

Mesures électriques

- Andrey Elenkov

PhD, dipl. ingénieur

Professeur deuxième classe

bureau 2448

email: aelenkov@tu-sofia.bg

Université Technique - Sofia

Mesures électriques - ce que vous intéresse

- ***Courses***

- ***Travaux pratiques (TP)***

- ***Contrôle continu.***

Evaluation primaire sur base 20 : faible 0-6,75 ; insuffisant 7-9,5 ; passable 10-11 ; bien 12-14 ; très bien 15-17 ; excellent 18-20

Activités contrôlées – travaux pratiques (P) ; devoirs surveillés (S) ; examen de contrôle écrit(E).

On forme la moyenne d'après la formule : $M = (2P + 4S + 14E) / 20$

Avec une moyenne de 7 à 9,5 l'étudiant a le droit d'améliorer sa note au cours d'un travail individuel pour atteindre minimum 10. Avec une moyenne de 9,75, 11,25, 14,25 et 17,25 l'étudiant a le droit d'une soutenance orale pour atteindre la note suivante.

Mesures électriques - ce que vous intéresse

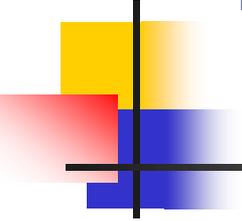
■ *Sources*

- **Ivanov I., Elenkov A., Mesures électriques – travaux pratiques, fascicule pour les étudiants français, Université Techniques – Sofia, 2004**
- **Elenkov A., Présentations des cours en pdf., actualisées chaque année**
- **Leconte A., Mesures en électrotechnique, Techniques de l'ingénieur, Paris, 1995**
- **Neuilly M., Erreurs de mesure, Techniques de l'ingénieur, Paris, 1994**
- **Peyrucat J., Instrumentation & automatisation industrielle, Dunod, 1993.**
- - Н.Гуров, Д.Държанова, А.Еленков, И.Калчев, П.Цветков, Ръководство за лабораторни упражнения по електрически измервания, Част I, ТУ-София, 2006;
- - Н.Гуров, С.Дичев, А.Еленков, И.Коджабашев, П.Цветков, Ръководство за лабораторни упражнения по електрически измервания, Част II, ТУ-София, 2006;
- - Електрически измервания – под общата редакция на проф. Матраков, София, 1999;

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

■ Généralités

- **Mesurer une grandeur c'est la comparer avec une autre grandeur de même espèce prise comme unité. Les mesures électriques comparer aux autres mesures dans la pratiques sont plus sûres et plus précises.** Pour cette raison les mesures électriques sont les plus répandues pour mesurer de nombreuses grandeurs physiques, mécaniques, thermiques, lumineuses etc. Ces grandeurs sont préalablement converties an grandeur électriques qui leur sont proportionnelles. L'utilisation des mesure électriques donne la possibilité de résoudre des problèmes de grand importance: de transmettre des résultats de mesures à grand distance (télémessures); d'effectuer des opération mathématiques sur les grandeurs à mesurer; d'effectuer action directe des dispositifs de mesures sur les machines et les appareils régulation automatique.



1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- Définitions

- ***Grandeur physique à mesurer***: c'est un attribue d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.
- ***Unités de mesure***: se sont des grandeurs physiques déterminées, adaptées par convention et utilisées pour exprimer qualitativement les grandeurs physiques de même dimension.

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- Définitions

- ***Le système international (SI)***

Il est composé de deux types de grandeurs:

- **Grandeurs de base:**

1. Longueur – mètre – m;
2. Masse – kilogramme – kg;
3. Temps – second – s
4. Intensité du courant électrique – ampère – A;
5. Température thermodynamique – kelvin – K;
6. Intensité lumineuse – candela – cd;
7. Quantité de matière – mole – mol.

Toutes les autre grandeurs peuvent être exprimées par les grandeurs de base.

- **Grandeurs supplémentaires:**

1. Angle plat – radian – rad;
2. Angle solide – stéradian –sr;

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- Définitions

Grandeurs dérivées:

travail, force, tension;
puissance, fréquence;
réactance; capacité;
inductance.

Les multiples sont propres aux grandeurs dérivées soit très petites, soit très grandes .

- Les multiples

10^0

10^3 – kilo - k

10^6 – méga - M

10^9 – giga - G

10^{12} – terra - T

- Les sous multiples

10^{-3} – milli - m

10^{-6} – micro - μ

10^{-9} – nano - n

10^{-12} – pico - p

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

■ Moyens de mesures

■ *Moyens élémentaires*

- **Étalons de mesure** – ce sont des modèles qui définissent ou reproduisent les unités de mesure;

- **Comparateurs** – ils possèdent toujours deux entrées et une sortie. Le résultat à la sortie dépend du niveau des grandeurs aux entrées. Les grandeurs de l'entrée doivent être de même espèce;

si $x_1 > x_2$, $y=1$

si $x_1 < x_2$, $y=0$

Pour les comparateurs analogiques qui sont soustracteurs: $y=x_1-x_2$

- **Convertisseurs** – ils sont présentés par la fonction de transfert $f(x)$. Dans 90% ils sont linéaires, alors: $y=kx$, k – coefficient de conversion.

Sensibilité – $S = \frac{dy}{dx}$

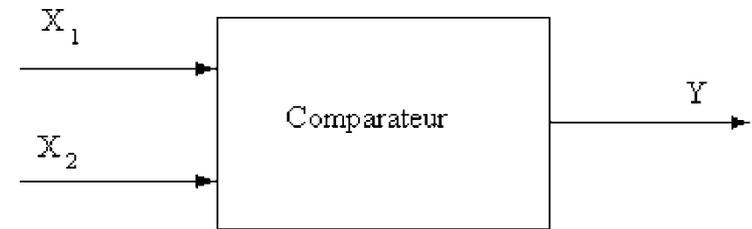


fig. 1.1

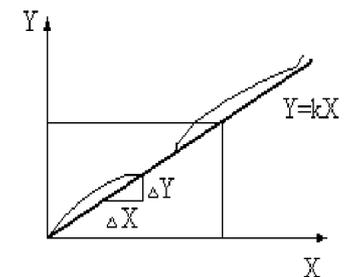
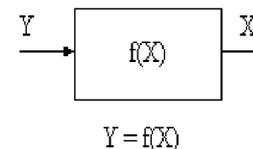


fig. 1.2

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

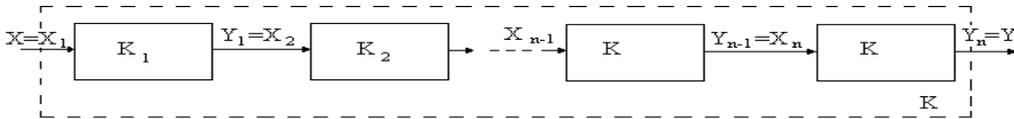


fig.1.3

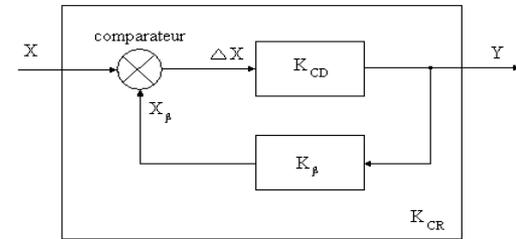


fig.1.4

■ Moyens de mesures

- **Moyens complexes** – ce sont les appareils de mesure. On peut les diviser en 2 types selon l'ensemble de convertisseurs de mesure utilisé pour construire l'appareil:

- - ensemble en série

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{Y_1}{X} \frac{Y_2}{Y_1} \dots \frac{Y_{n-1}}{Y_{n-2}} \frac{Y}{Y_{n-1}} = K_1 K_2 \dots K_{n-1} K_n = \prod_{i=1}^n K_i$$

- - ensemble bouclé (convertisseur à boucle fermée)

$$K_{CR} = \frac{Y}{X}$$

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

$$K_{CR} = \frac{Y}{X}$$

- K_{CD} – chaîne directe – On peut avoir plusieurs convertisseurs branchés en série
- K_{CR} – contre-réaction

$$\Delta X = X - X_{\beta}$$

$$Y = K_{CD} \cdot X$$

$$Y = K_{CD} \Delta X = K_{CD} (X - X_{\beta}) = K_{CD} (X - K_{\beta} Y)$$

$$Y(1 + K_{\beta} K_{CD}) = K_{CD} X$$

$$K_{CR} = \frac{K_{CD}}{1 + K_{\beta} K_{CD}} \approx \frac{1}{K_{\beta}}$$

- Dans la contre-réaction on branche toujours un convertisseur de coefficient $K_{\beta} < 1$. Dans la plupart des cas il est présenté deux singles résistances.

$$X_{\beta} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot Y$$

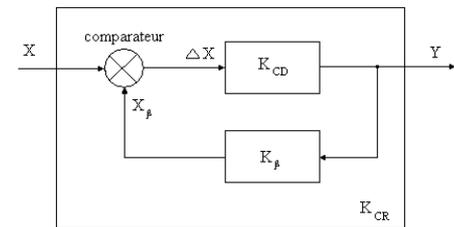
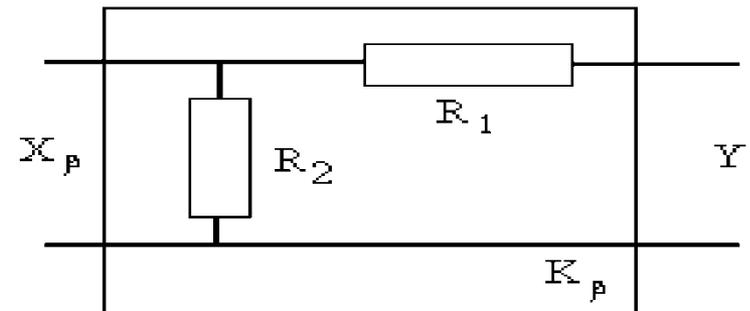


fig.1.4



1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- Caractéristiques des appareils de mesure

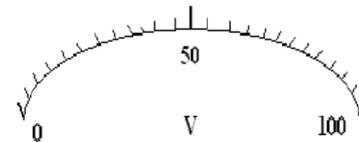
- **Constante C** – c'est le nombre par lequel il faut multiplier le résultat mesuré pour obtenir la valeur à mesurer dans les unités correspondantes

$$X = C \cdot Y; Y = SX = KX$$

$$C = 1/S$$

- **Étendue de mesure** – c'est l'intervalle de mesure entre les grandeurs min et max
- **Calibre de mesure** – la valeur maximale à mesurer par un appareil
- **Classe de précision** – indice qui rend compte de la manière de construction à la fabrication de l'appareil

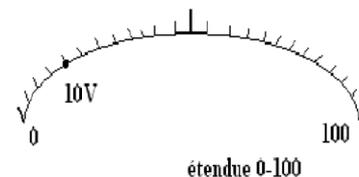
ex. fig 1.6 Pour un appareil multicalibre chaque calibre est caractérisé par une constante différente.



ex. a) 100V $C_1 = \frac{100V}{100\text{div}} = 1V/\text{div}$

ex. b) 200V $C_2 = \frac{200V}{100\text{div}} = 2V/\text{div}$

ex. fig 1.7 Certains appareils mesurent d'un point défini. Avant ce point la précision n'est pas grande.



1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- **Méthodes de mesure – les méthodes les plus importantes**
 - **Méthode de déviation (direct)** – cette méthode utilise le branchement en série. A la base de cette méthode on construit des appareils à lecture directe

$$\alpha = K_{NE-E} K_{E-E} K_{E-M} \cdot X_{NE}$$

$$\alpha = K_D X_{NE} \rightarrow X_{NE} = \frac{1}{K_D} \alpha$$

$$\alpha = \prod_{i=1}^n k_i X_{N-E} \rightarrow X_{N-E} = \frac{1}{\prod_{i=1}^n k_i} \alpha$$

K_{N-E} – non - électrique; K_{E-E} – électrique – électrique; K_{E-M} – électrique – mécanique
 K_D – coefficient de méthode de déviation (direct)

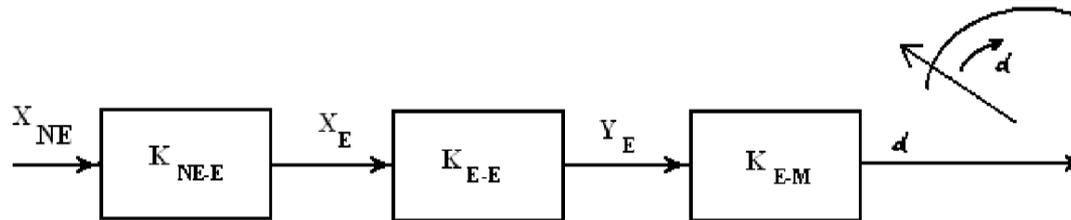


Fig. 1.7

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- **Méthodes de mesure – les méthodes les plus importantes**
 - **Méthode d'opposition (de zero)** – La commande est dans le sens d'augmentation ou de diminution de X_c pour diminuer la différence ΔX . Au moment de zéro pas de commande et X_c reste constante.

$$\Delta X = 0 \quad X_E = X_C = K_{NE-E} \cdot X_{NE} \quad X_{NE} = \frac{1}{K_{NE-E}} X_C$$

- une excellente précision par rapport à la méthode précédente car on compare directement.

X_c – grandeur de compensation; DZ – détecteur de zéro; C_c – convertisseur de compensation;
 G_{aux} – grandeur auxiliaire (dans la plupart du cas c'est une tension)

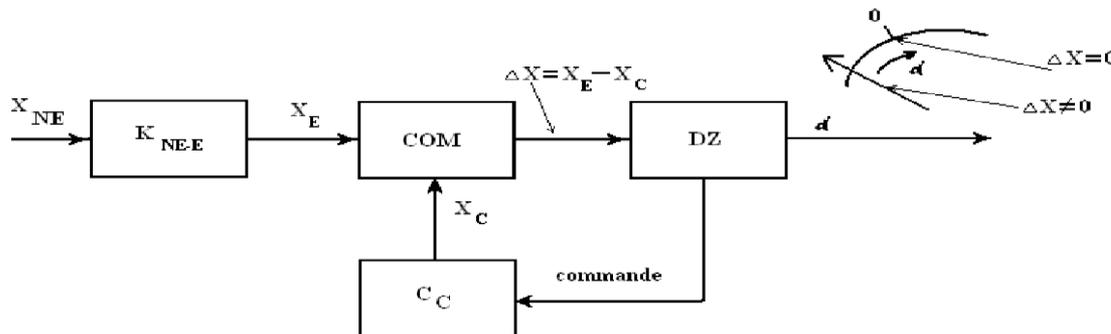


Fig. 1.8

1. Généralités. Définitions. Système SI. Moyens de mesures. Méthodes de mesures.

- **Méthodes de mesure – les méthodes les plus importantes**
 - **Méthode de résonance** – selon cette méthode la grandeur à mesurer est fonction de certaines grandeurs comme au moment où la grandeur auxiliaire obtient sa valeur maximale selon le type de résonance qui garantit l'état de résonance dans le circuit correspondant.

f_r – fréquence de résonance

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{RC}}$$

L'état de mesure c'est l'état de résonance

CR – circuit de résonance – c'est un circuit passif; X_E grandeur électrique (tension ou courant);

$D_{\max/\min}$ – détecteur de la grandeur selon le cas (max ou min); C_R – convertisseur de résonance qui influe sur une des trois grandeurs; R – résistance; f – fréquence; C – capacité;

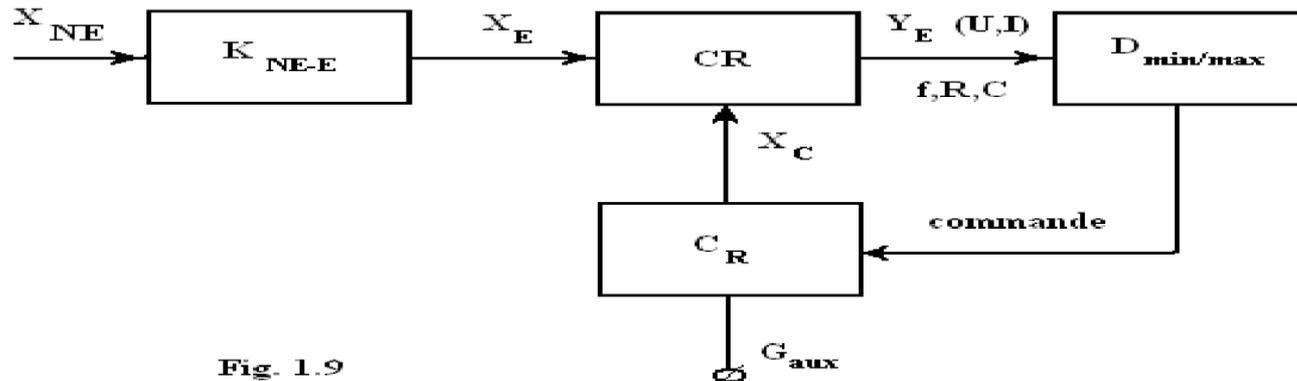
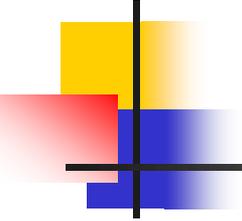


Fig. 1.9



2. Erreurs de mesure

■ Classification

Le résultat d'une mesure est toujours affecté de plusieurs erreurs plus ou moins importantes. C'est pourquoi il faut pouvoir réduire et même éliminer l'influence de ces erreurs et évaluer la précision atteinte. Il y a plusieurs classifications des erreurs:

■ Selon la dimension des erreurs

- **erreur absolue** Δ – définie comme différence entre la valeur mesurée et la valeur réelle de la grandeur à mesurer. Elle est toujours exprimée en unités de la grandeur à mesurer. Elle peut être positive ou négative selon le sens de la différence

$$\Delta = X_{mes} - X_{réel}$$

- **erreur relative** δ – elle est égale au rapport de l'erreur absolue et la valeur réelle de la grandeur à mesurer. Elle est sans dimension. Elle peut aussi prendre des valeurs positives ou négatives

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{réel}} \approx \frac{\Delta}{X_{mes}} \quad \delta, \% = \frac{\Delta}{X_{mes}} \cdot 100\%$$

- **erreur relative réduite** γ – elle est égale au rapport de l'erreur absolue et la valeur du calibre, la valeur maximale à mesurer. C'est l'expression numérique de la classe de précision de l'appareil. Elle est toujours positive.

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{cal}}$$



2. Erreurs de mesure

- **Classification**

- **Selon l'origine des erreurs**

- ***erreurs systématiques*** – elle sont produites par des causes singes et ces erreurs possèdent une valeur et un sens bien définis
- ***erreurs accidentelles*** – elle sont provoquées par un ensemble de causes qui peuvent varier dans le temps et qui sont tellement complexes que l'erreur et le résultat de l'influence de ces causes varient en sens et en valeur. Voila pourquoi on donne des limites:

$$\pm \delta_{\max} = \pm 0.5\%$$

2. Erreurs de mesure

■ Classification

■ Selon la valeur des causes des erreurs

- **Erreur de base** - Elles sont définies si les valeurs de ses causes sont dans une limite strictement définie

- Ex. $t^{\circ} = (0 \div 40)^{\circ} C;$

- **Erreurs supplémentaires** – le constructeur définit l'erreur supplémentaire chaque dépannage

■ Classification basée sur l'élément de processus de mesure qui provoque l'erreur

- **Erreur de méthode** – erreur provoquée par la consommation propre des appareils. Elle change le fonctionnement du circuit

$$\delta_{m\acute{e}th} = \frac{X_{mes} - X_{r\acute{e}el}}{X_{r\acute{e}el}} \cdot 100, \%$$

- **Erreur instrumentale** – produit par les appareils de mesure

$$\delta_{instr} = \frac{X_{mes} - X_{r\acute{e}el}}{X_{r\acute{e}el}} \approx \frac{\Delta_{instr}}{X_{mes}} = \frac{\Delta_{instr} \cdot X_{cal}}{X_{cal} \cdot X_{mes}} = \frac{class \cdot X_{cal}}{X_{mes}} \quad class = \frac{\Delta_{instr}}{X_{cal}} \cdot 100, \%$$

- **Erreur de lecture** – c'est une erreur absolue qui ne dépasse pas un quart de division – n nombre des divisions

$$\delta_{lect} = \frac{X_{mes} - X_{r\acute{e}el}}{X_{r\acute{e}el}} \approx \frac{\Delta_{lect}}{X_{mes}} = \frac{0,25C}{C \cdot n} = \frac{1}{4n} = \frac{100}{4n}, \%$$

2. Erreurs de mesure

- Calcul des erreurs

$$R = \frac{U}{I} = f(U, I) \quad x = f(u_1, u_2, \dots, u_n)$$

$$\Delta_x = f(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2, \dots, u_n + \Delta u_n) \quad \Delta_x = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial u_i} \cdot \Delta u_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial u_i} \cdot \frac{u_i}{x} \Delta u_i$$

$$\frac{\Delta_x}{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial u_i} \cdot \frac{u_i}{x} \frac{\Delta u_i}{u_i} \quad \text{- règle de la différentielle - logarithmique}$$

$$\delta_x = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial u_i} \cdot \frac{u_i}{x} \right| \delta_{u_i} \quad \frac{d(\ln x)}{dx} = \frac{dx}{x} = \frac{\Delta_x}{x}$$

Δ_x – l'erreur sur la valeur mesurée; Δu_i – l'erreur sur la valeur de la grandeur qui définit x

- **Étapes:**

- Calculer la différentielle – logarithmique de x ;
- Faire évaluer les différentielles logarithmiques de chaque grandeur de l'ensemble
- Prendre le module de chaque terme
- Faire introduire les erreurs relatives

3. Appareils électromécaniques

- Généralité – ces appareils s'appellent aussi appareils à lecture directe et leur construction et fabrication est basée à la méthode de déviation.

Le 2^e convertisseur convertit une grandeur électrique en une grandeur mécanique. On a une déviation d'un angle α . Il est composé d'une partie fixe et d'une partie mobile. Sur la partie mobile il y a au moins 2 couples qui force une action.

