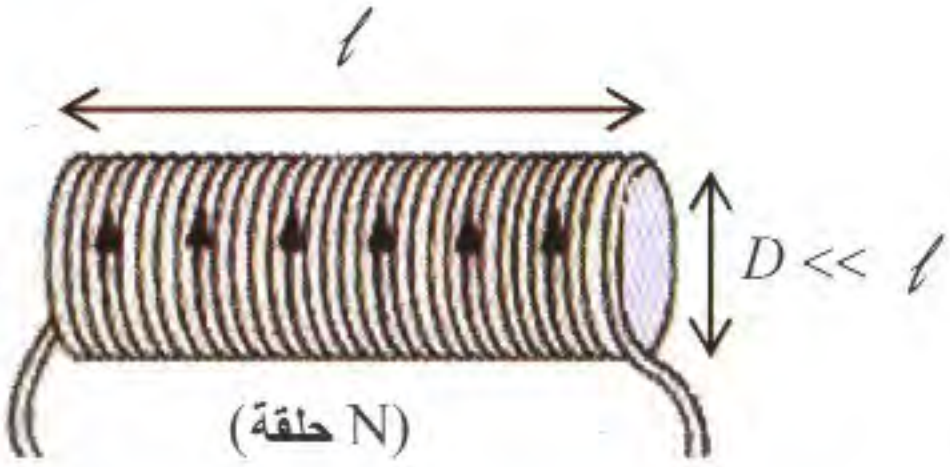
- وحدة معامل التحريض الذاتي

في الجملة الدولية للوحدات ، تقدر الذاتية بالهانري (*Henry*) ويرمز لها بـــ (H) .

$$L = \frac{\varphi}{i} \quad \begin{matrix} \varphi \longrightarrow (Wb) \\ i \longrightarrow (A) \end{matrix} \qquad (H) \longleftarrow L$$

### ❑ ذاتية وشيعة طويلة

بالنسبة لوشيعة طويلة (حلزونية) ، يعبر عن الذاتية بدلالة مميزاتها الهندسية (S ، $\ell$ و N) .




داخل الوشيعة ، يولد التيار الكهربائي i حقلا مغناطيسيا خاصا b تقريبا منتظما ، شدته تعطى في كل لحظة بالعبارة

$$b = 4\pi.10^{-7}\frac{N}{\ell} i \qquad \text{أو} \qquad b = \mu_0 \frac{N}{\ell} i$$

حيث : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ (ثابت نفاذية الفراغ)

وبذلك يكون التدفق المغناطيسي عبر كل حلقة: $\varphi = b.s.\cos\alpha = b.S$ لأن $\cos\alpha = 1$

التدفق المغناطيسي الكلي بالنسبة لـــ N حلقة ، يكون :

$$\varphi = N.b.S = \mu_0 \frac{N^2 S}{\ell} i$$

وبمطابقة هذه العلاقة مع $\varphi = L.i$ ، نجد :

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

لاحظ أن عبارة معامل التحريض تتعلق فقط بالخصائص الهندسية (S ، $\ell$ و N) للوشيعة

إن الذاتية L لوشيعة ، تعبر عن قدرتها في توليد حقل مغناطيسي .

كل وشيعة لها ذاتية معتبرة تولد حقلا تحريضا ذاتيا معتبرا .

## 2 – 4 عبارة الـق.ك.م (f.e.m) للتحريض الذاتي

طبقا لقانون فراداي – لنز ، فعندما يتغير التدفق الذاتي φ عبر دارة مغلقة ، يتولد فيها قوة كهربائية للتحريض الذاتي ، تعطى عبارتها بالعلاقة :

$$e(t) = - \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{d}{dt}(L.i)$$

وبما أن L مقدار ثابت وموجب ، نجد :

$$e(t) = - L \frac{di}{dt}$$

### نتيجة :

عندما يجتاز دارة كهربائية تيارا شدته متغيرة ، التدفق الخاص و المتغير الذي يحدثه هذا التيار عبر الدارة يولد قوة كهربائية متحركة لحظية للتحريض الذاتي (*f.e.m d'auto-induction*) عبارتها :

$$e(t) = - L \frac{di}{dt}$$

ق.ك.م للتحريض الذاتي اللحظية

- e (t) : بالفولط (volt)
- i(t) : بالأمبير (ampère)
- t : بالثانية (seconde)
- L: بالهنري (henry)

هام جدا :

إن العلاقة السابقة $e(t) = -Ldi/dt$ ، تمثل الـ ق.ك.م للتحريض الذاتي اللحظية خلال المجال الزمني الصغير جدا dt . وعندما يكون نفس المجال غير متناهي في الصغر يتحول إلى $\Delta t$ ، لذا نستخدم عبارة الـ ق.ك.م للتحريض الذاتي المتوسطة E وتكون عبارتها :

$$E = - L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

ق.ك.م للتحريض الذاتي اللحظية

عموما نستخدم الحروف الصغيرة (minuscules) ..... i , b , φ , e لتمثيل المقادير اللحظية و التي تتغير خلال فترة زمنية قصيرة جدا dt .