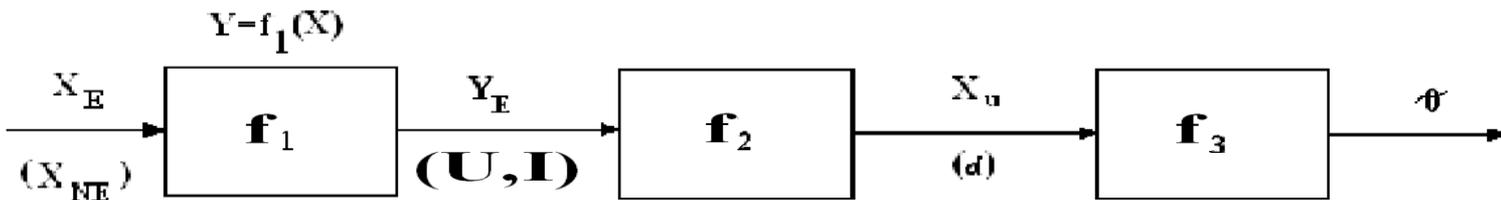


fig. 3.1

3. Appareils électromécaniques

■ M_M – **moment de couple moteur**

$$M_M = Y^n f_n(\alpha)$$

$n=1,2,\dots$

■ Partie mobile – équipage mobile

■ M_R – **coule de rappel ou d'amortissement** $M_R = W_a$

■ Ce moment dépend linéairement de la déviation de l'équipage mobile et du coefficient de torsion des ressorts spiraux

■ Le couple de rappel s'oppose tandis que le couple de rappel peut augmenter la déviation

$$\begin{cases} M_M = Y^n f_n(\alpha) \\ M_R = w_\alpha \end{cases}$$

$$M_M + M_R = 0$$

$$M_M = |M_R|$$

■ C'est le moment ou les deux moments sont égaux et l'aiguille se pose d'un façon stable. C'est **le moment de régime**.

■ Avec l'augmentation de α le moment de couple moteur diminue. Le moment du couple de rappel augment.

■ ΔM – **moment d'établissement -**

$$\Delta M = M_M - |M_R| < 0$$

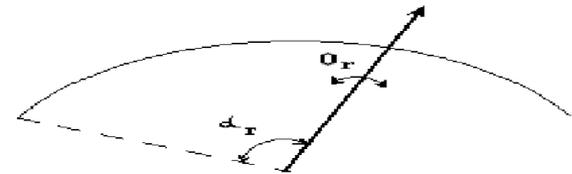
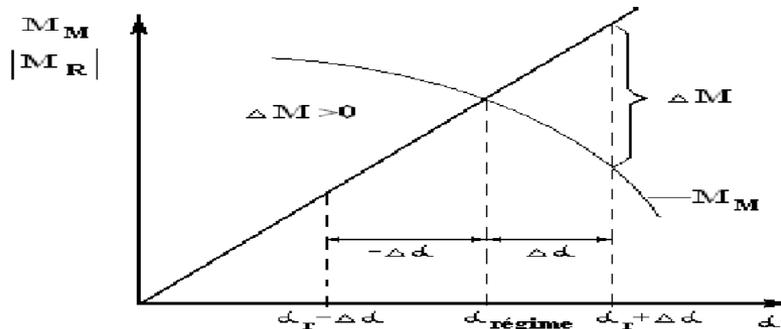


Fig.3.2

3. Appareils électromécaniques

- Comme résultat si $\Delta M > 0$, il y a un déplacement dans le sens plus +.
- La présence de ΔM définit la stabilité de l'appareil de mesure.

$$M_M = \left(\frac{\partial W_{EM}}{\partial \alpha} \right)_{Y=const}$$

- C'est la vitesse de changement de L'énergie électromagnétique de l'ensemble en fonction de la déviation α , à condition que la grandeur à l'entrée Y reste constante.

$$W_{EM} = \frac{1}{2} LI^2 + \frac{1}{2} CU^2 + MI_1 I_2 + \psi I$$

- M – coefficient de l'inductance mutuelle; ψ – le flux magnétique total d'un aimant total permanent; I – le courant qui circule dans une bobine qui circule (est) dans le champ de l'aimant. Des 4 énergies n'existent jamais ensemble. Selon le cas concret on a des différents types d'appareils électromécaniques:

- - *appareils électromagnétiques (ferromagnétiques);*
- - *appareils électrostatiques;*
- - *appareils électrodynamiques;*
- - *appareils magnétoélectriques;*

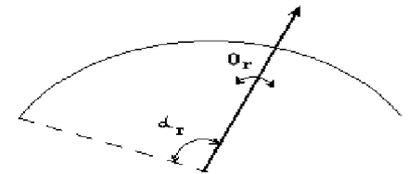
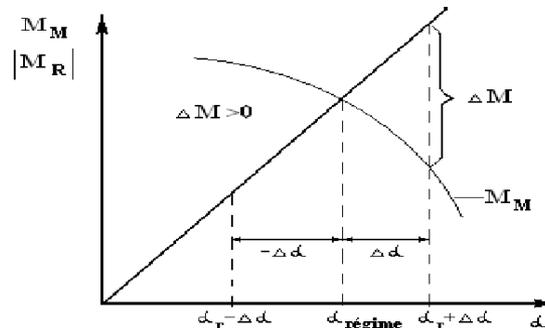


Fig.3.2

3. Appareils électromécaniques

■ 3.1 Appareils magnétoélectriques

- Le fonctionnement des appareils magnétoélectriques est basé sur l'action exercée par un aimant permanent fixe sur un cadre mobile traversé par un courant électrique. Le déplacement du cadre mobile est toujours dans le sens d'augmentation de l'énergie électromagnétique du système (partie fixe + partie mobile).

Fig. 3.3:

- 1 – aimant permanent
- 2 – pièces polaires
- 3 – noyau d'acier doux
- 4 – cadre mobile
- 5 – aiguille de l'appareil

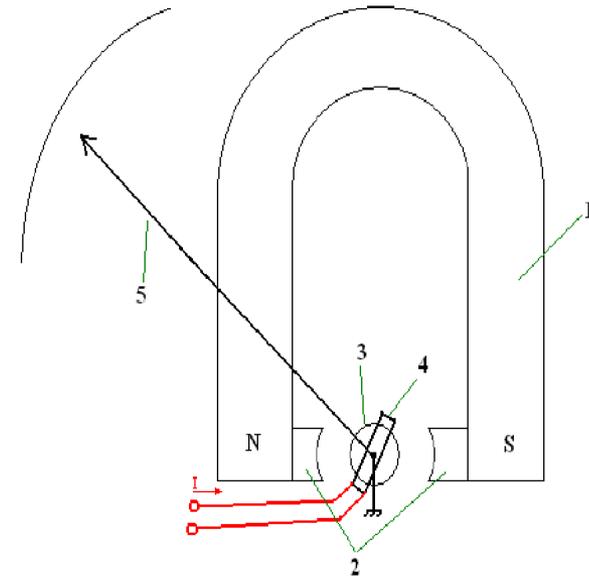


Fig.3.3

3. Appareils électromécaniques

■ 3.1 Appareils magnétoélectriques

$$M_M = |M_R| \rightarrow \alpha_r \qquad M_M = B.n.S.I$$

n – nombre d'enroulement de la bobine
 S – surface de la bobine

$$M_R = w.\alpha \qquad \alpha_r = \frac{B.n.S}{w} I = S_I I$$

S_I – sensibilité par rapport au courant

Propriétés des appareils magnétoélectriques :

1. On ne peut les utiliser qu'en courant continu
2. Ce sont des appareils polarisés. Donc il faut toujours tenir compte du sens du courant
3. La graduation des appareils magnétoélectriques est linéaire
4. Le champ magnétique de l'aimant permanent est très fort. Alors S est grand et ces appareils sont très sensibles. On peut mesurer des valeurs très petits
5. La précision de ces appareils est imperdable en courant continu. Si le champ magnétique est très fort, alors l'influence externe est très faible d'où l'erreur est très petite.
6. Inconvénients: Très chers . Ne peuvent pas travailler dans un régime de surcharge

3. Appareils électromécaniques

3.1 Appareils magnétoélectriques

3.1.1 Applications

Ampèremètres

$$I = C_A \mathcal{G}$$

Pour la mesure de courant de petit valeur on peut brancher directement un tel appareil dans le circuit de mesure.

On ne peut pas mesurer un courant qui dépasse quelques **mA**, car il traverse la bobine dont le diamètre est de $\Phi = 0,1\text{mm}$. Si le courant dépasse cette valeur la bobine sera grillée et endommagée. Pour l'élargissement du calibre d'un ampèremètre magnétoélectrique on utilise un shunt. L'appareil primitif est caractérisé par sa résistance interne R_A est son calibre primitif I_A . Pour élargir le calibre, il faut connaître le nouveau calibre – le courant mesuré après le changement de calibre. Pour cette raison il faut connaître R_{sh} de façon que le calibre primitif reste le même, sans surcharge, mais de façon que le courant mesuré au total correspond au nouveau calibre.

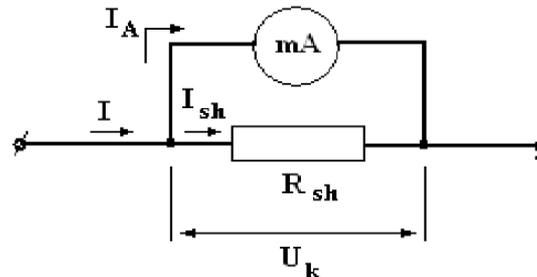
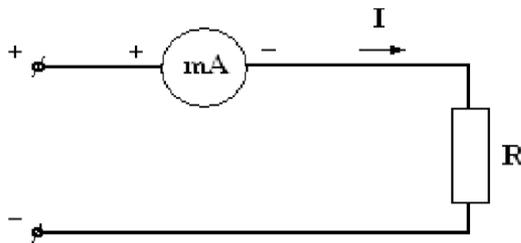
$$I(R_A \parallel R_{sh}) = I_A \cdot R_A \quad I \cdot \frac{R_A \cdot R_{sh}}{R_A + R_{sh}} = I_A \cdot R_A \quad I \cdot R_{sh} = I_A R_A + I_A R_{sh} \quad R_{sh} = \frac{I_A \cdot R_A}{I - I_A} = \frac{R_A}{\frac{I}{I_A} - 1} = \frac{R_A}{m_I - 1}$$

m_I – pouvoir multiplicateur de shunt

Ex.: Élargir le calibre 2 fois:

$$I = 2I_A$$

$$R_{sh} = \frac{R_A}{\frac{2I_A}{I_A} - 1} = R_A$$



3. Appareils électromécaniques

3.1 Appareils magnétoélectriques

- 3.1.1 Applications
- Voltmètres**

$$\alpha_C = S_I I = S_I \cdot \frac{1}{R_V} \cdot R_V \cdot I = \frac{S_I}{R_V} \cdot I \cdot R_V = S_U U$$

C'est le même appareil branché en parallèle et gradué en **mV** car la sensibilité est différente. Sa valeur limite de mesure est de **1V**. Si la tension augmente, alors le courant augmente aussi et l'appareil sera endommagé.

Élargissement du calibre – on utilise le dispositif appelé résistance additionnelle. On branche cette résistance en série avec l'appareil. Il faut donc déterminer cette résistance additive:

$$I_V = \frac{U}{R_V + R_{add}} = \frac{U_V}{R_V} \quad R_{add} = R \left(\frac{U}{U_V} - 1 \right) = R_V (m_V - 1)$$

m_V – pouvoir multiplicateur de la résistance additionnelle. La résistance additionnelle est toujours plus grande que la résistance du voltmètre.

Ex. Élargir 10 fois; $U = 10V$.

$$R_{add} = R_V \left(\frac{10U_V}{U_V} - 1 \right) = 9 \cdot R_V$$

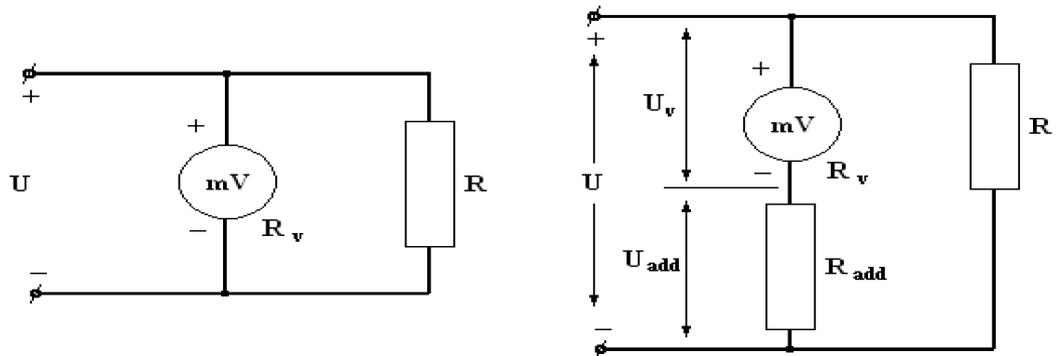


Fig.3.5

3. Appareils électromécaniques

- **3.1 Appareils magnétoélectriques**

- **3.1.1 Applications**

- **Appareils magnétoélectrique à convertisseur**

A la base de ces redresseurs se trouve l'élément électronique diode.

Si on augmente la tension il y a un claquage – endommagement de l'appareil.

Pour un courant alternatif on définit la valeur moyen de la manière suivante :

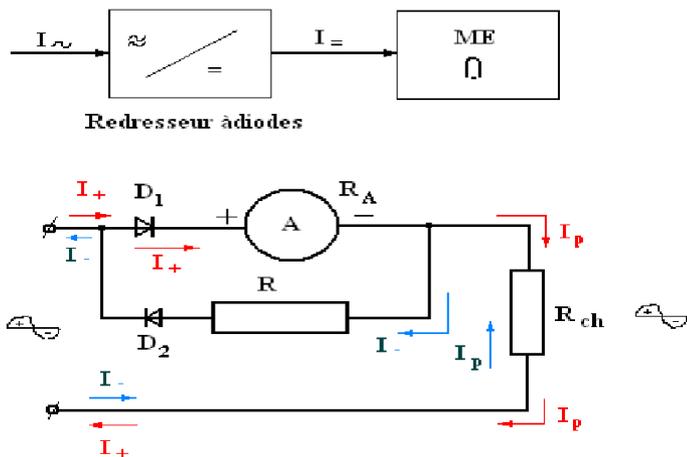
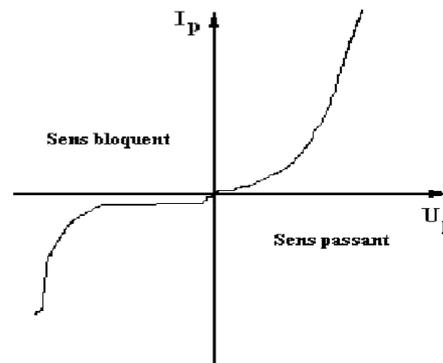


Fig.3.6



$$I_{moy} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt$$

$$I_A = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{I_{moy}}{2}$$

$$\alpha_C = S_I \frac{I_{moy}}{2}$$

3. Appareils électromécaniques

- **3.1 Appareils magnétoélectriques**

- **3.1.1 Applications**

- **Appareils magnétoélectrique à convertisseur**

Quand on mesure une valeur alternative, on ne s'intéresse pas à la valeur moyen mais à la valeur efficace

$$I_{eff} = k_f \cdot I_{moy} = 1,11 \cdot I_{moy} \qquad \alpha_C = S_I \cdot I_{moy} = S_I \cdot \frac{I_{eff}}{2,22}$$

k_f – **coefficient de la forme**, à condition que le courant soit sinusoïdal

En utilisant un appareil magnétoélectrique à convertisseur à diodes on peut directement mesurer la valeur efficace du courant, la graduation est en valeur efficace.

Inconvénients:

La sensibilité est médiocre, car on n'utilise que la moitié de la sinusoïde.

Alors – appareils magnétoélectriques à double alternance

3. Appareils électromécaniques

3.1 Appareils magnétoélectriques

- 3.1.1 Applications
- Appareils magnétoélectrique à convertisseur – appareils magnétoélectriques à double alternance – Pont de Greutz

$$\alpha_C = S_I \cdot I_{moy} = S_I \cdot \frac{I_{eff}}{1,11}$$

Conclusion:

Ces appareils donnent la possibilité de mesurer des courant et des tensions alternatifs.

Leurs inconvénients sont: la dépendance de la température (variation de la résistance, d'où variation de la mesure); petite précision – class 1-1,5

Ils sont souvent utiliser pour la mesure de signaux alternatifs de faible valeur. Leur graduation est linéaire sauf au début de l'appareil.

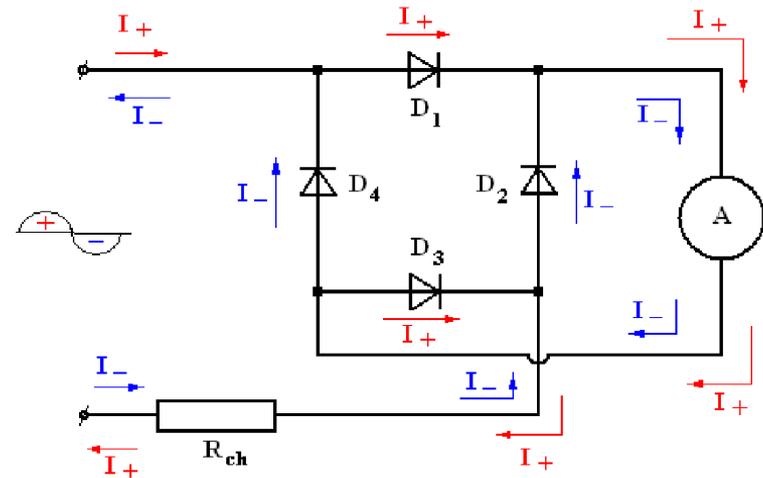


Fig.3.7

3. Appareils électromécaniques

3.2. Appareils ferromagnétiques

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des appareils ferromagnétiques résulte de l'action exercée par un courant électrique qui traverse une bobine fixe sur une pièce ferromagnétique mobile qui se déplace dans le sens d'augmentation de l'inductance de la bobine.

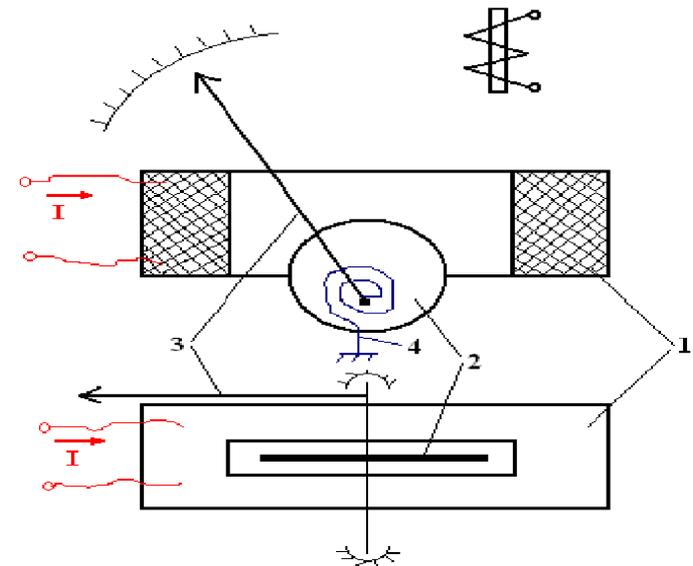


Fig.3.8

Fig.3.8.

1. Bobine fixe
2. Pièce ferromagnétique mobile
3. Aiguille
4. Ressorts spiraux

$$M_M = \left(\frac{\partial W_{EM}}{\partial \alpha} \right)_{Y=const} \quad W_{EM} = \frac{1}{2} L i^2, Y = i \quad M_M = \frac{1}{2} \left(\frac{dL}{d\alpha} \right) i^2$$

$$M_R = w \cdot \alpha$$

$$\alpha_C \rightarrow |M_R| = M_M$$

$$\alpha_C = \frac{1}{2w} \left(\frac{dL}{d\alpha} \right) i^2 = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} i^2$$

3. Appareils électromécaniques

3.2. Appareils ferromagnétiques

■ Caractéristiques

1. Ces appareils sont utilisés en continue et en alternatif. En alternatif la valeur mesurée c'est la valeur efficace.

-en continue on remplace i par I - $\alpha_C = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} I^2$

-en alternatif – $\alpha_C = \alpha_{C_{moy}} = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} \frac{1}{T} \int_0^T i dt$ $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$ $\alpha_C = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} \cdot I_{eff}^2$

2. Ces appareils ne sont pas polarisés. On peut les branchés sans tenir compte du sens du courant.

3. Linéarité des appareils

$$\alpha_C = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} \cdot I_{eff}^2 = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} \cdot I_{eff} \cdot I_{eff} \Rightarrow S_I = \frac{f_\alpha(\alpha)}{2w} \cdot I_{eff}$$

– c'est une façon de transformer la graduation quadratique en linéaire. C'est presque possible sauf au début de l'échelle. Comme résultat l'échelle est linéaire sauf au début.

4. Ces appareils sont robustes, ils sont utilisés souvent dans l'industrie. C'est grâce à l'absence de bobines.

Inconvénients:

Influence des champs magnétiques extrême est relativement grande. La protection est faite par un boîtier métallique.

Ces appareils ont le même schéma que les appareils magnétoélectriques. Pour l'élargissement du voltmètre – identique, mais pas de shunt pour l'ampèremètre. On utilise la méthode de fractionnement de la bobine.

3. Appareils électromécaniques

■ 3.3. Appareils électrostatiques

■ Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des appareils électrostatiques est basé sur l'attraction de deux système de plaques portés à des tensions diverses

Fig.3.9

1. **Plaque fixe**
2. **Plaque mobile**
3. **Aiguille**

$$\alpha_C \rightarrow M_M, M_R \quad M_M = \left(\frac{\partial W_{EM}}{\partial \alpha} \right)_{Y=const} \quad W_{EM} = \frac{1}{2} C \cdot u^2, \dots Y = u$$

$$M_M = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha} \right) u^2 \quad \alpha_C = \frac{1}{2w} \frac{dC}{d\alpha} \cdot u^2$$

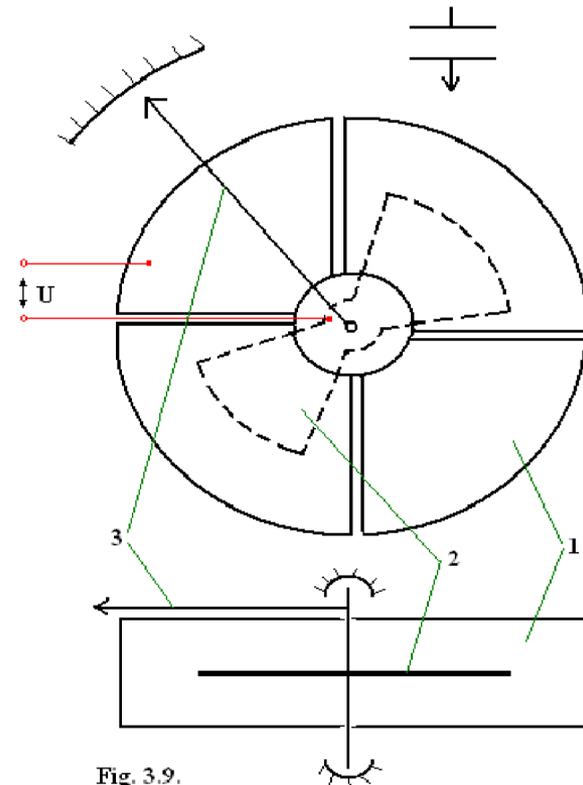


Fig. 3.9.

3. Appareils électromécaniques

3.3. Appareils électrostatiques caractéristiques

1. Ils peuvent être utilisés en continue et en alternatif

- en continu

$$\alpha_c = \frac{1}{2w} \frac{dC}{d\alpha} U^2 = \frac{f_c(\alpha)}{2w} U^2$$

- en alternatif

$$\alpha_c = \frac{1}{2w} \frac{dC}{d\alpha} U_{\text{eff}}^2 = \frac{f_c(\alpha)}{2w} U_{\text{eff}}^2$$

2. Impédance d'entrée Z_e est extrêmement élevée car ces appareils représentent un condensateur et elle représente la résistance de l'air. Elle dépasse au minimum $100\text{M}\Omega$. Si l'humidité est élevée elle diminue.
3. Ce sont des appareils qui travaillent en très haute fréquence car il n'y a pas des bobines qui peuvent influencer le résultat. Au-delà de 30Mhz il y a même influence des fils – $f_{sp} = 0-30\text{Mhz}$.
4. On les utilise sans problème pour la mesure de tensions $U_{aal} > 10\text{kV}$, on peut mesurer des tensions dans la ligne moyennes tensions.
5. L'influence des champs magnétiques est complètement négligeable.

Inconvénients:

1. Ils ne peuvent être utilisés qu'en voltmètres. Pour la mesure de courant il faut un circuit pour le passage du courant, le condensateur représente un circuit ouvert donc pas de passage du courant. On peut les mesurer d'une façon indirecte en connaissant $R_N - U_{\text{mes}} / R_N = I_x$
2. Très faible sensibilité. Pour l'augmenter on utilise 2 groupes de plaques – 8 plaques et la sensibilité augmente 8 fois, mais cette façon l'augmentation est très limitée. La calibre minimal $U_{\text{calmin}} = 10\text{V}$

3. Appareils électromécaniques

3.4. Appareils électrodynamiques

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de ces appareils résulte de l'action exercée par un courant électrique sur un autre courant électrique. C'est l'action électrodynamique dirigée toujours dans le sens d'augmentation de l'inductance mutuelle de deux bobines. Les deux courants en cause traversent presque toujours deux bobines – l'un est fixe, l'autre est mobile.

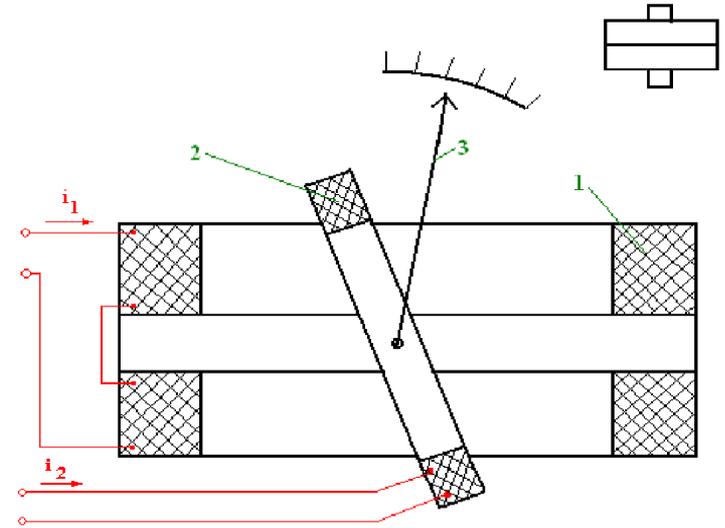


Fig 3.10

Fig. 3.10

1-bobine fixe

2-bobine mobile

3-aiguille

M- coefficient de l'inductance mutuelle

$$\alpha_C \rightarrow M_M = |M_R|$$

$$W_{EM} = M i_1 i_2$$

$$M_M = \left(\frac{\partial W_{EM}}{\partial \alpha} \right)_{Y=const}$$

$$Y \rightarrow i_1, i_2$$

$$M_M = \frac{\partial M}{\partial \alpha} i_1 i_2 = f_M(\alpha) i_1 i_2$$

$$\alpha_C = \frac{f_M(\alpha)}{w} i_1 i_2$$

3. Appareils électromécaniques

3.4. Appareils électrodynamiques

Caractéristiques

En continue

L'appareil est polarisé. La graduation doit être quadratique, mais on peut faire varier de façon qu'on ait une coté 80% de la graduation est purement linéaire. Au début elle ne l'est pas.

Ampèremètre

$$i_1 = I_1; i_2 = I_2$$

$$\alpha_C = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot I_1 \cdot I_2 \quad \alpha_C = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot I^2 = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot I \cdot I = S_I I$$

Voltmètre

Wattmètre

$$\alpha_C = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot I_1 \cdot I_2 \cos \varphi \quad i_1 = i; I_1 = I \quad i_2 = \frac{u}{Z_2 + R_{add}} = \frac{u}{R_2 + j\omega L_2 + R_{add}}$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{(R_2 + R_{add})^2 + (\omega L_2)^2}}$$

$$R_2 + R_{add} \gg \omega L_2 \rightarrow \omega L_2 - \text{négligeable} - \text{par} - \text{rapport} - \text{à} - (R_2 + R_{add})^2$$

$$I_2 \approx \frac{U}{\sqrt{(R_2 + R_{add})^2}} = \frac{U}{R_2 + R_{add}}$$

$$\cos(i_1, i_2) = \cos(I, U)$$

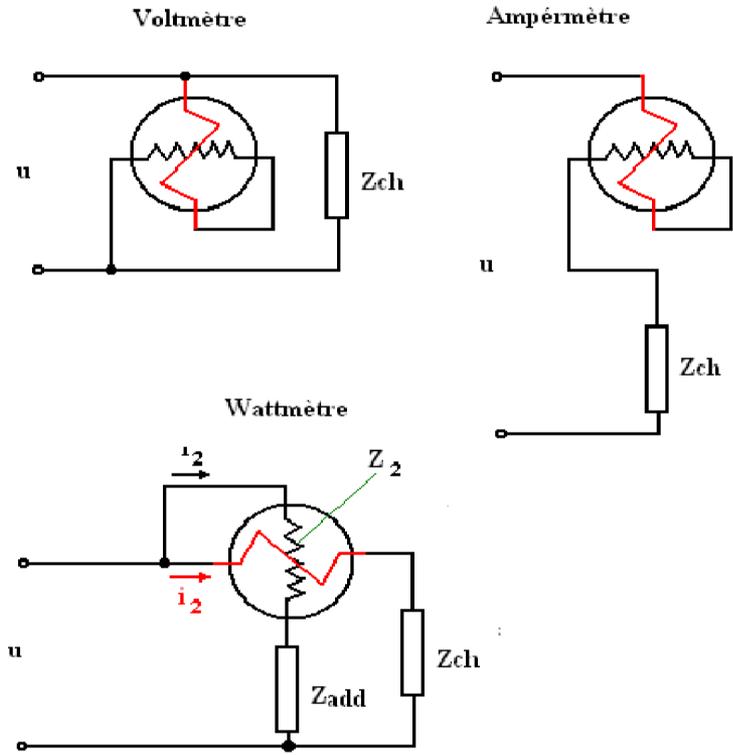
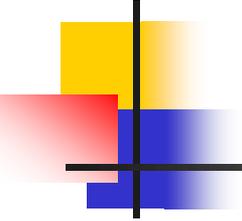


Fig. 3.12



3. Appareils électromécaniques

- **3.4. Appareils électrodynamiques**
 - **Caractéristiques**
 - **En alternatif**

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\alpha_C = \alpha_{C_{moy}} = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} \sin \omega t \cdot I_{2m} \sin(\omega t - \varphi) dt$$

$$\alpha_C = \alpha_{C_{moy}} = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot I_{1m} I_{2m} \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{\cos(\omega t - \varphi) + \cos \varphi}{2} \right] dt$$

$$\alpha_C = \alpha_{C_{moy}} = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi = \frac{f_M(\alpha)}{w} \cdot I_{1eff} \cdot I_{2eff} \cdot \cos \varphi$$

3. Appareils électromécaniques

■ 3.4. Appareils électrodynamiques

■ *Caractéristiques*

■ *Graduation*

Elle est différente selon l'utilisation

En cas de puissance la déviation est proportionnelle à la puissance consommée. **La graduation est purement linéaire:**

! I_2 proportionnel à U

! I_2 en phase avec U

$$\alpha_c = \frac{f_M(\alpha)}{w(R_2 + R_{add})} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = \frac{f_M(\alpha)}{w(R_2 + R_{add})} \cdot P$$

■ *Précision*

Ce sont les plus précis appareils en alternatif. Ils atteignent une précision de 0,1. Ils sont relativement sensibles

■ *Inconvénient*

Leur consommation propre est de l'ordre de quelques watts. On ne peut pas les utiliser dans les circuits de faible puissance.

Très chers.

Ne supportent pas de surcharge.

■ *Applications* – wattmètre, voltmètre, ampèremètre

3. Appareils électromécaniques

- **3.5. Appareils à induction**
 - **Principe de fonctionnement** – il résulte de l'action exercée d'un ou plusieurs champs magnétiques sur les courants de Foucault induits par les mêmes champs dans un disque conducteur mobile. Les champs électriques sont produits par un ou plusieurs circuits, traversés par différents courants. Selon le principe de fonctionnement ils ne fonctionnent qu'en régime alternatif.

Fig.3.12:

- 1.-contre-pôle , contre-pied;
- 2.-disque conducteur;
- 3.- bobine de tension;
- 4.-bobine de courant;
- 5.- aimant permanent.

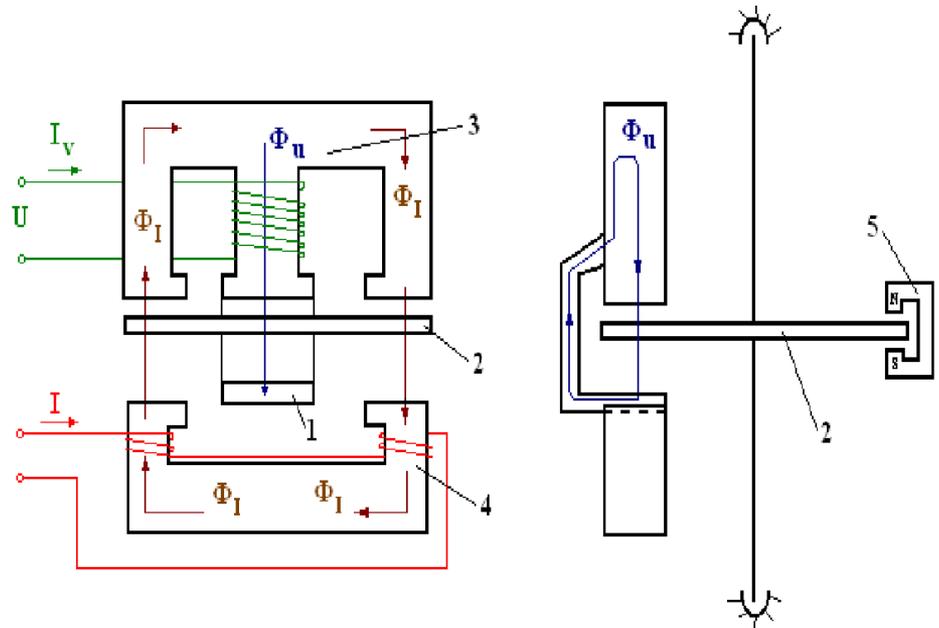


Fig.3.12

$$M_M = k_M \Phi_u \Phi_I f \sin(\angle \Phi_u, \Phi_I)$$

$$M_A = k_A \frac{d\alpha}{dt} = k_A w$$

M_M – moment du couple moteur

M_A – moment d'amortissement

3. Appareils électromécaniques

- 3.5. Appareils à induction
 - Appareil intégrateur – le nombre de tour accumule la valeur de la grandeur à mesurer. Ces appareils sont utilisés pour construire des compteurs électriques

Diagramme vectoriel

$$\Phi_I = k_I \cdot I \quad \Phi_u = k_u I_v = k_u \frac{U}{\sqrt{R_v^2 + \omega^2 L_v^2}} \quad R_v \ll \omega L_v \quad \Phi_u = k_u \frac{U}{\omega L}$$

$$(\angle \Phi_u, \Phi_I) = \psi = \beta - \alpha_I - \varphi \quad \beta - \alpha_I = \frac{\pi}{2} \quad \sin \psi = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \cos \varphi$$

$$M_M = k_M \Phi_I \Phi_u f \sin \psi = k_M k_I k_u \frac{U}{2\pi f L_v} f \cos \varphi \quad M_M = \frac{k_M k_I k_u}{2\pi L_v} I U \cos \varphi = k_P P$$

$$M_M = |M_A| \quad k_p P = k_A \frac{d\alpha}{dt} \quad k_A d\alpha = k_P P dt \quad t_1 \rightarrow \alpha = 0 \quad t_2 \rightarrow \alpha = 2\pi N, \text{ rad}$$

$$\int_0^{2\pi N} k_A d\alpha = \int_{t_1}^{t_2} k_P P dt \quad k_A 2\pi N = k_P \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad N = \frac{k_P}{k_A 2\pi} \int_{t_1}^{t_2} P dt = k_W W_E$$

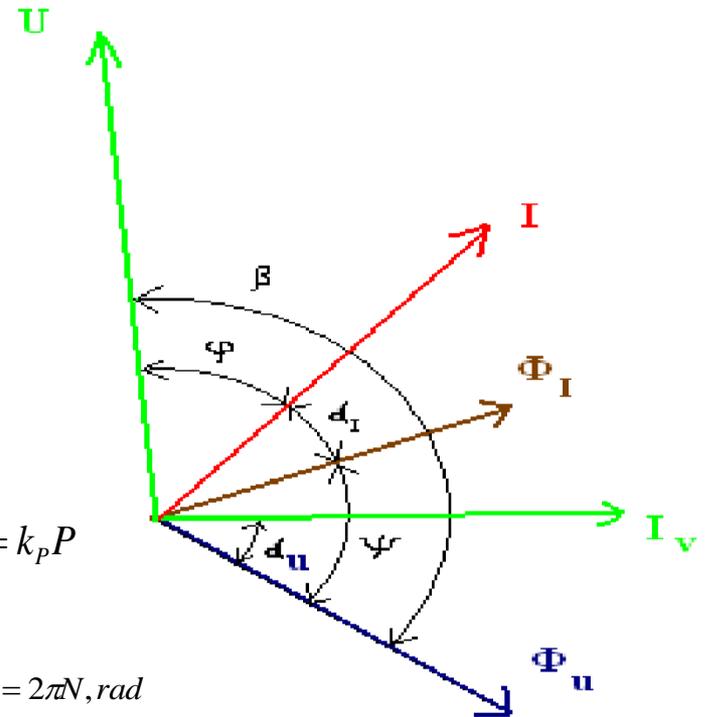


Fig.3.13

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

■ **Mesure par la méthode de la déviation**

C'est la base à laquelle on construit les appareils à lecture directe – appareils électromécaniques.

- **En continu** – ces appareils donnent la possibilité de mesurer un courant continu de l'ordre d'un microampère ($I=1\mu A$) et une tension de l'ordre $U=0,1mV$. En particulier ce sont les appareils magnétoélectriques qui possèdent cette sensibilité. On peut élargir les calibres jusqu'à 10kA et 10kV. L'élargissement se fait par une résistance de shunt pour l'ampèremètre et par une résistance additive pour le voltmètre. On peut également utiliser les autres appareils, mais leur sensibilité est médiocre. Les appareils magnétoélectriques sont utilisés pour la mesure de très petites grandeurs, on utilise des appareils construits à la base de ces appareils. Ce sont le galvanomètre et l'électromètre.
- **En alternatif** - la bande de fréquence (BF) dans laquelle on peut faire des mesures. Au début ce sont les appareils électrodynamiques et ferromagnétiques dont la BF est 1,5kHz - 5kHz. Après ce sont les appareils magnétoélectriques – 20-50 kHz. Les appareils dont la BF est la plus large ce sont les appareils électrostatiques – 30MHz.

Pour élargir le calibre des appareils en alternatif il y a 2 méthodes:

*Ampèremètre

- fractionnement de la bobine - -1,2,4;
- transformateur d'intensité (TI) du courant – de cette façon on peut élargir le calibre jusqu'à 1000 fois.

*Voltmètre

- résistance additionnelle – jusqu'à 1-2 kV
- transformateur de tension (TP - de potentiel) – au-delà de 2kV car ils séparent le circuit de celui de la charge et on évite les hautes tensions.

Précision: les appareils les plus précises sont magnétoélectriques en continu et électrodynamiques en alternatif, dont la précision peut atteindre 0,1; après ES-0,2; FM-0,5; à induction (AI)-1,0;

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

- **Mesure par la méthode d'opposition**

Elle est plus précises que la méthode précédent. La tension à mesure est opposée à travers un détecteur de zéro (DZ) d'une tension étalon et variable.

Avantages: au moment d'équilibre ($E_x = E_N$) il n'y a aucun courant qui circule dans le circuit ($I=0$), alors il n'y a aucune chute de tension dans les fils de connexion. Il n'y a aucune chute de tension dans le **DZ**. Il n'y a aucune chute de tension dans les résistances internes des sources E_x et E_N . En plus il n'y a aucune erreur de lecture, car elle est liée à la lecture des nombres de divisions et en ce moment l'équipage mobile est à zéro. S'il n'y a aucun courant dans le circuit, alors on peut dire que la résistance d'entrée de l'appareil à l'état d'équilibre est infiniment grande. Les appareils construits à la base de la méthode d'opposition sont les plus précis.

Inconvénient: il n'y a pas de f.e.m. réglable et étalon. Ce problème peut être résolu utilisant le schéma

fig. 3.14 b.

$$E_N = R_N \cdot I_N ; I_N - \text{const} ; R_N - \text{var.}$$

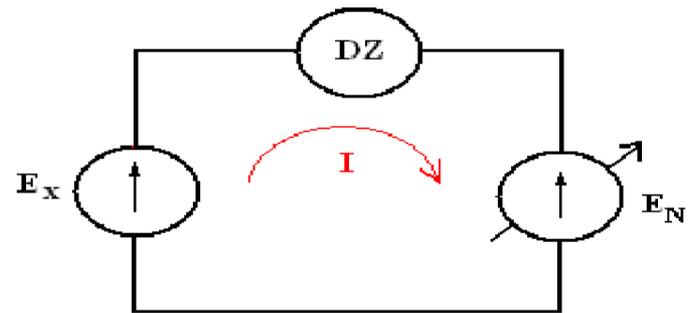


Fig.3.14 a

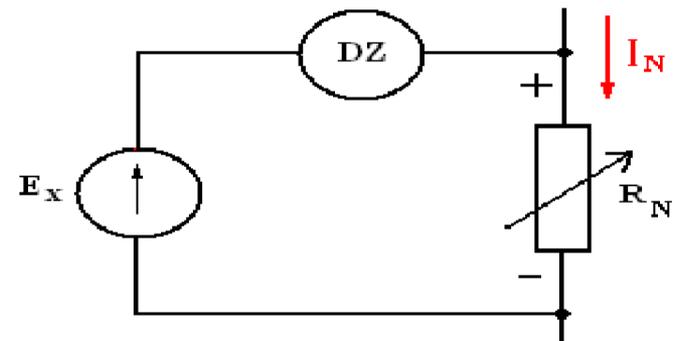


fig.3.14 b

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

- **Potentiomètre à courant continu**

1. **Circuit étalon**
2. **Circuit de tarage**
3. **Circuit de mesure**

$E_N = 1,0186V$ – pôle de Weston

$I_N = 1mA$ (préalablement fixé)

r_N – donne la possibilité de faire un réglage selon la température pour assurer toujours la même valeur de I_N et compenser la variation de E_N

R_h – réglage pour que **DZ** soit zéro. Tarage du potentiomètre

$$E_N = R_N I_N \quad R_N = \frac{E_N}{I_N} \rightarrow I_N = \frac{E_N}{R_N} \quad E_X \neq R_X I_N$$

On fait varier R_h pour atteindre le zéro du DZ. Après ceci

$$E_X = R_X I_N \quad E_X = E_N \frac{R_X}{R_N} \quad \delta E_X = \delta E_N + \delta R_X + \delta R_N$$

Cette méthode est utilisée pour la mesure de tension et de courant. Elle n'est pas utilisée pour des mesures ordinaires, mais pour l'étalonnage.