ونستخدم الحروف الكبيرة (majuscules) ..... I , B , Φ, E لتمثيل المقادير المتوسطة و التي تتغير خلال مجال زمني غير متناهي في الصغر $\Delta t$

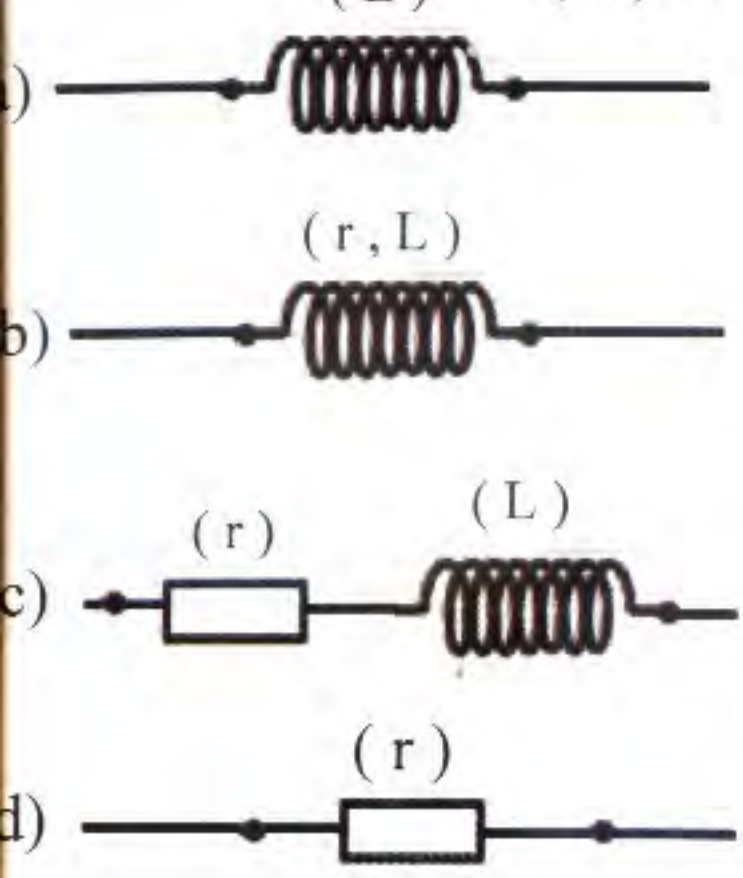
# 2 – 5 التوتر بين طرفي وشيعة

## ❑ التمثيل الاصطلاحي لوشيعة

إن نموذج وشيعة حقيقية يتميز بمقدارين :

- مقاومة سلكها r : $r = \rho \frac{\ell}{s}$
  - $\rho$ : المقاومة النوعية لسلك الوشيعة $(\Omega/m)$
  - $\ell$ : طول السلك $(m)$
  - s : مساحة مقطع السلك $(m^2)$

- ذاتيتها L وهو مقدار ثابت يتعلق بالطريقة التي لف بها السلك .




شكل – 5 : التمثيل الكهربائي لوشيعة

إذا كانت المقاومة r مهملة ، نقول عن الوشيعة أنها ذاتية صرفة .. الشكل 5 – a .