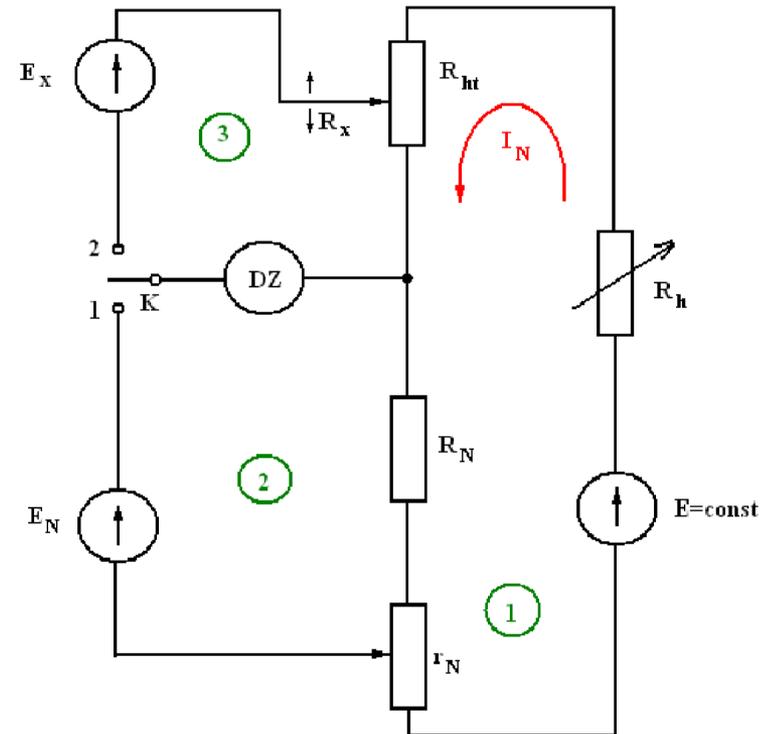


Fig. 4.2

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

■ **Étalonnage des appareils de mesure**

C'est le fait de constater la vraie classe de l'appareil de mesure en vérifiant la classe préalablement donnée.

Voltmètre – fig.4.3 a

$$\gamma = class = \frac{U_{mes} - U_r}{U_{cal}} \cdot 100\%$$

Pour trouver la vraie classe, il faut donner à l'entrée, toutes les valeurs en divisions

$$10div \Rightarrow \gamma = 0,83\%$$

$$20div \Rightarrow \gamma = 0,73\%$$

...

$$100div \Rightarrow \gamma = 0,43\%$$

On doit prendre une plus grand classe. Les classes de précision sont dans un rang **0,1;0,2;0,5;1,0;1,5;**

Si $\gamma=1,34\%$ dépasse **1**, alors on prend **1,5**.

Ampèremètre – fig. 4.3 b

En faisant varier le réostat on change les division de **I**.

$$I_r = \frac{U_r}{R_N}$$

$$\gamma = \frac{I_{mes} - I_r}{I_{cal}} \cdot 100\%$$

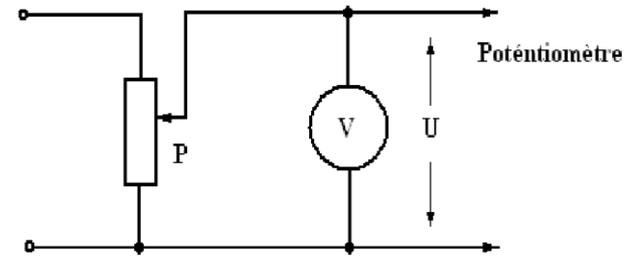


Fig. 4.3 a

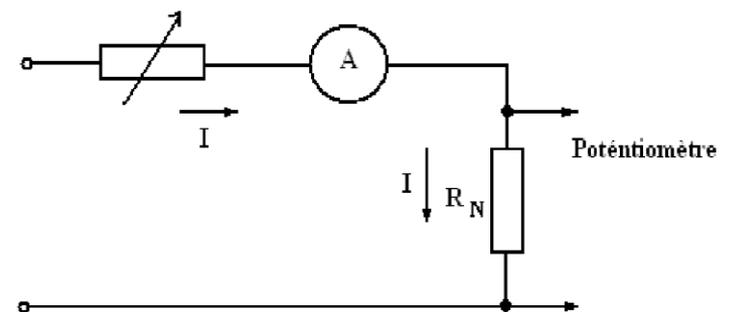


fig.4.3 b

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

■ **Potentiomètre à courant alternatif**

Ce sont les même types d'appareils, mais ils sont utilisés pour la mesure des courants et des tensions alternatifs. Leur précision n'est pas parfaite car il n'y a pas de source étalon.

En coordonnées polaires –fig.4.4 a

$$\dot{U} = U e^{j\varphi_u}$$

**En coordonnées rectangulaires –
fig.4.4.b**

$$\dot{U} = U_r + jU_i$$

**Ici on a 4 conditions pour comparer les
deux signaux par la méthode de zéro:**

- **Opposition des phases;**
- **Égalité des fréquences;**
- **Égalité des amplitudes;**
- **Les même formes des signaux.**

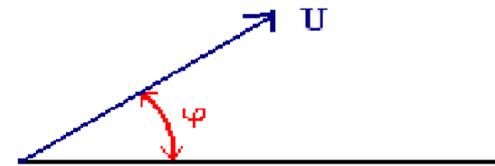


Fig.4.4 a

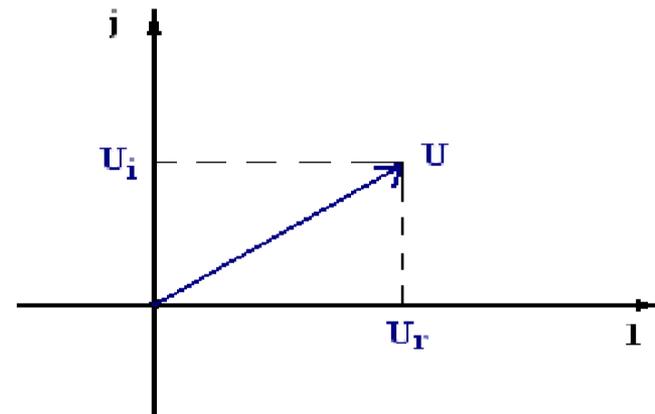


Fig.4.4 b

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

■ **Potentiomètre à courant alternatif**

■ **Potentiomètre polaire**

1- régulateur de phase – à la
sortie on trouve une tension
stable et constante; la phase
varie

**2- ampèremètre
électrodynamique** de précision
0,1 ou 0,2

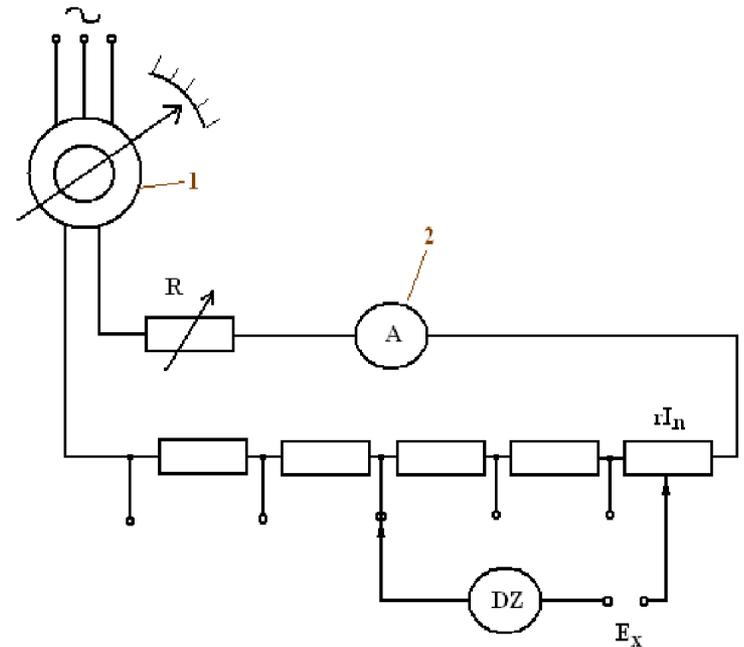


Fig 4.5

4. Mesure des tensions et des courants – mesure par la méthode d'opposition

- **Potentiomètre à courant alternatif**
 - **Potentiomètre rectangulaire**

1- réohorde

2- ampèremètre électrodynamique de précision 0,1 ou 0,2

$E_2 = j\omega ML$ - provoquée par l'influence des deux bobines

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2} \quad R_2 = R_r + R + r \quad I_2 = \frac{j\omega M}{R_2} I_1$$

Par le constructeur on a $\omega M = R_2$, alors

$$I_2 = jI_1 \quad , \text{ déphasé à } \frac{\pi}{2}$$

La tension provoquée par I_2 provoque une chute de tension déphasée à I que la tension est imaginaire. On bouge les curseurs jusqu'à ce que le **DZ** pointe sur le zéro.

$$U_x = U_r + U_i$$

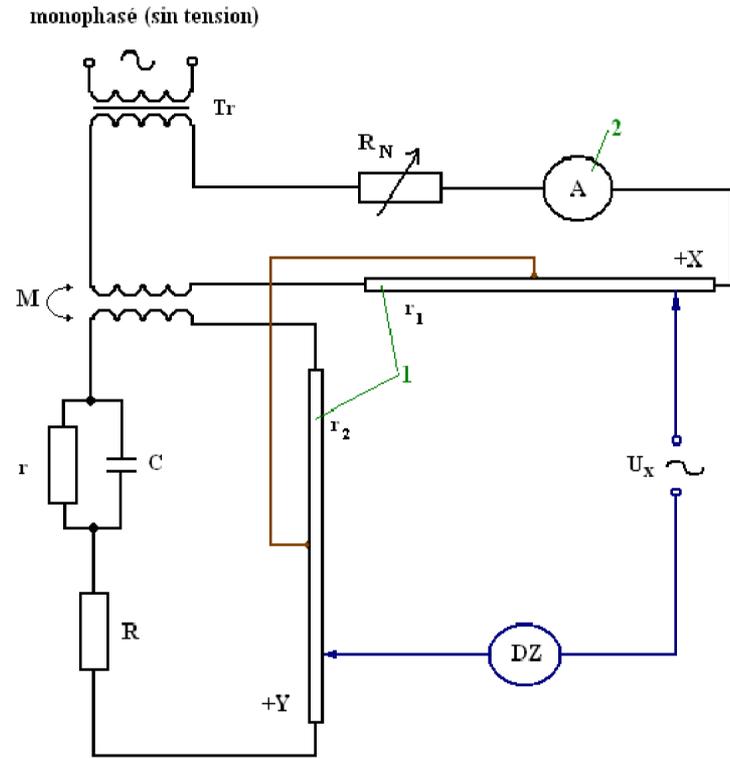


Fig.4.6

5. Transformateurs de mesure

- ***Ils sont utilisés pour élargir le calibre en courant alternatif.***

Avantages:

La perte d'énergie à cause de cette transformation est très faible, si on veut élargir par shunt la perte est énorme.

Grâce à la liaison électromagnétique le circuit de mesure est séparé par le circuit de puissance.

Ce sont des transformateurs dont la précision est garantie.

- ***Transformateur de courant***

W_1 et W_2 sont isolés l'un de l'autre, mais aussi par rapport au noyau. Le courant I_A qui traverse W_1 donne naissance à un flux magnétique qui de sa part à I_2 dans W_2 .

Dans le circuit secondaire sont branchés seulement les appareils de mesure.

- ***enroulement primaire***
- ***enroulement secondaire***

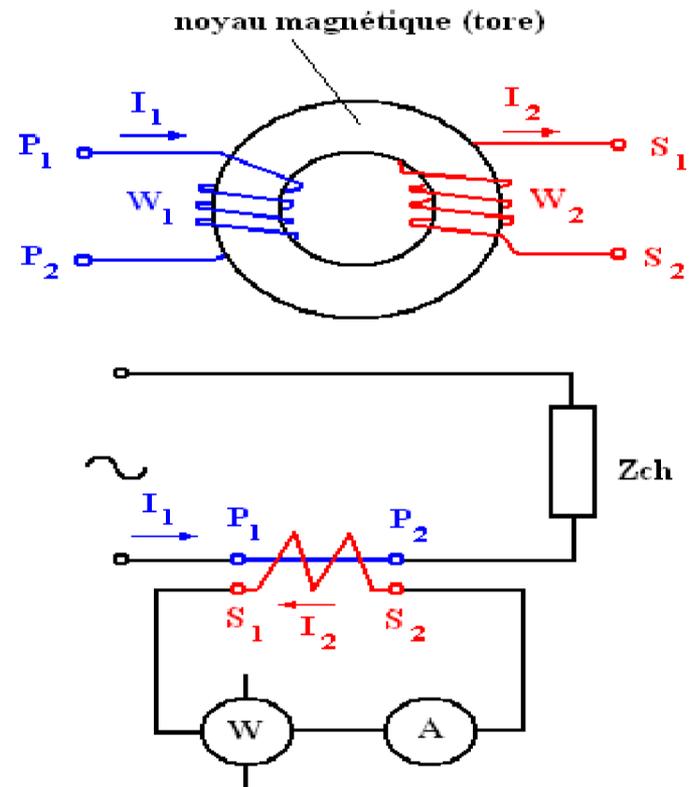


Fig. 5.1

5. Transformateurs de mesure

- **Transformateur de courant**

- **Caractéristiques des transformateurs à courant**

1. **Le rapport de transformation nominal**

$$K_{IN} = \frac{I_{1N}}{I_{2N}}$$

Dans les conditions de travail le rapport de transformation est différent .

$$K_I = \frac{I_1}{I_2}$$

C'est la cause d'erreur du module.

2. **Erreur du module des transformateur à courant**

$$\delta_I = \frac{K_{IN} - K_I}{K_I} \approx \frac{K_{IN} - K_I}{K_{IN}} = 1 - \frac{K_I}{K_{IN}}$$

3. **Diagramme vectoriel**

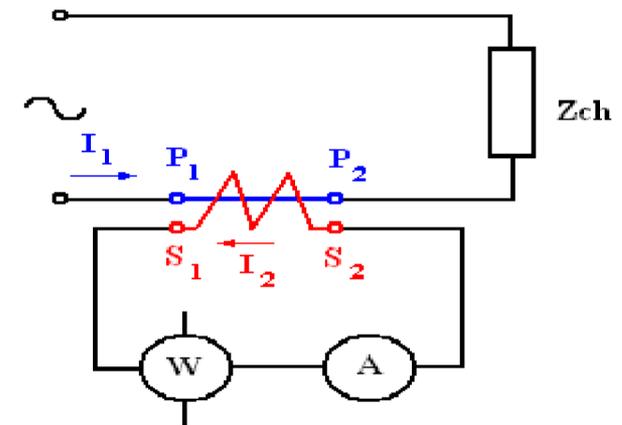
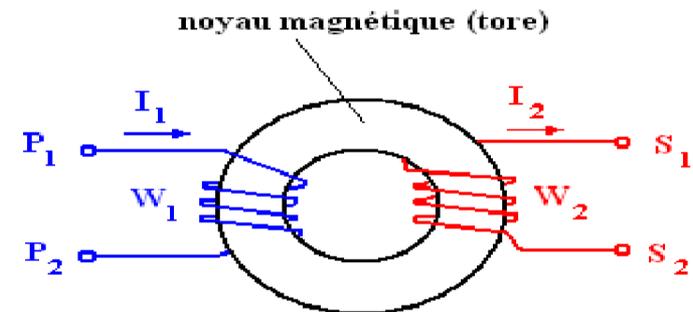


Fig. 5.1

5. Transformateurs de mesure

- **Transformateur de courant**

- **Caractéristiques des transformateurs à courant**

- 3. Diagramme vectoriel

- équation du module des transformateurs à courant:

$$w_1 \dot{I}_1 = w_1 \dot{I}_{10} - w_2 \dot{I}_2 \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2 \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2'$$

$$I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1} \quad E_2' = E_2 \frac{w_2}{w_1}$$

I_{10} – le courant d’aimantation du noyau (à cause des pertes le flux Φ n’est pas dans la phase)

$$I_1 = I_2' + I_{10} \cos(\psi_0 - \psi_2)$$

ψ_2 – provoqué par la résistance. Voilà pourquoi il est en retard

- **Erreur du module du transformateur de courant**

$$\delta_I = 1 - \frac{K_I}{K_{IN}} = 1 - \frac{I_1}{K_{IN} I_2} = 1 - \frac{w_2}{w_1 K_{IN}} - \frac{I_{10} \cos(\psi_0 - \psi_1)}{K_{IN} I_2}$$

- **Erreur de phase du transformateur de courant**

$$\delta_{I\psi} = \operatorname{tg} \delta_{I\psi} = \frac{\overline{CB}}{\overline{OC}} = \frac{I_{10} \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 + I_{10} \cos(\psi_0 - \psi_2)} \approx \frac{w_1 I_{10} \sin(\psi_0 - \psi_2)}{w_2 I_2}$$

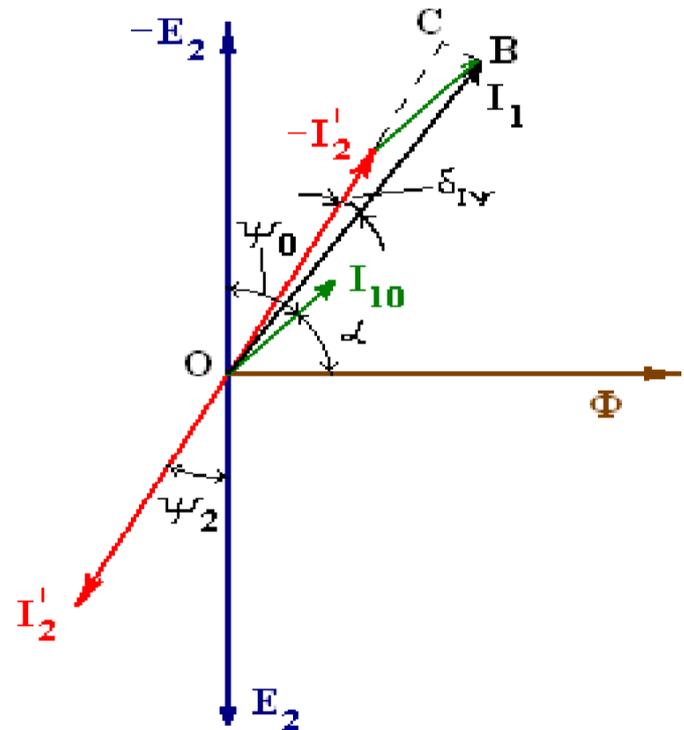
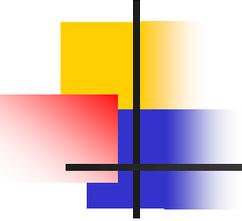


Fig.5.2



5. Transformateurs de mesure

- ***Transformateur de courant***

- **Conclusion**

Les erreurs dépendent de plusieurs facteurs, mais ce qui est essentiel est qu'il est nécessaire que I_2 soit grand et l'influence de ce terme diminue.

! – Le circuit secondaire doit fonctionner en régime de court circuit, alors résistances sont très petites I_{10} doit être faible.

L'erreur dépend de ψ_0 et ψ_2 .

5. Transformateurs de mesure

- **Transformateur de tension (transformateur de potentiel)**

Ce sont des appareils de mesure utilisés pour élargir le calibre des appareils en tension – voltmètres et wattmètres. Grâce aux transformateurs de tension on peut mesurer des tensions de l'ordre de 100kV. Ils sont composés par un tore et sur le tore sont bobinés les enroulements primaire et secondaire. Ils sont isolés l'un par rapport à l'autre. Ce qui est important c'est de savoir que les transformateurs de tension fonctionnent en régime à vide parce que dans le circuit secondaire sont branchés seulement le voltmètre et le circuit de tension de wattmètre. Ces deux circuits se caractérisent de très grandes résistances et le courant qui les traverses est pratiquement négligeable.

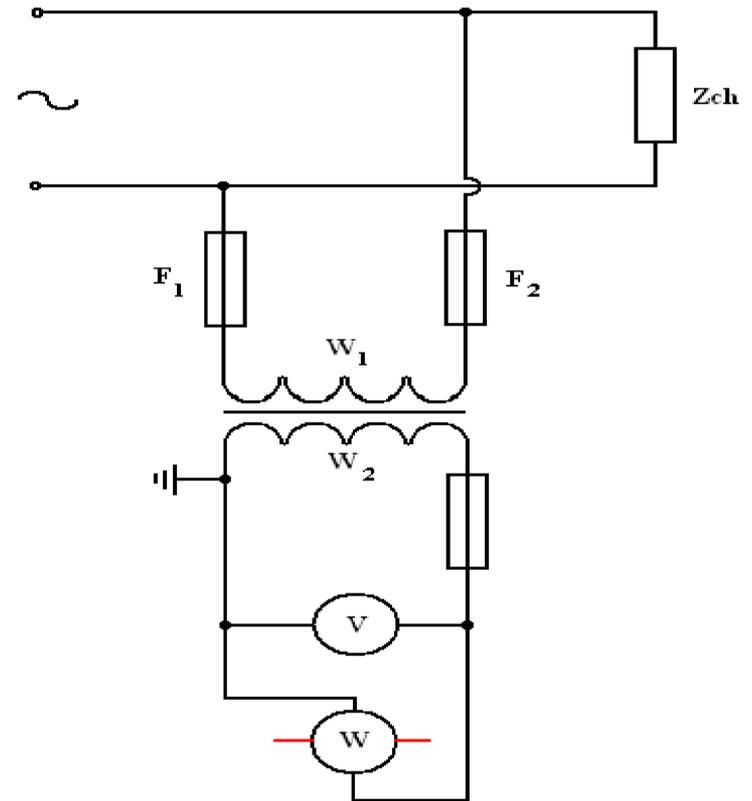


Fig.5.3

5. Transformateurs de mesure

- **Transformateur de tension (transformateur de potentiel)**

Le circuit de charge s'appelle circuit de puissance. Dans le circuit de puissance est branché l'enroulement primaire dont le nombre de spires est w_1 . donc le circuit secondaire est le deuxième enroulement. Il est mis à la masse. Dans le circuit primaire il y a deux fusibles.

$$U_{2N} = 100\text{V}$$

$$U_{1N} = 100\text{V}, 200\text{V}, 500\text{V}, 1\text{kV}, 2\text{kV}, 10\text{kV}, 20\text{kV}, 50\text{kV}, 100\text{kV}$$

Sur cette base on définit le rapport nominal de transformation:

$$K_{UN} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = 1 \div 1000$$

Rapport réel de transformation est:

$$K_U = \frac{U_1}{U_2}$$

Erreur du module du transformateur de tension:

$$\delta_U \approx 1 - \frac{K_U}{K_{UN}}$$

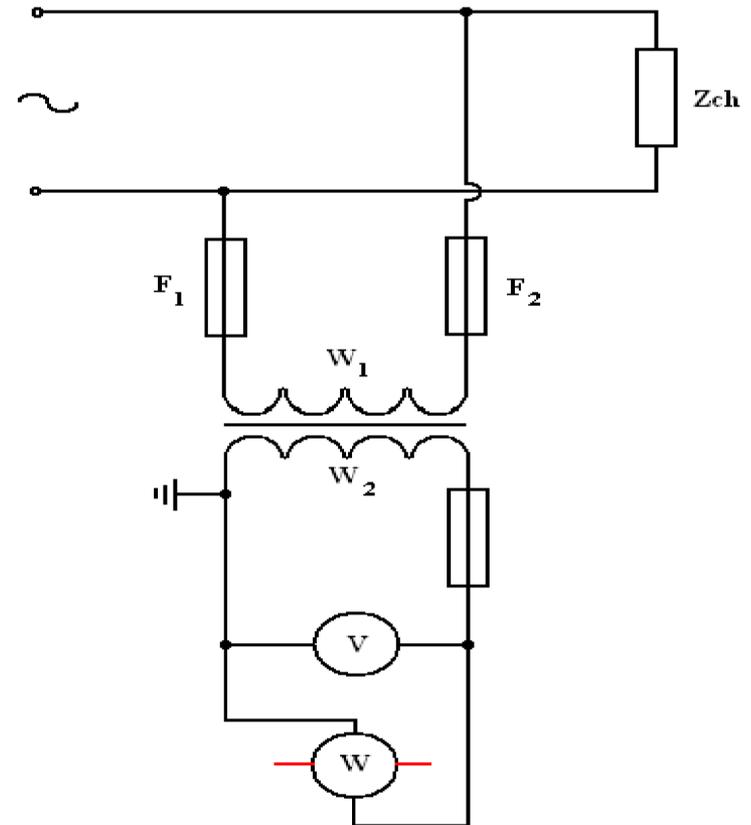


Fig.5.3

6. Mesure de puissance

Généralités

- En courant continue

$$P = UI \quad - \text{puissance consommée par une charge}$$

- En courant alternatif

$$p = ui \quad - \text{puissance instantanée}$$

Si on a des tension et des courants périodiques on travaille toujours avec **la puissance moyenne** -

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

Si on a des courants sinusoïdaux :

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi$$

$$P = UI \cos \varphi \quad - \text{puissance actif}$$

C'est la puissance qui se transforme en chaleur ou en rayonnement. Dans les mêmes conditions - courants et tensions sinusoïdaux, on définit la puissance réactive.

$$Q = UI \sin \varphi \quad - \text{puissance réactif}$$

Elle caractérise l'échange de puissance entre la source et le charge dans une période. Elle existe seulement dans les circuits plus ou moins réactifs.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad - \text{puissance totale ou apparent}$$

6. Mesure de puissance

- Mesures de puissances en courant continu**

$P = UI$ Il est évident que dans ce cas on peut mesurer la puissance en utilisant un système voltmètre et ampèremètre.

Erreur de méthode

***V-A**

$$\delta_{P_{V-A}} = \frac{P_w - P_r}{P_r} = \frac{U_V I_A - U_{ch} I_A}{U_{ch} I_A} = \frac{(U_A + U_{ch}) I_A - U_{ch} I_A}{U_{ch} I_A} = \frac{U_A I_A}{U_{ch} I_A} = \frac{P_A}{P_{ch}} = \frac{R_A I_A^2}{R_{ch} I_A^2} = \frac{R_A}{R_{ch}}$$

Il faut avoir une grande résistance de charge. De cette façon l'erreur est très petite

***A-V**

$$\delta_{P_{A-V}} = \frac{P_w - P_r}{P_r} = \frac{U_V I_A - U_V I_{ch}}{U_V I_{ch}} = \frac{(I_V + I_{ch}) U_V - U_V I_{ch}}{U_V I_{ch}} = \frac{U_V^2}{U_V I_{ch}} = \frac{U_V I_V}{U_V I_{ch}} = \frac{P_V}{P_{ch}} = \frac{R_V}{\frac{U_V^2}{I_{ch}}} = \frac{R_{ch}}{R_V}$$

On utilise le branchement pour de petites valeurs de la résistance de charge, de cette façon l'erreur est très petite.

$R_{ch} = \sqrt{R_V R_A}$ - **résistance critique**

$R_{ch} < \sqrt{R_V R_A}$ - **branchement AV**

$R_{ch} > \sqrt{R_V R_A}$ - **branchement VA**

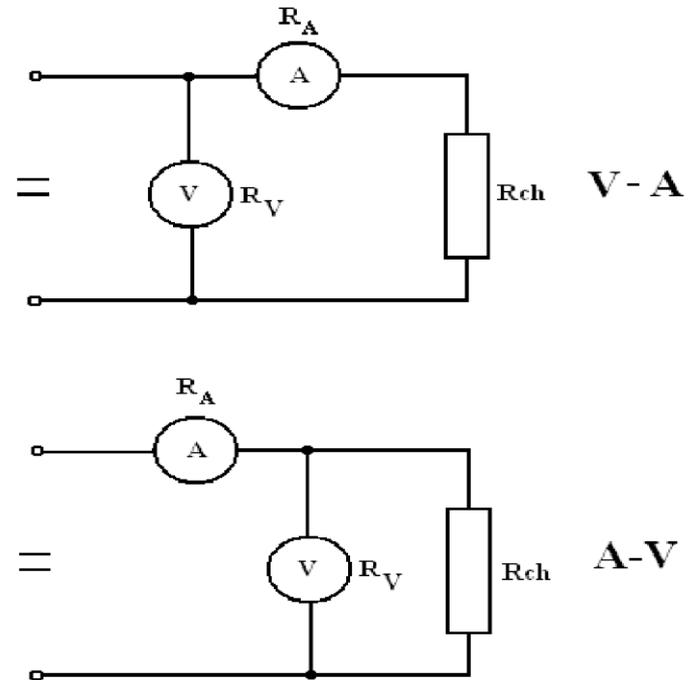


Fig. 6.1

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**
 - **Courants monophasés**

Les appareils qu'on utilise sont des wattmètres

- montage V-A et A-V

Au début on a le circuit de courant et après le circuit de tension.

$$\delta_{P_{V-A}} = \frac{P_{IW}}{P_{ch}} = \frac{R_{IW}}{R_{ch}}$$

- P_{IW} – la puissance consommée par le circuit de courant du wattmètre.

$$\delta_{P_{A-V}} = \frac{P_{UW}}{P_{ch}} = \frac{R_{ch}}{R_{UW}}$$

- R_{UW} – résistance du circuit de tension du wattmètre

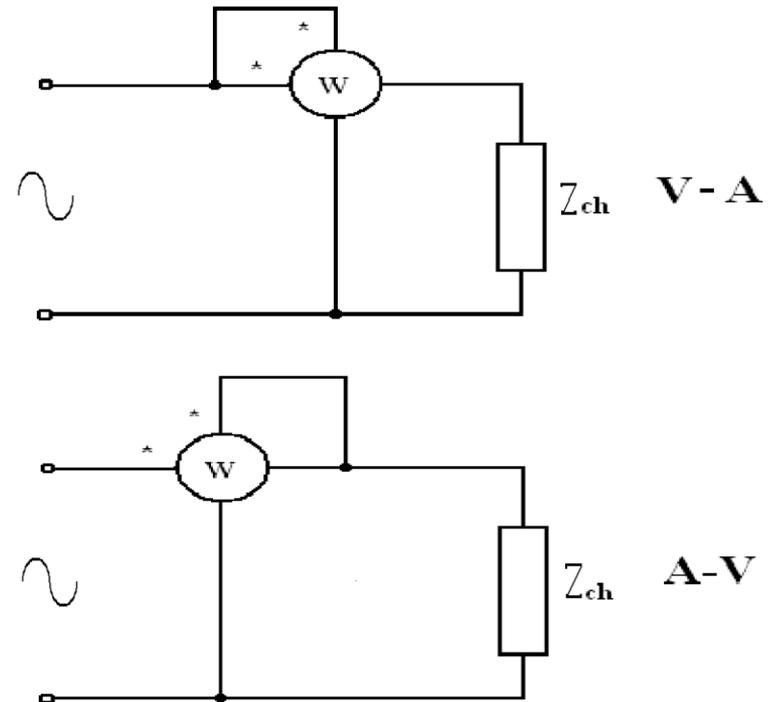


Fig.6.2

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**

Il faut toujours brancher avec le wattmètre les deux appareils de control – voltmètre et ampèremètre.

Supposons qu'on ait un wattmètre de calibres suivants: $V_{cal}=300V$; $I_{cal}=5A$; $\cos \varphi=1$; alors $P_{cal}=1500W$

Soit la tension à mesurer $U_m=30V$; $I_m=50A$; $\cos \varphi=1$, alors $P_m=1500W$

Si on branche le wattmètre dans un circuit pareil, la puissance mesurée est toujours dans le calibre **1500W**, mais ce n'est pas vrai car le courant est **10 fois** plus grand ($I=50A$). Le circuit de courant sera grillé est l'appareil complètement endommagé.

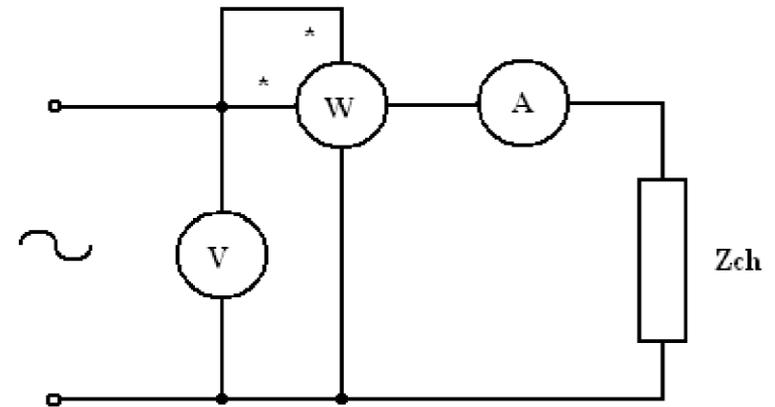


Fig.6.3

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**
 - **Élargissement du calibre**
 - **Le calibre de courant** à l'aide des transformateurs de courant
 - **Le calibre de tension**: pour les petits élargissements à l'aide d'une résistance additionnelle; pour les autres – un transformateur de tension.

Le circuit secondaire de transformateur de courant (**TI**) englobe un circuit de courant de wattmètre et un ampèremètre qui est pratiquement l'appareil de control.

Dans le circuit de transformateur de potentiel (**TP**) on a un fusible. Ce **TP** est en parallèle avec la charge. En parallèle est branché un wattmètre

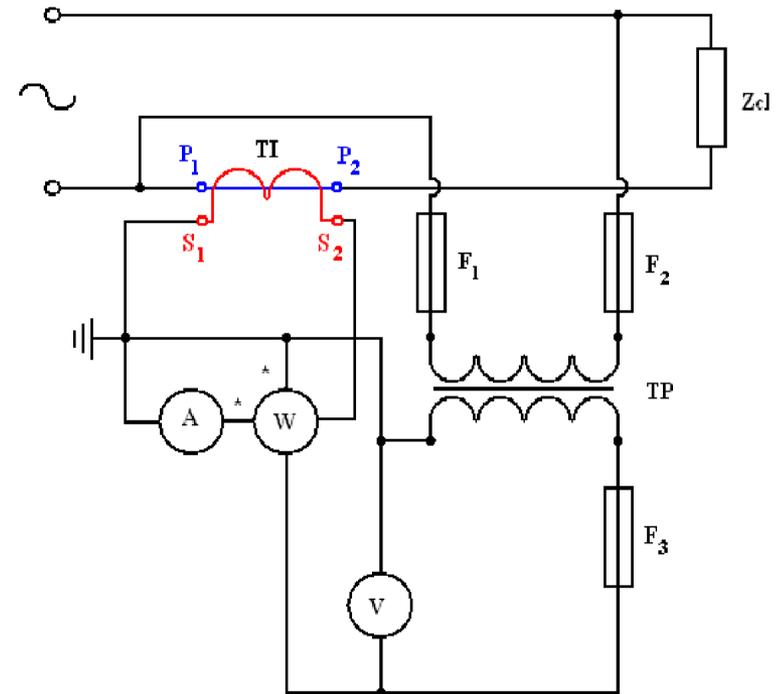


Fig.6.4

$$P_{ch} = P_{mesurée} \cdot K_{IN} \cdot K_{UN}$$

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**

$$P_{ch} = U.I.\cos \varphi$$

- **Erreur de déphasage du wattmètre**

Le wattmètre ne mesure pas exactement cette puissance car la tension mesurée n'est pas la vraie. On a supposé que le circuit de tension est purement résistif donc le courant et la tension sont en phase. On a aussi $(R_{vw} + R_{add}) \gg \omega L$, mais réellement cette réactance existe et elle provoque un déphasage ψ , alors la puissance mesurée par le wattmètre est:

$$P_{mes} = U.I.\cos(\varphi - \psi)$$

a cause de la réactance.

$$\begin{aligned} \delta_{\psi} &= \frac{P_{mes.} - P_{réel}}{P_{réel}} = \frac{U.I.\cos(\varphi - \psi) - U.I.\cos \varphi}{U.I.\cos \varphi} = \\ &= \frac{\cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi - \cos \varphi}{\cos \varphi} = \psi.tg \varphi \end{aligned}$$

Cette erreur dépend de la charge. Si l'angle augmente au-delà de la 45° l'erreur augmente car ψ ne sera plus négligeable.

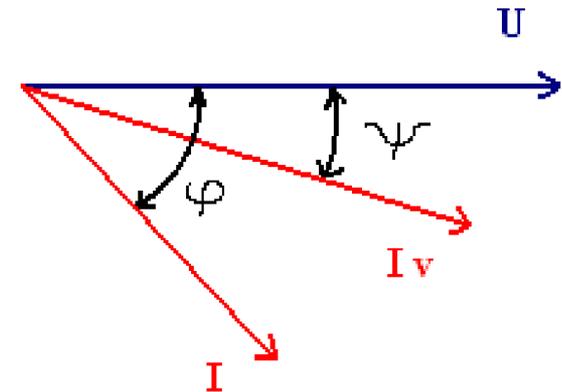


Fig.6.5

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**

- **Circuits triphasés**

- **Circuits triphasés équilibrés**

Ce sont des circuits dont les tensions, les courants et les déphasages sont égaux.

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt =$$

$$= P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3$$

Si le circuit est équilibré (symétrique), alors

$$P_{Total} = 3UI \cos \varphi$$

$$P_{Total} = 3P_W$$

Évidemment on peut mesurer la puissance consommée seulement dans une phase.

Le montage à quatre fils est donné à la fig.6.6.

La charge représente un circuit branché en étoile

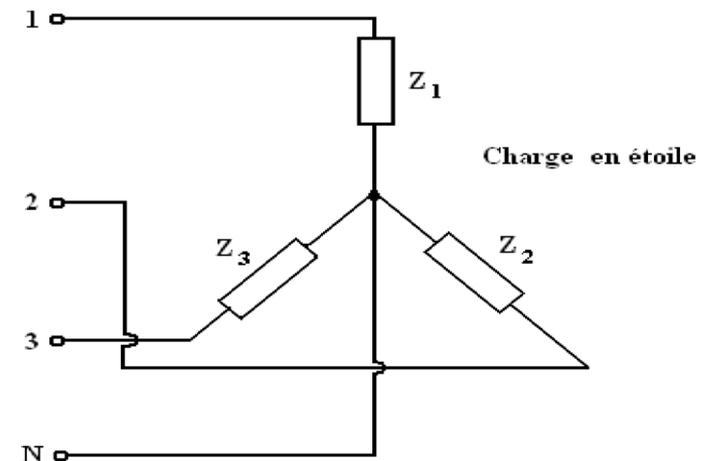
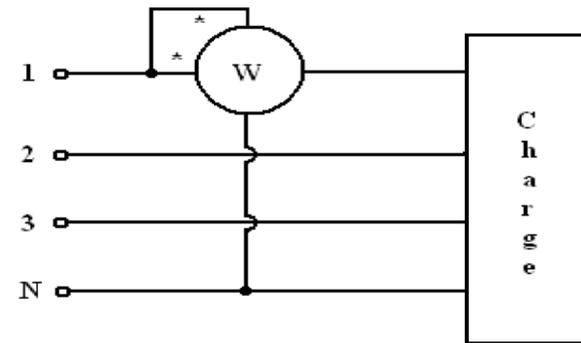


Fig.6.6

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**
 - **Circuits triphasés**
 - **Circuits triphasée équilibrés**
 - **- montage de circuit à trois fils la charge en triangle**

Méthode du point neutre artificiel –
fig.6.7.

$$R_W + R_1 = R_2 = R_3$$

On a trois tensions identiques qui imposent trois courants identiques sur trois résistances identiques.

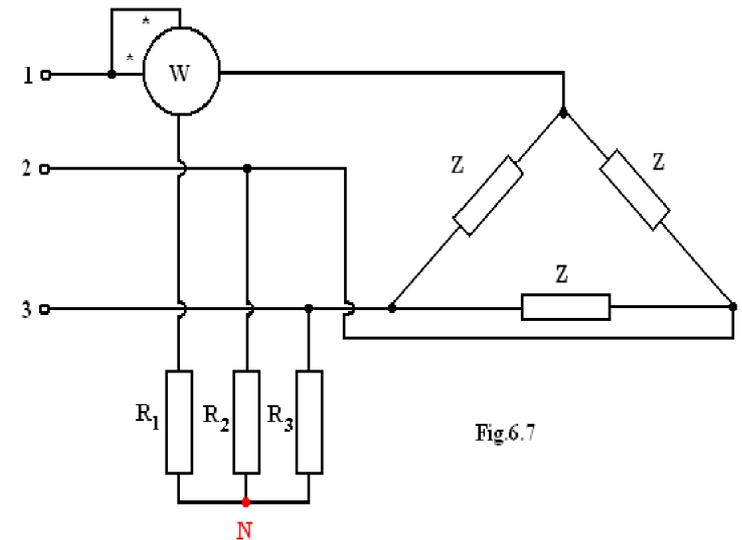


Fig.6.7

$$P_{Total} = 3P_W$$

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**
 - **Circuits triphasés**
 - **Circuits triphasée déséquilibrés**
 - **Montage à quatre fils**

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3, \text{ avec } P_1 \neq P_2 \neq P_3$$

$$P_{tot} = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

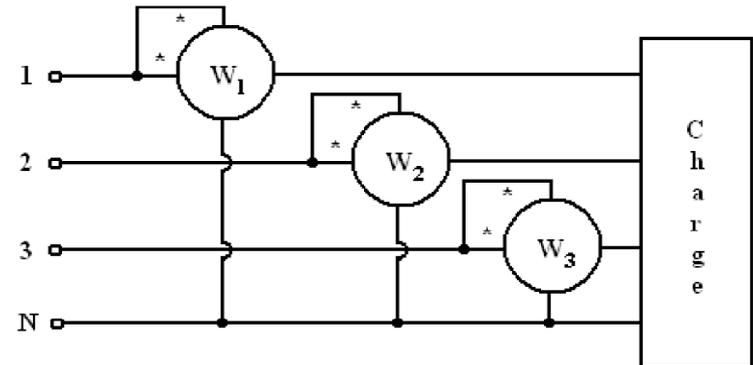


Fig.6.8

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**

- **Circuits triphasés**

- **Circuits triphasés déséquilibrés**

- **Montage à trois fils –**

- **MÉTHODE DES DEUX WATTMÈTRES**

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_N \quad i_N = 0 \Rightarrow i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad i_3 = -i_1 - i_2$$

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 (-i_1 - i_2) =$$

$$= i_1 (u_1 - u_3) + i_2 (u_2 - u_3) = i_1 u_{13} + i_2 u_{23}$$

$$P = P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{13} i_1 + u_{23} i_2) dt = U_{13} I_1 \cos(\angle U_{13} I_1) + U_{23} I_2 \cos(\angle U_{23} I_2)$$

$$P_{\text{tot}} = U_{13} I_1 \cos(30^\circ - \varphi_1) + U_{23} I_2 \cos(30^\circ + \varphi_2)$$

Une puissance active est toujours positive, alors si elle est mesurée négative ou nulle, alors c'est possible car les valeurs mesurées ne correspondent pas aux valeurs réelles. C'est une mesure Artificielle. Faire l'étude de la charge capacitive!

$$\varphi_1 = 0 \div \frac{\pi}{2} \rightarrow \cos(30^\circ - \varphi_1) > 0$$

$$\varphi_2 = 0 \div 60^\circ \rightarrow \cos(30^\circ + \varphi_2) > 0$$

$$\varphi_2 = 60^\circ \rightarrow \cos(30^\circ + \varphi_2) = 0 =$$

$$\varphi_2 = 60^\circ \div \frac{\pi}{2} \rightarrow \cos(30^\circ + \varphi_2) < 0$$

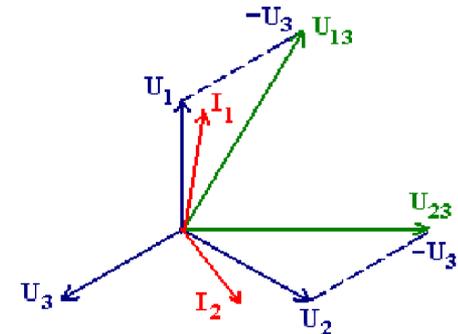
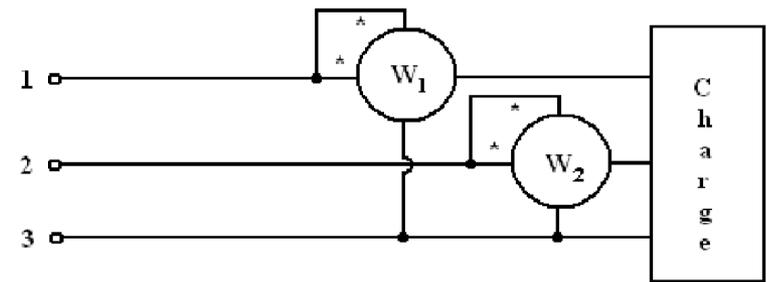


Fig.6.9

6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**
 - **Mesure de puissance réactive**

$$p = ui \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

- Avant elle était mesurée par les appareils spécialement construits, appelés **VAR-mètres**.
- **Utilisation de wattmètre dans les circuits monophasés** – la méthode est facile, mais sa précision est médiocre.

$$S = UI \quad Q = \sqrt{(UI)^2 - P^2}$$

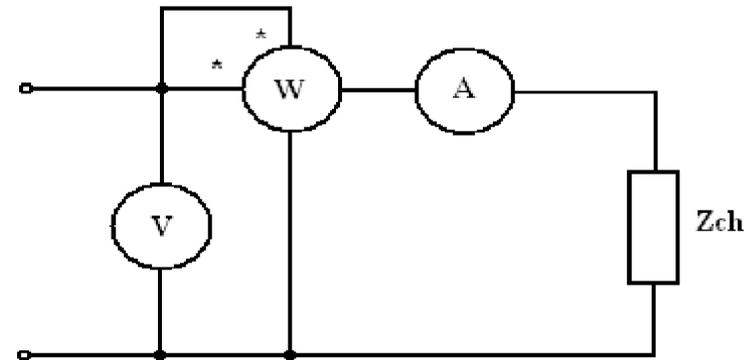
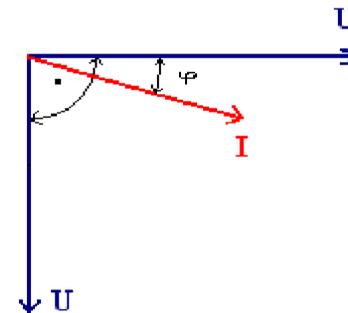


Fig.6.10



6. Mesure de puissance

- **Mesures de puissances en courant alternatif**
 - **Mesure de puissance réactive dans les circuits triphasés**

Normalement pour cette mesure on doit utiliser trois wattmètres, mais c'est impossible.