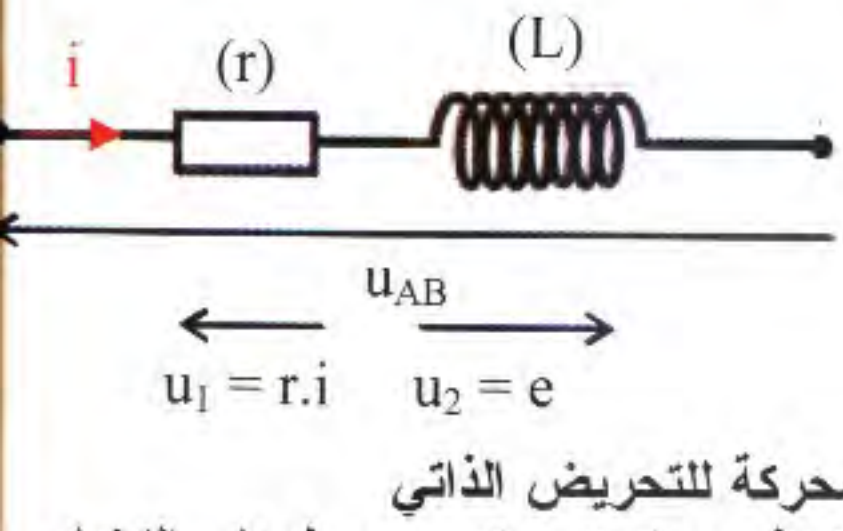
إذا كانا r و L غير مهملين ، نقول عن الوشيعة أنها مقاومية ذاتية أنظر الشكلين 5 – b و c.

في الأخير ، إذا كانت L مهملة ، نقول عن الوشيعة أنها مقاومة صرفة أنظر الشكل 5 – d .

## ❑ قانون أوم لوشيعة تحريضية

نصل الطرفين A و C لبوشيعة تحريضية (r , L) بمنبع توتره $u_{AB}$ ، يجري في الدارة تيارا i شدته متغيرة .

باعتبار الاتجاه الموجب المشار إليه في الشكل الجانبي فإن :




$$u_{AC} = u_1 - u_2$$

عندما يجتاز الوشيعة تيارا i متغيرا ، تكون مقرا لقوة كهربائية محركة للتحريض الذاتي وباعتبار الاتجاه الموجب المشار إليه في الرسم ، فإن الوشيعة تكافئ مولد كهربائي مربوط على التضاد (آخذة) و بتطبيق قانون أوم اللحظي ، على جزء الدارة :

$$u_{AC} = u_1 - u_2$$
$$= r.i - e$$
$$= r.i + L \frac{di}{dt}$$

في الأخير ، نكتب :