Si la tension est déphasée à $\pi/2$ de la tension initiale, alors ($\pi/2 - \varphi$) et en utilisant le même wattmètre on peut mesurer la puissance réactive.

$$Q = UI \sin \varphi = UI \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad U_{23} = \sqrt{3}U_1 \Rightarrow U_1 = \frac{\sqrt{3}}{3}U_{23}$$

$$U_{31} = \sqrt{3}U_2 \Rightarrow U_2 = \frac{\sqrt{3}}{3}U_{31} \quad U_{12} = \sqrt{3}U_3 \Rightarrow U_3 = \frac{\sqrt{3}}{3}U_{12}$$

$$\begin{aligned} Q_{tot} &= U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + U_3 I_3 \sin \varphi_3 = \\ &= \frac{U_{23}}{\sqrt{3}} I_1 \cos(\angle U_{23}, I_1) + \frac{U_{31}}{\sqrt{3}} I_2 \cos(\angle U_{31}, I_2) + \frac{U_{12}}{\sqrt{3}} I_3 \cos(\angle U_{12}, I_3) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}) \end{aligned}$$

Ce branchement est tout à fait artificiel découvert à l'aide des diagrammes vectoriels, appelé méthode de trois wattmètres de puissance réactive. Les tension doivent être équilibrées. Même applicable à 4 fils.

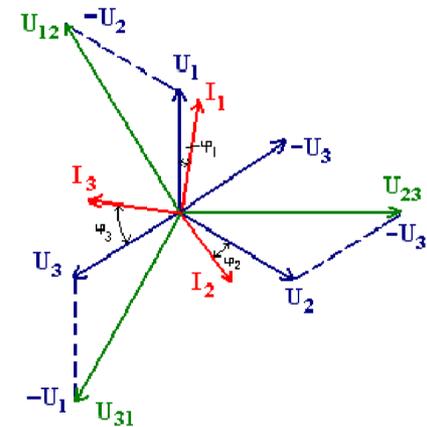
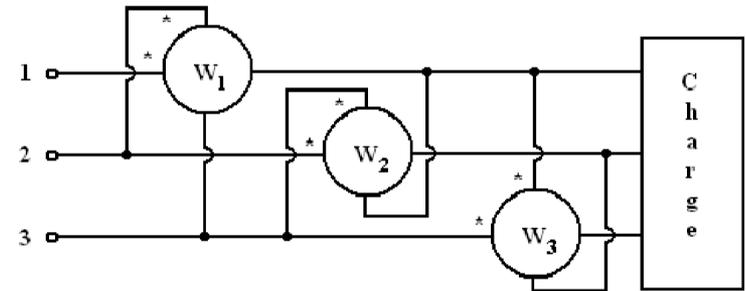


Fig.6.11

7. Mesure de résistances

- **Généralités**
- La résistance est la grandeur le plus souvent mesurée après le courant, la tension et la puissance. Elle varie dans un intervalle très large (10^{-8} - 10^{15}) Ω . Il est impossible d'avoir un appareil qui peut mesurer toute la bande. Il y a 5 différents types de résistances:
 - 1. (10^{10} - 10^{15}) Ω – très grandes
 - 2. (10^6 - 10^{10}) Ω – grandes
 - 3. (10 - 10^6) Ω – moyennes
 - 4. (10^{-4} - 10^1) Ω – petites
 - 5. (10^{-8} - 10^{-4}) Ω – très petites

*Mesure de résistances moyennes
Méthode de l'ampèremètre et voltmètre*

$$R_{x_m} = \frac{U_V}{I_A}$$

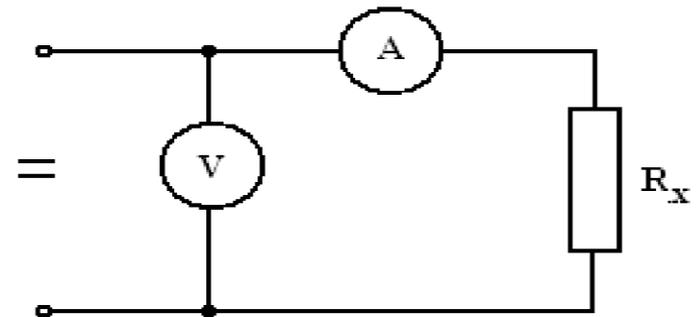


Fig.7.1

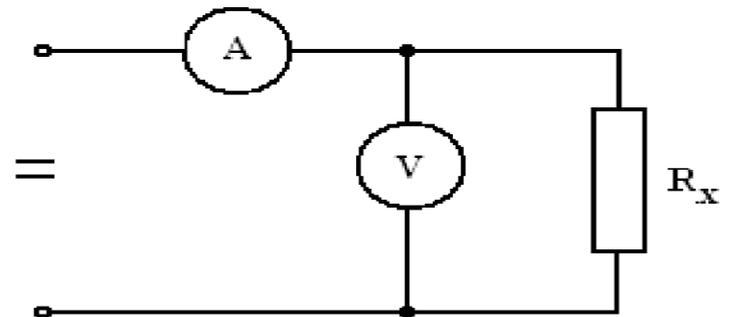


Fig.7.2

7. Mesure de résistances

Mesure de résistances moyennes Méthode de l'ampèremètre et voltmètre

- L'erreur de méthode dans le premier cas:

$$\delta_{R_{x_{met}}} = \frac{R_A}{R_X}$$

- Dans le deuxième cas:

$$\delta_{R_{x_{met}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_X}}$$

- En mesurant une résistance, utilisant le voltmètre et ampèremètre qui ont leurs résistances internes, on a une erreur de méthode. Elle est provoquée par la consommation de l'appareil qui est plus proche de la résistance à mesurer.
- Dans le premier cas si R_X augmente $R_{x_{met}}$ diminue. Dans le deuxième cas c'est le contraire
- **V-A** mesure de résistances relativement grandes
- **A-V** mesure de résistances relativement petite

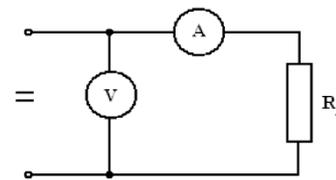


Fig.7.1

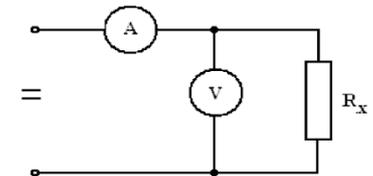


Fig.7.2

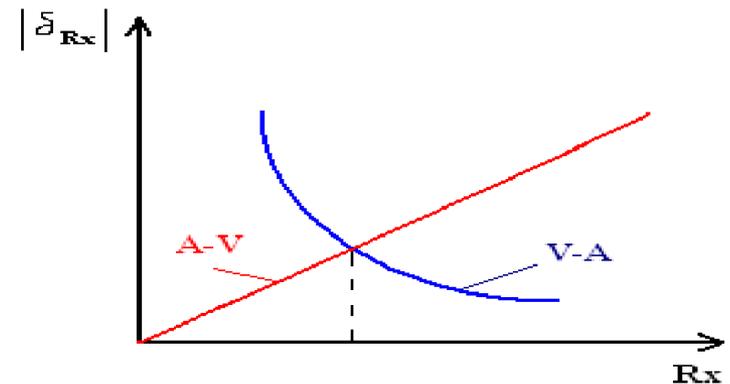


Fig.7.3

7. Mesure de résistances

Mesure de résistances moyennes Méthode aux ponts en courant continue - pont single (ordinaire)

C'est pratiquement une application de la méthode d'opposition. Il est composé de deux diagonales: **ab** d'alimentation et **cd** de mesure. Si on mesure la valeur des résistances, cela provoque une variation de I_{DZ} . Pour trouver le courant de **DZ**, on utilise le théorème de **Thévenin**

$$I_{DZ} = \frac{U_{tcd}}{R_{tcd} + R_{DZ}}$$

, avec U_{tcd} – la tension entre les points **c** et **d** si la branche **cd** est ouverte

R_{tcd} – la résistance équivalente du circuit si la branche **cd** est ouverte et les sources du circuits sont court-circuit

$$U_{tcd} = I_4 R_4 - I_1 R_1 = E \frac{R_4}{R_3 + R_4} - E \frac{R_1}{R_1 + R_2} = E \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

$$R_{tcd} = R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

$$I_{DZ} = E \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_{DZ} (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

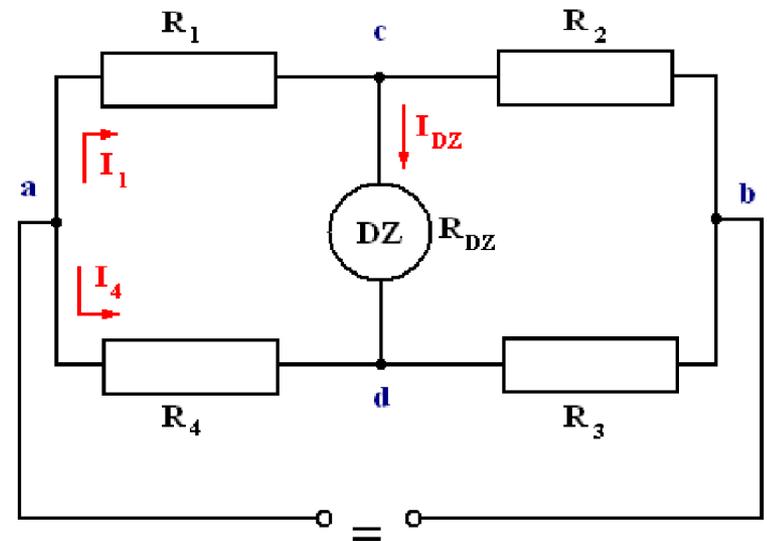


Fig. 7.4

7. Mesure de résistances

Mesure de résistances moyennes

Méthode aux ponts en courant continu

Généralement on utilise ce pont à une condition suivante:

$$I_{DZ} = 0$$

Si le courant est nul et si: $E = \text{const}, E \neq 0$

, alors la numérateur est nul $R_2 R_4 - R_1 R_3 = 0$

Condition d'équilibre en courant continu

$$R_2 R_4 = R_1 R_3 \quad R_{1(x)} = R_2 \frac{R_4}{R_3}$$

-précision

$$\partial_{R_{1(x)}} = \partial_{R_2} + \partial_{R_4} + \partial_{R_3}$$

On peut produire des résistance en grande précision, alors si l'erreur ne dépend que de la somme des erreurs sur des résistances, alors c'est petit.

On n'a pas d'erreur de lecture sur le DZ car on ne s'intéresse qu'à la position de l'aiguille à zéro.

La sensibilité du DZ dépend du choix de l'appareil. Dans la plupart des cas c'est un galvanomètre (100nA). Le DZ est sensible au passage d'un courant extrêmement petit.

La meilleure sensibilité – $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ C'est un cas théorique, mais il faut s'y approcher pendant la mesure

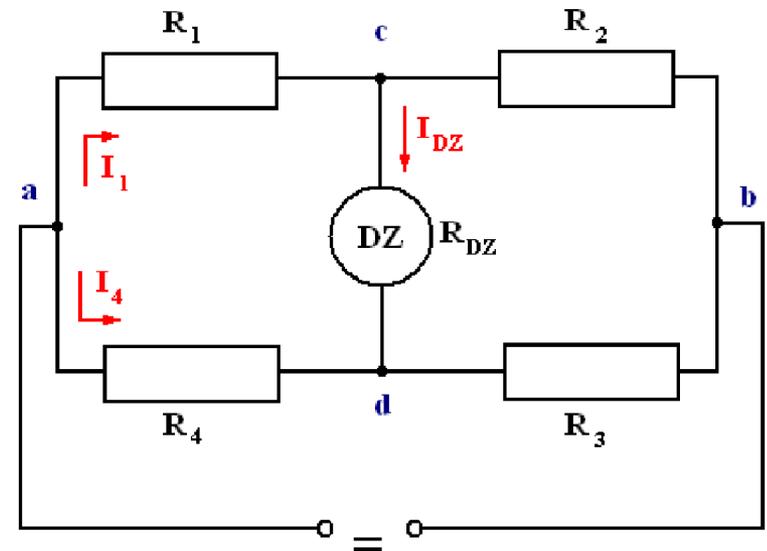


Fig. 7.4

7. Mesure de résistances

Mesure de petites résistances

Méthode aux ponts en courant continu – pont de Thomson (pont double)

Les résistance des fils de connexion sont de l'ordre de quelques milliohms. Si $R_x = 10\text{m}\Omega$ et la résistance des fils est $5\text{m}\Omega$, alors au lieu de mesurer la valeur vraie de R_x on mesure la somme de R_x et de la résistance de la fil. Cela nous donne une erreur de 100%

$$\delta_{R_x} = \frac{R_{xmes} - R_r}{R_r} = \frac{20 - 10}{10} = 1 \Rightarrow \delta_{R_x}, \% = 100\%$$

Pour ne pas avoir des résultats erronés il faut mesurer la chute de tension directement aux bornes de la résistance. Il faut convertir le pont double en pont simple. Après on obtient un schéma équivalent composé des branches a,b,c,d.

$$I = (1 \div 3)A$$

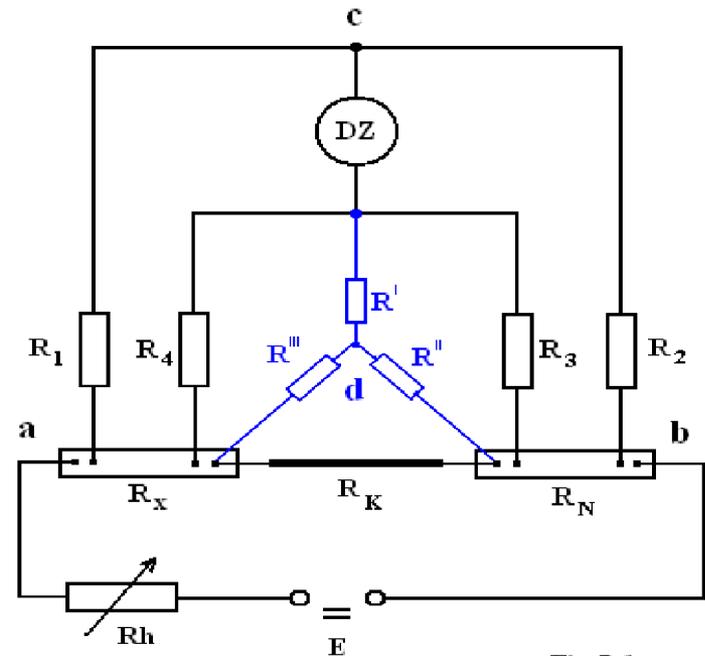


Fig. 7.6

7. Mesure de résistances

Mesure de petites résistances

Méthode aux ponts en courant continu – pont de Thomson (pont double)

$$R_1(R_N + R^{II}) = R_2(R_K + R^{II}) \quad R^{II} = \frac{R_K R_3}{R_2 + R_3 + R_K}$$

$$R^{III} = \frac{R_K R_4}{R_2 + R_3 + R_K} \quad \frac{R_1 R_N}{R_2} + \frac{R_1 R^{II}}{R_2} = R_X + R^{III}$$

$$R_X = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1 R_K R_3}{R_2 \sum R} - \frac{R_K R_4}{\sum R} \quad R_X = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_K R_3}{\sum R} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_4}{R_3} \right)$$

- Supposons que le deuxième terme puisse être éliminé.

- $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

- Pour faire cela il faut jumeler R_1 et R_4 en faisant varier R_1 ou fait varier R_4 . Si la section de la résistance R_K est presque 1 cm^2 , alors:

- $R_K \approx 0$

$$R_X = R_N \frac{R_1}{R_2}$$

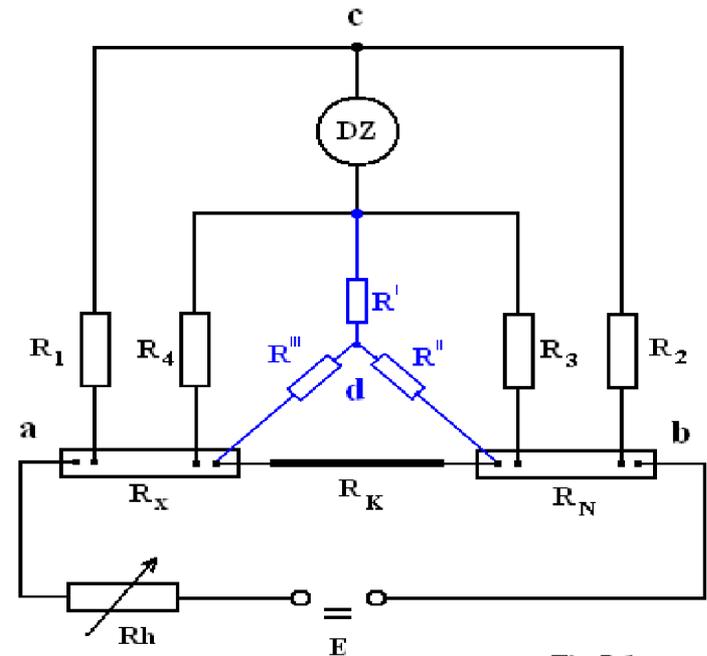


Fig. 7.6

7. Mesure de résistances

■ **Mesure de grandes résistances**

- Elle est caractérisée par 4 particularité: Les grandes résistance sont composées par:
 - **Résistance volumiques R_v** ;
 - **Résistances superficielles R_s** .

Il y a des méthodes de mesure de ces résistance séparément.

Les grandes résistances dépendent de la caractéristique ambiante: t , humidité, poussière. Les caractéristiques d'un diélectrique dépendent beaucoup de la température.

Polarisation du diélectrique – c'est l'effet d'orientation des dipôle d'un diélectrique soumis par une tension continue. La résistance du diélectrique diminue brusquement à cause de l'orientation, appelée polarisation. Pour la diminuer après chaque mesure il faut faire un court circuit pour rétablir le désordre fig.7.7 b.

Il y a des **courant de fuite** et R_x est traversée par une partie de ces courants. On fait une tresse autour de la résistance. Le potentiel de la tresse est nécessairement égal au potentiel du fil car ils sont court-circuités, alors il n'y a pas de courant de fuit et tout le courant qui y passe, il passe par R_x -fig.7.7 c.