$$\boxed{u_{AC} = r.i + L\frac{di}{dt}}$$

ملاحظة : في نظام مستمر : $i = cte \Rightarrow di = 0$

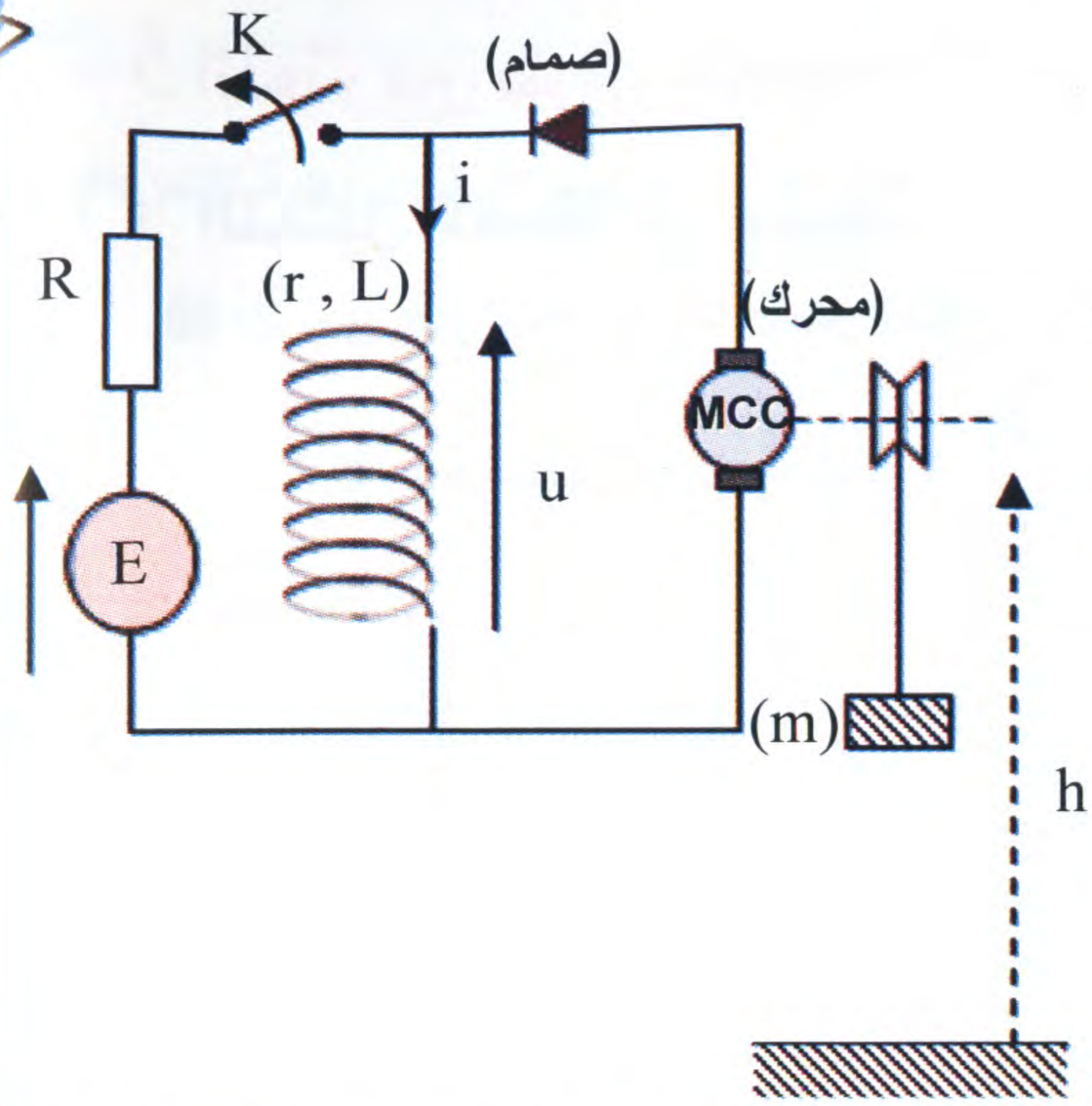
$$\Rightarrow u_{AC} = u_1 = r.i$$

نستنتج أن الوشيعة تسلك سلوك ناقل أومي .

## 2 – 6 الطاقة المخزنة في وشيعة

### ❑ الإبراز التجريبي لطاقة وشيعة .

يغذي منبع للتيار المستمر فرعين أحدهما ① يحتوي على وشيعة (r , L) و الآخر ② يحتوي على صمام و محرك مربوطين على التسلسل . المحرك بإمكانه رفع حمولة كتلتها (m) عن طريق حبل يمر على محز بكرة خفيفة .




**المشاهدات :**

- عند غلق القاطعة يمر تيار كهربائي في الدارة ① .
- عند فتح القاطعة يشتغل المحرك لفترة وجيزة وترفع الحمولة (m) .

**تفسير أولي :** عند غلق القاطعة (k)، يمر التيار i كليا في الوشيعة و الصمام يمنعه من تغذية المحرك وخلال هذه الفترة تشحن الوشيعة بالكهرباء وتخزن طاقة لتعمل بمبدأ الآخذة .
عند فتح القاطعة (K) ، الكهرباء المخزنة في الوشيعة تحول عن طريق عمل كهربائي إلى المحرك فترفع الحمولة .

**تفسير نظري :** تطبيق قانون أوم على وشيعة تحريضية (r , L) يعطي : $u = r.i + L\frac{di}{dt}$

الاستطاعة الكلية المستهلكة في الوشيعة : $P = u.i = r.i^2 + L.i\frac{di}{dt} = p_j + p_m$

- $P_j = r.i^2$ : تمثل الاستطاعة المبذرة حراريا بمفعول جول في الجزء المقاوم (r) للوشيعة .
- $P_m = L.i.di/dt$ : تمثل الاستطاعة المغناطيسية المخزنة في الوشيعة .

وبملاحظة أن المقدار : $i\frac{di}{dt}$ يمثل مشتق الدالة : $\frac{1}{2}\frac{di}{dt}(i^2)$

يمكن أن نكتب ما يلي : $P_m = \frac{di}{dt}(\frac{1}{2}L.i^2)$

وبتعبير آخر : $P_m = \frac{d(\frac{1}{2}L.i^2)}{dt} = \frac{dW_m}{dt}$

نستنتج في الأخير أن : $W_m = \frac{1}{2}L.i^2$

### نتيجة :

الوشيعة تخزن طاقة على شكل مغناطيسي خلال إقامة التيار (*établissement du courant 0 → i*) ثم ترجعها على شكل عمل عند انعدام التيار ($i \rightarrow 0$)

$$W_m = \frac{1}{2} L.i^2$$