*tresse - шарнир

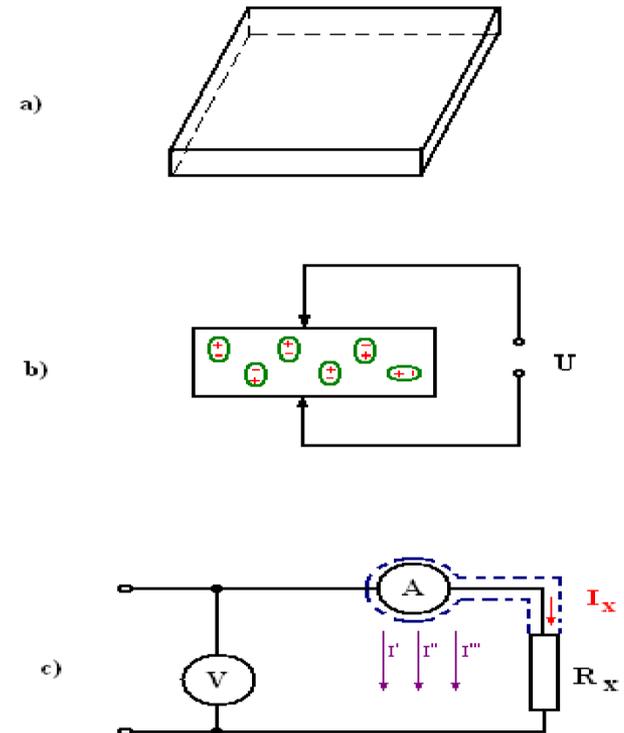


Fig.7.7

7. Mesure de résistances

- **Mesure de grandes résistances**
 - **Méthode du voltmètre et du galvanomètre – fig. 7.8 a)**

$$V - A \rightarrow R_X \quad R_{X_m} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I_G}$$

Il n'y a aucune erreur de méthode provoquée par la consommation propre de l'appareil

$$\frac{U_V}{I_{GS}} = R_S$$

Séparation de la mesure de R_V et R_S est donnée a la fig. 7.8 b) et c)

C'est jusqu'à **1GΩ**. Au-delà de ces valeurs le courant devient si petit qu'il est impossible de le mesurer même par un galvanomètre. Alors méthode de la charge:

Fig. 7.8 a)

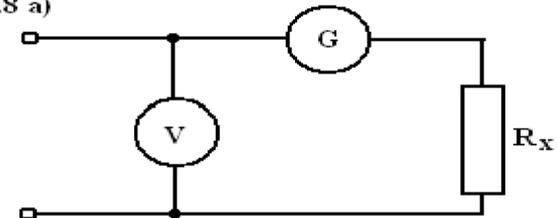


Fig. 7.8 b)

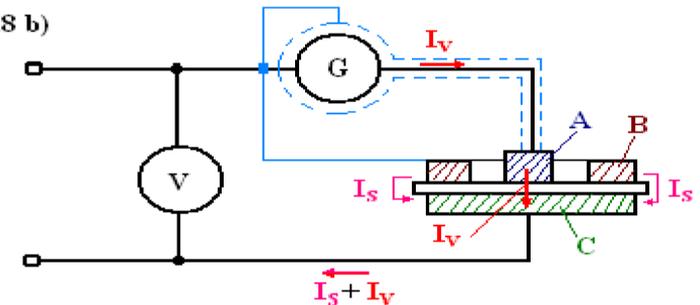
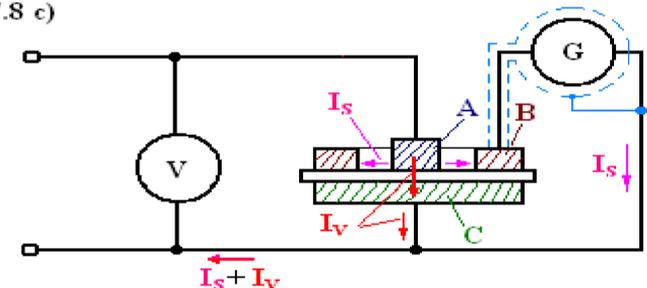


Fig. 7.8 c)



7. Mesure de résistances

■ *Mesure de grandes résistances*

■ *Méthode du voltmètre et du galvanomètre – fig. 7.9*

1- position de la charge de **C**

2- position de décharge

GB – galvanomètre balistique qui mesure la charge du condensateur

L'essentiel c'est faire de bonnes mesures pour tracer la courbe et la tangente correctement

$$Q = \int_0^T i dt \qquad I_{ch_0} = \frac{U_V}{R_X}$$

$$i = \frac{dQ}{dt} \rightarrow I_{ch_0} = \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{t=0} = \frac{Q'}{t'}$$

$$R_X = \frac{U_V t'}{Q'}$$

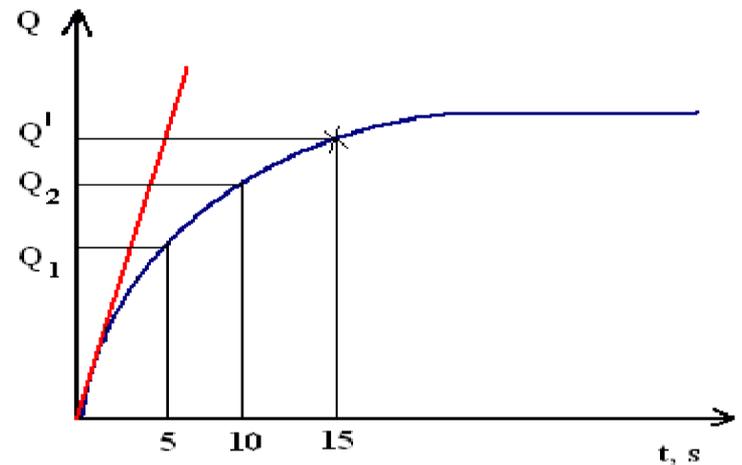
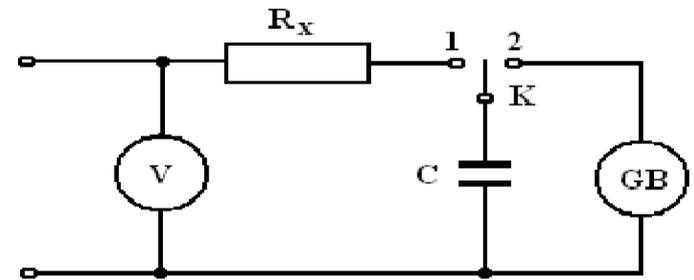


Fig. 7.9

8. Mesure d'impédances

- **Généralités**

$$Z_X = R_X + jX_X = z_X e^{j\varphi_X}$$

Il faut mesurer R_X , L_X , C_X et le facteur de qualité Q_X et aussi les pertes $tg\delta_X$

$$Q_X = \frac{\omega L_X}{R_X}$$

-en série $tg\delta_X = R_X C_X$

-en parallèle $tg\delta_X = \frac{1}{\omega R_X L_X}$

Avec δ – l'angle de pertes d'un condensateur

- **Méthode de l'ampèremètre, du voltmètre et de wattmètre**

$$z_X = \frac{U_V}{I_A} \quad R_X = \frac{P_w}{I_A^2} \quad X_X = \sqrt{z_X^2 - R_X^2} \quad \varphi_x = \arccos \frac{P_w}{U_V I_A}$$

Cette méthode est applicable, mais elle est peu précise à cause du nombre d'appareils de mesure.

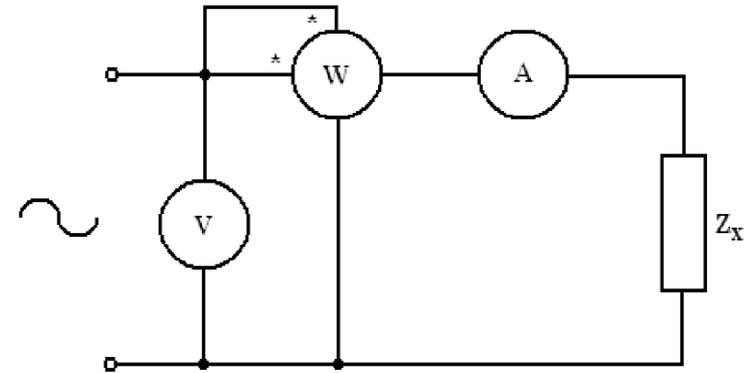


Fig.8.1

8. Mesure d'impédances

Méthode au pont en courant alternatif

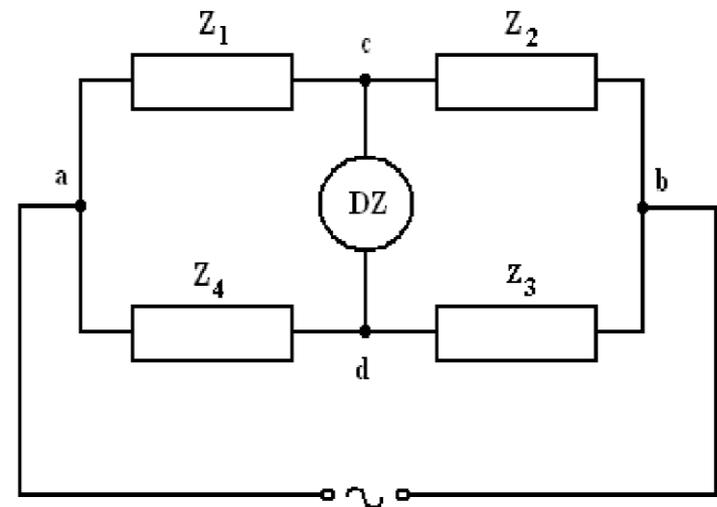
Généralités

L'alimentation n'est pas plus une source en continue, **mais alternative**. Si la source est alternative, on branche des impédances et non des résistances. Dans l'autre diagonale est branché un **DZ** sensible en courant alternatif.

Le **DZ** pour une large bande de fréquences est un oscilloscope. Si on arrive à équilibrer le pont le signal observé à l'oscilloscope est une ligne droite.

De 400Hz-1kHz(600Hz) on utilise des écouteurs téléphoniques. Il est branché dans la diagonale **c-d**. Au moment où $u_{cd} = 0$ il n'y a aucun son dans l'écouteur. Au début en branchant l'écouteur on entend un bruit.

Comme **DZ** on peut utiliser un galvanomètre – un appareil magnétoélectrique dont l'équipage mobile est très léger et il suit le signal. A l'état d'équilibre, il n'y a pas de courant et il n'y a pas de mouvement de l'équipage mobile d'où la bande est réduite à une ligne.



8. Mesure d'impédances

Méthode au pont en courant alternatif

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = z_1 e^{j\varphi_1}$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = z_2 e^{j\varphi_2}$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3 = z_3 e^{j\varphi_3}$$

$$Z_4 = R_4 + jX_4 = z_4 e^{j\varphi_4}$$

- A l'état d'équilibre $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$

$$(R_1 + jX_1)(R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4)$$

$$|R_1 R_3 - X_1 X_3 = R_2 R_4 - X_2 X_4$$

$$|X_1 R_3 + X_3 R_1 = R_2 X_4 + X_2 R_4$$

- En courant alternatif il faut avoir deux éléments variables

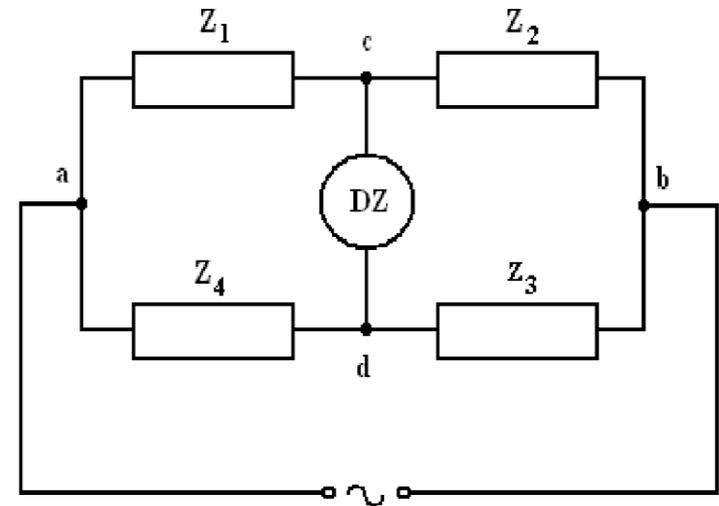
$$z_1 e^{j\varphi_1} \cdot z_3 e^{j\varphi_3} = z_2 e^{j\varphi_2} \cdot z_4 e^{j\varphi_4}$$

$$z_1 \cdot z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = z_2 \cdot z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}$$

$$|z_1 \cdot z_3 = z_2 \cdot z_4$$

$$|\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$$

- **! Il y a certaines limites de branchement afin de pouvoir équilibrer le pont. Car dans certains branchements il est impossible.**



8. Mesure d'impédances

■ Pont de Wien

Le schéma équivalent en série est caractérisé par la partie résistive, la partie capacitive et l'angle de pertes $tg\delta_x$

$$tg\delta_x = \frac{U_R}{U_C} = \frac{IR_x}{I \frac{1}{\omega C_x}} = \omega R_x C_x$$

État d'équilibre $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$

$$\left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) R_3 = R_2 \left(R_4 - j \frac{1}{\omega C_4} \right)$$

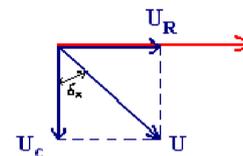
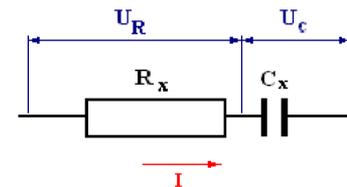
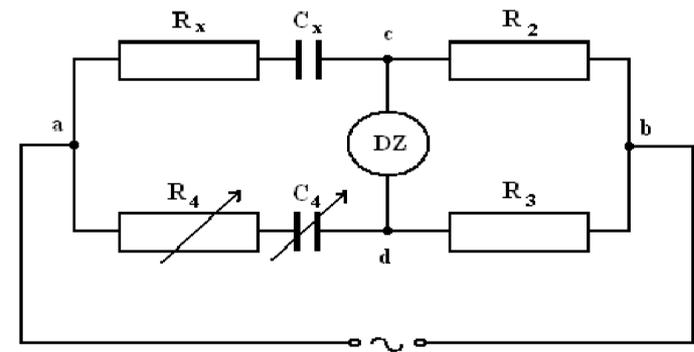
$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3} = R_4 \frac{R_2}{R_3}$$

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2}$$

Il faut choisir des éléments qui ne participent que dans une équation. Si non on risque d'équilibrer un élément, mais de déséquilibrer un autre..

$$tg\delta_x = \omega R_4 C_4$$

Ce pont est utilisé par des condensateurs de faibles pertes



8. Mesure d'impédances

■ Pont de Nernst

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U_X}{R_X}}{\frac{U_X}{1/\omega C_X}} = \frac{1}{\omega R_X C_X}$$

■ Équation d'équilibre $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$

$$\frac{R_X R_3}{1 + j\omega R_X C_X} = \frac{R_2 R_4}{1 + j\omega R_4 C_4}$$

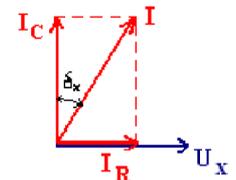
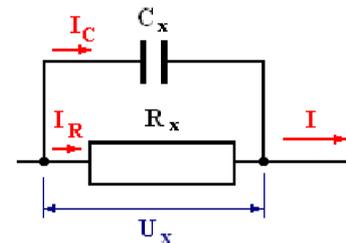
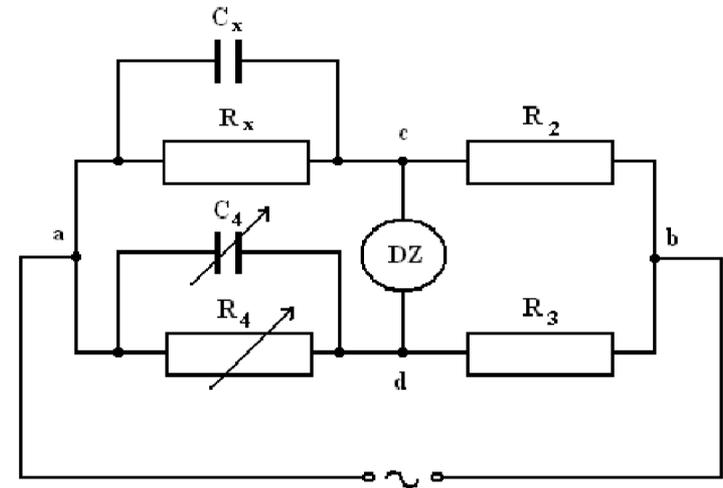
$$R_X R_3 (1 + j\omega R_4 C_4) = R_4 R_2 (1 + j\omega R_X C_X)$$

$$R_X = R_4 \frac{R_2}{R_3}$$

$$C_X = C_4 \frac{R_3}{R_2}$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{1}{\omega R_4 C_4}$$

On utilise le schéma équivalent en parallèle pour des condensateurs à plus grandes pertes.



8. Mesure d'impédances

■ Pont de Shering

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

$$\left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) \frac{R_3}{1 + j\omega R_3 C_3} = -j \frac{1}{\omega C_4} R_2$$

$$R_x R_3 - j \frac{R_3}{\omega C_x} = -j \frac{R_2}{\omega C_4} + \frac{R_2 R_3 C_3}{C_4}$$

$$R_x = R_2 \frac{C_3}{C_4}$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega R_x C_x = \omega C_3 R_3$$

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2}$$

Le transformateur est élévateur. Il est nécessaire pour augmenter la tension à 10kV, la tension à laquelle travaillent les câbles souterrains. La partie sous haute tension est isolée sous un couvercle métallique, mais a la masse.

Utilisé pour la mesure de capacités et des pertes dans un câble. Utilisé dans la production des câbles

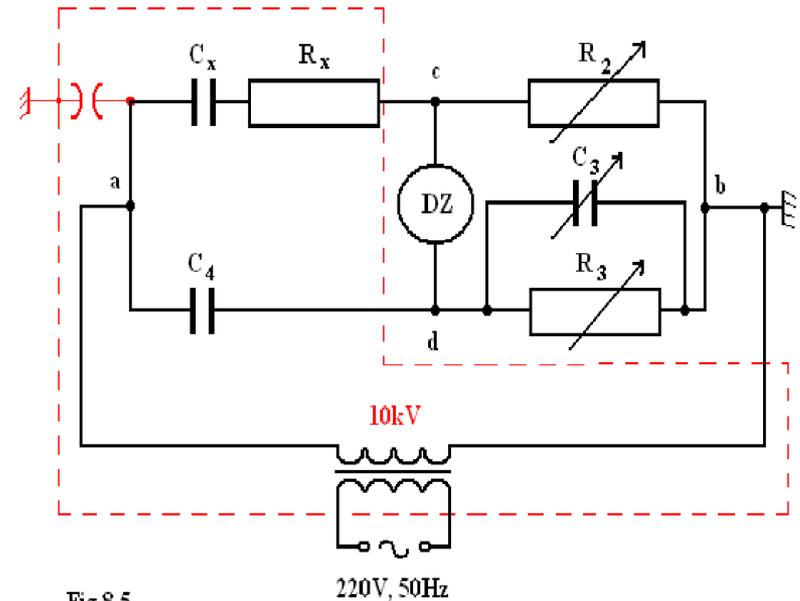


Fig.8.5

8. Mesure d'impédances

- **Méthode de résonance pour la mesure de condensateurs**

Le condensateur et la self sont idéaux. Ces deux éléments en parallèle présentent un circuit de résonance parallèle. A l'état de résonance $\omega L = 1/\omega C$ et la valeur de la tension aux bornes du circuit $U_{VE} = U_{VEmax}$. A ce moment $C = C_1$. Entre les deux bornes on branche la capacité à mesurer C_X .

En parallèle : $C_{ep} = C_1 + C_X$

On diminue C_1 pour atteindre l'état d'équilibre

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_{ep}} \rightarrow C = C_2 \quad C_1 = C_2 + C_X$$

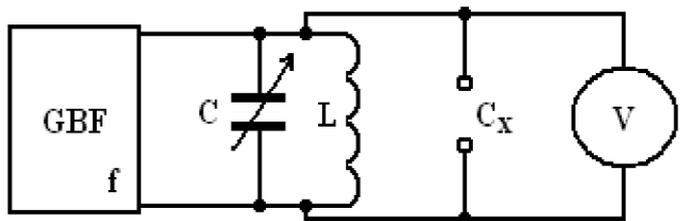


Fig.8.6

$$C_X = C_1 - C_2$$

La valeur de la capacité variable avant et après le branchement de la capacité inconnue.

8. Mesure d'impédances

- **Mesure de bobines (inductances)**
 - **Pont de Maxwell-Wien**

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

$$(R_X + j\omega L_X) \frac{R_3}{1 + j\omega R_3 C_3} = R_2 R_4$$

$$R_X R_3 + j\omega L_X R_3 = R_2 R_4 + j\omega R_3 C_3 R_2 R_4$$

$$R_X = R_2 \frac{R_4}{R_3}$$

$$L_X = C_3 R_2 R_4$$

Facteur de qualité $Q_X = \frac{\omega L_X}{R_X}$

$$Q_X = \frac{\omega C_3 R_2 R_4}{R_2 \frac{R_4}{R_3}} = \omega C_3 R_3$$

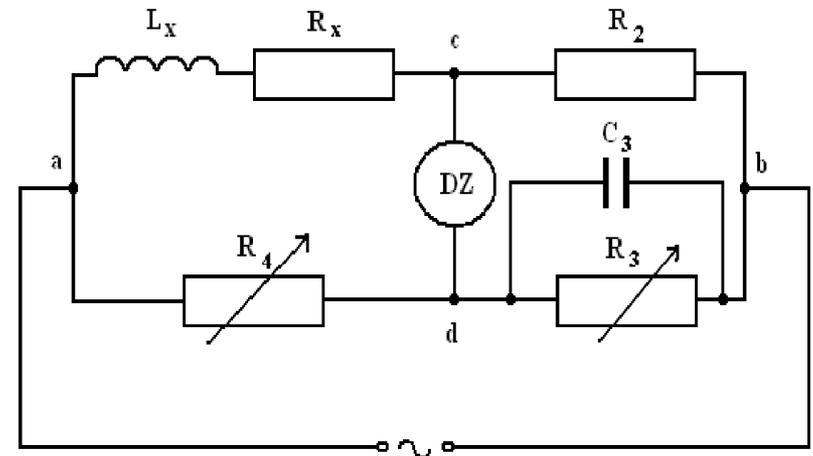


Fig 8.7

8. Mesure d'impédances

- **Mesure de bobines (inductances)**

- **Méthode de résonance (Q-mètre)**

La méthode de résonance est très répandue pour mesurer L_x . Les deux voltmètres sont les appareils électroniques. A l'aide de V_2 on contrôle la tension aux bornes de C . Au début on augmente la tension jusqu'à ce que V_1 montre la valeur préalablement définie. Après on fait varier C . V_2 doit augmenter quand on s'approche à l'état de résonance. Au moment du résonance $U_{V1} = U_{V2}$.

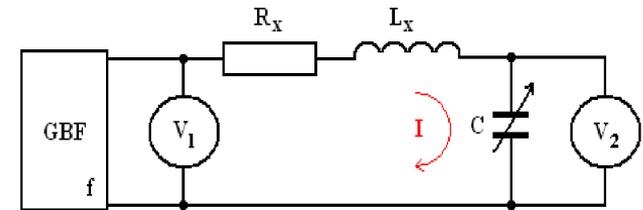


Fig.8.8

$$U_{2\max} = I.X_C = \frac{I}{\omega C} \qquad \frac{1}{\omega C} = \omega L_X$$

$$U_{2\max} = I\omega L_X \qquad Z_{rés} = R_X$$

Grâce à cette méthode on trouve directement la valeur Q_x par le simple rapport $U_{2\max}/U_1$.

En général on prend $U_1 = 1V$ et on a $U_2 = Q_x$. Donc Q_x est mesuré à partir d'une lecture du voltmètre V_2 .

$$U_1 = I.R_X \rightarrow \frac{U_{2\max}}{U_1} = \frac{I\omega L_X}{I R_X} = Q_X$$

8. Mesure d'impédances

- **Mesure des inductances mutuelles**

$$E_2 = j.\omega.M.I_{L_1}$$

$$E_2 = U_{VE}$$

$$I_{L_1} = I_A$$

$$M = \frac{U_{VE}}{\omega I_A} = \frac{U_{VE}}{2\pi f I_A}$$

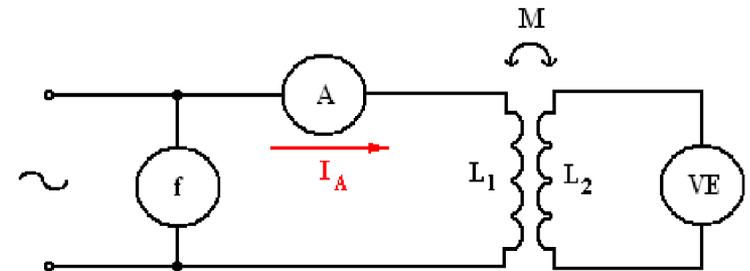


Fig.8.9

8. Mesure d'impédances

■ *Mesure des inductances mutuelles*

■ *Pont de Maxwell-Wien*

- Branchement en coïncidence

$$L_{ep_1} = L_1 + L_2 + 2M$$

- Branchement en opposition

$$L_{ep_2} = L_1 + L_2 - 2M$$

$$M = \frac{L_{ep_1} - L_{ep_2}}{4}$$

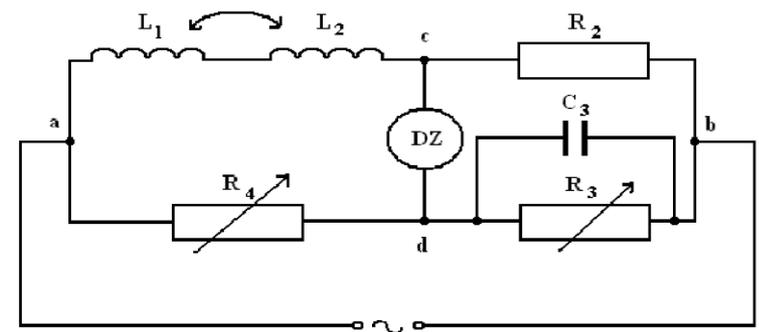
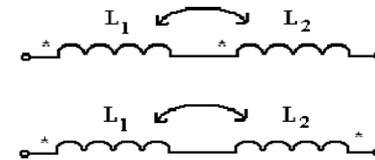


Fig.8.10

9. Appareils électroniques de mesure

- **Appareils électroniques analogiques** – La grandeur physique, qui par son origine est toujours analogique, est traitée de façon analogique et le résultat est aussi une grandeur analogique
- **Appareils électroniques numériques** – dans ces appareils la grandeur physique mesurée, qui est par son origine analogique, est convertie en grandeur numérique et le résultat est en façon numérique.
- **Généralités**
 - **Avantages:**
 - sensibilité: extrêmement précises. Il peuvent mesurer $U=10^{-9}V$, $I=10^{-19}A$;
 - leur consommation propre est pratiquement négligeable à cause de la résistance d'entrée qui est supérieur à $1M\Omega$
 - leur bande de fréquences est très large $BF(0-10^{15})Hz$
 - ces appareils permettent de réaliser facilement la protection de surcharge
 - réalisation single de différentes fonctions de transfert pour la mesure des valeurs efficaces, moyennes et maximales
 - **Inconvénients:**
 - exigent une alimentation additionnelle
 - les appareils sont relativement chers
 - le schéma de fonctionnement de ces appareils est relativement compliqués
 - réparation impossible –changement des parties endommages.

9. Appareils électroniques de mesure

■ **Amplificateurs de mesure (AM)**

■ **Caractéristiques de AM**

1. **L'impédance d'entrée (Z_i)** – C_i est une capacité parasite càd inévitable qu'on essaie de réduire **$C < 20\text{pF}$** . Son influence peut être remarquée en très hautes fréquences
2. **La coefficient d'amplification (K)**

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_s}{\dot{U}_e} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = k \ell^{j\varphi_k} = k(\omega) \ell^{j\varphi_k(\omega)}$$

Selon la grandeur à amplifier ils sont: de tension K_u , de courant K_i , de puissance K_p .

Il y a des **AM** commencent leur fonctionnement à zéro – **AM** en continu. Il provoquent des erreurs à hautes tensions.

La variation du module et de l'argument en haute et bases fréquence s'appelle distorsion fréquentielle.

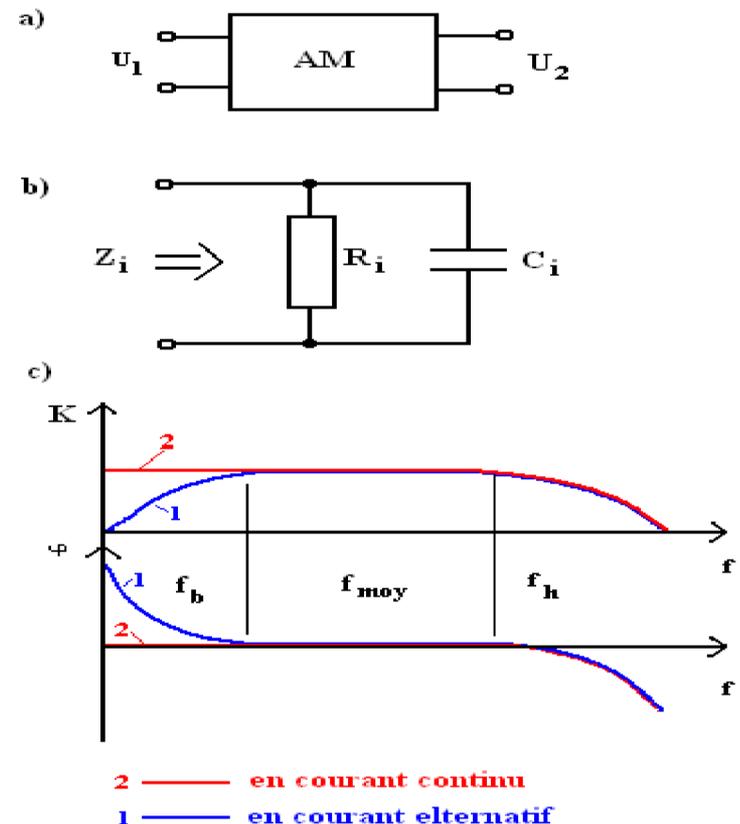


Fig.9.1

9. Appareils électroniques de mesure

- **Montages fondamentaux** – fig.9.2 a).

- Les amplificateurs opérationnels sont des amplificateurs intégrés
- Caractéristiques à la base desquelles ont décrit le fonctionnement:

$$Z_i \approx \infty$$

$$\Delta u_e = 0$$

$$K \approx \infty$$

$$Z_s \approx 0$$

- **Amplificateur non inverseur** – fig.9.2 b)

$$\begin{cases} u_e = i_s R_1 \\ u_s = (R_1 + R_2) i_s \end{cases} \rightarrow K = \frac{U_s}{U_e} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- Il est préférable d'avoir $K=10^n$.

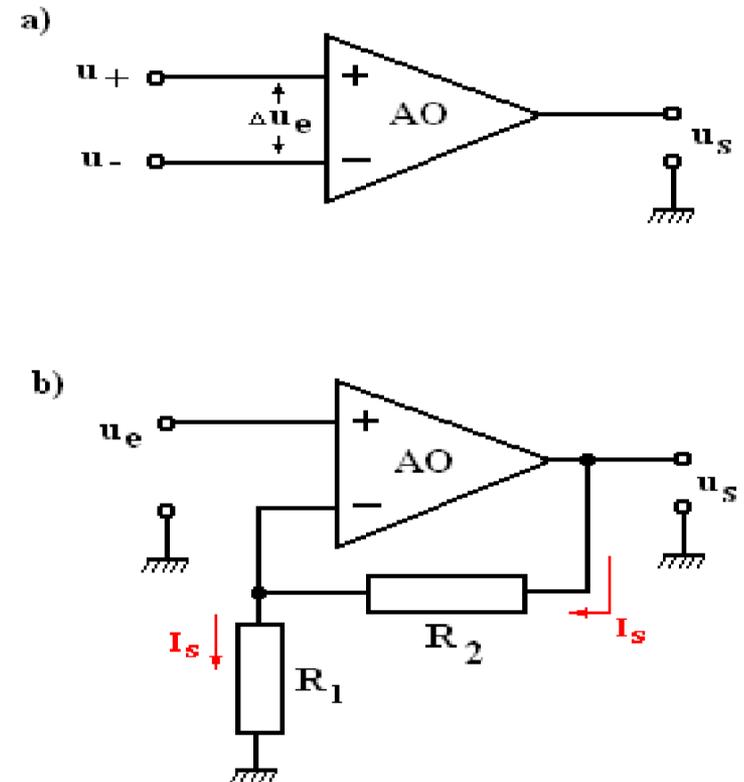


Fig.9.2

9. Appareils électroniques de mesure

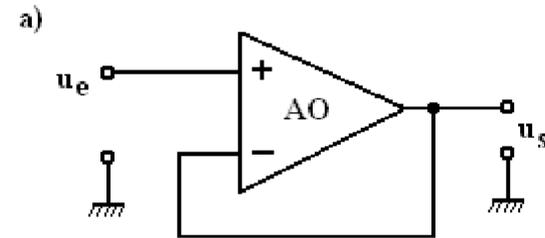
- **Suiveur non inverseur** – fig.9.3 a).

$$K = 1$$

$$R_2 = 0$$

$$R_1 = \infty$$

$$\frac{U_s}{U_e} = 1 \Rightarrow U_s = U_e$$



- **Amplificateur inverseur** – fig.9.3 b)

$$K = \frac{u_s}{u_e} \quad u_e = iR_1 \quad K = -\frac{R_2}{R_1}$$
$$u_s = -iR_2$$

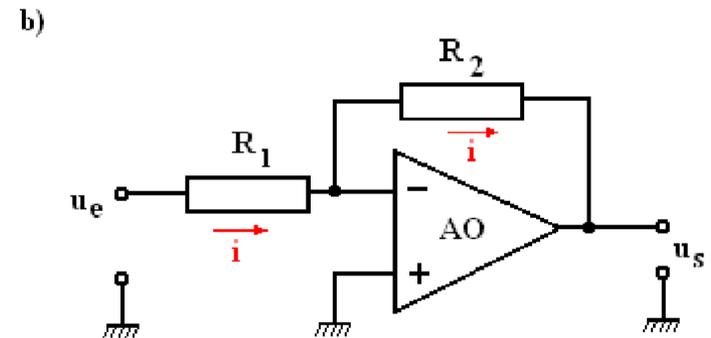


Fig.9.3

9. Appareils électroniques de mesure

- **Amplificateur intégrateur** – fig.9.4 a).

$$K = \frac{u_s}{u_e}$$

$$u_e = iR \rightarrow i = \frac{u_e}{R}$$

$$u_s = -\frac{1}{RC} \int u_c dt$$

$$u_s = -u_c = -\frac{Q_c}{C} = -\frac{1}{C} \int idt$$

- **Amplificateur différentiateur** – fig.9.4 b)

$$K = \frac{u_s}{u_e}$$

$$u_e = u_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int idt \quad \Bigg/ \quad \frac{d}{dt} \rightarrow \frac{du_c}{dt} = \frac{i}{C} \rightarrow i = C \frac{du_c}{dt}$$

$$u_s = -iR = -CR \frac{du_c}{dt}$$

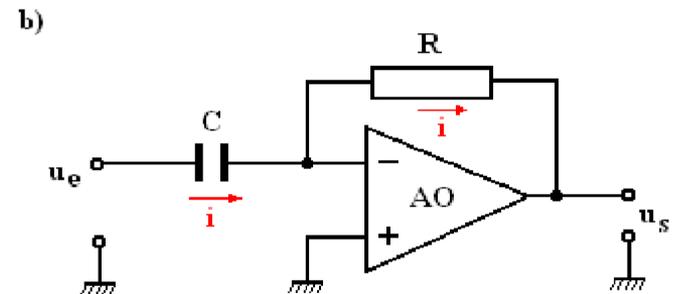
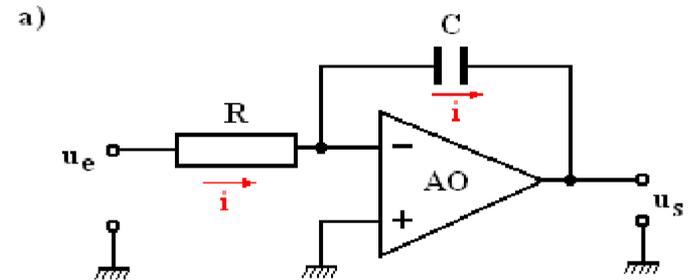


Fig.9.4

9. Appareils électroniques de mesure

- ***Voltmètre électronique analogique***

On les sépare en 2 groupes: en courant continu et en courant alternatif

- 1. ***Voltmètre électronique en courant continu***

- a) à l'amplification directe

R_f , C_f – composants du filtre de tension. En continue la tension passe directement vers le AO car la bobine avec C_f est coupée. On choisit la valeur de C_f de sorte qu'il court-circuite les harmoniques alternatives.

Après il y a le circuit de protection composé de deux diodes en opposition. L'AO ne supporte pas des tensions supérieures à 1V. La protection parfaite est celle des diodes. Elle sont branchées de cette façon pour bloquer la tension qui a deux sens. Au-delà de 0,7 V une des diodes est court-circuitée selon le sens de la tension et l'AO est protégé.

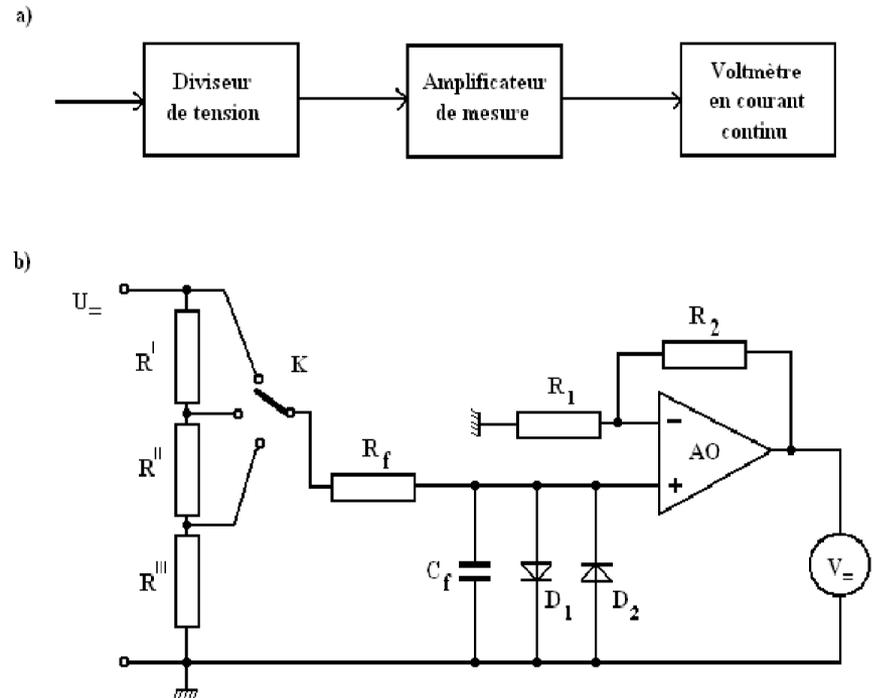


Fig.9.5

9. Appareils électroniques de mesure

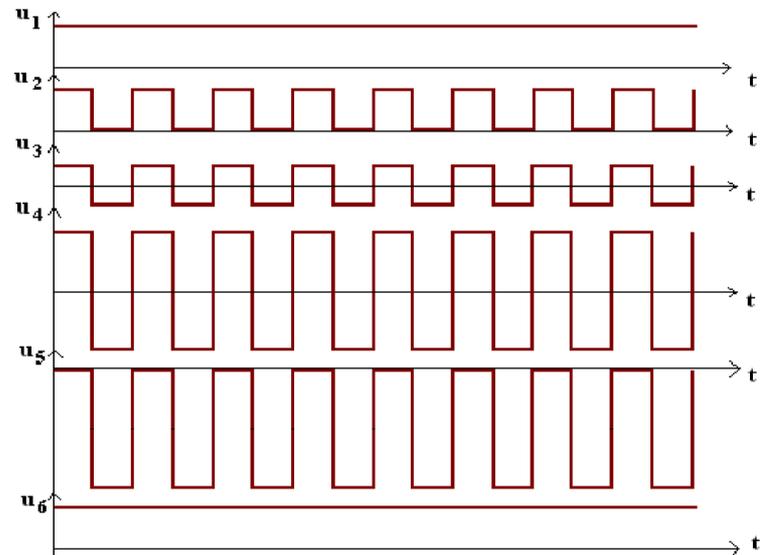
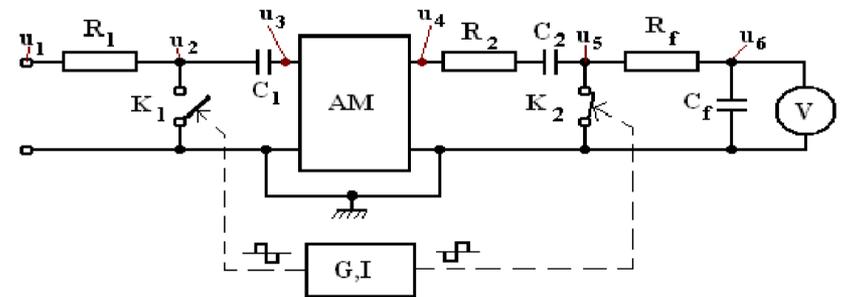
■ ***Voltmètre électronique analogique***

1. Voltmètre électronique en courant continu

b) par conversion préalable (pour de petites tensions)

A la fin on a un circuit de filtrage à l'aide duquel on transforme le signal alternatif créneau en signal continu comme à

l'entrée, mais il est amplifié 100 ou 1000 fois par rapport au signal d'entrée



9. Appareils électroniques de mesure

- ***Voltmètre électronique analogique***

2. Voltmètre électronique en courant alternatif

a) Par amplification directe

Le problème cette fois-ci est la mesure de tensions alternatif à haute fréquence

Le détecteur doit convertir la tension en tension continue

Ce montage utilise deux thermo-couples (TC) qui servent à transformer la tension alternatif en tension continue. L'orientation de deuxième (TC2) est en opposition par rapport au premier. Quand les tensions de deux TC s'approches, la tension qui est pratiquement la tension de chauffage du TC2., évidemment les deux tension qui provoquent le échauffement sont égales càr la tension continue est égale à la valeur efficace de la tension alternative.

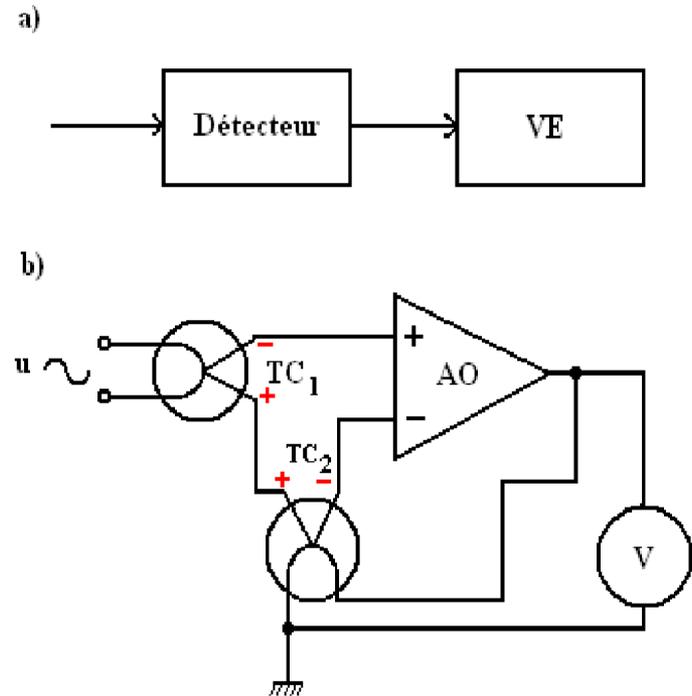


Fig9.7

9. Appareils électroniques de mesure

■ *Ampèremètres électronique analogique*

a)

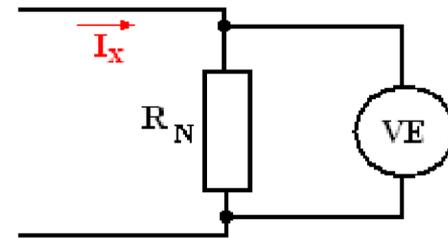
$$I_X = \frac{U_{VE}}{R_N}$$

b)

$$U_{VE} = R_N I_X$$

$$I_X = \frac{U_{VE}}{R_N}$$

a)



b)

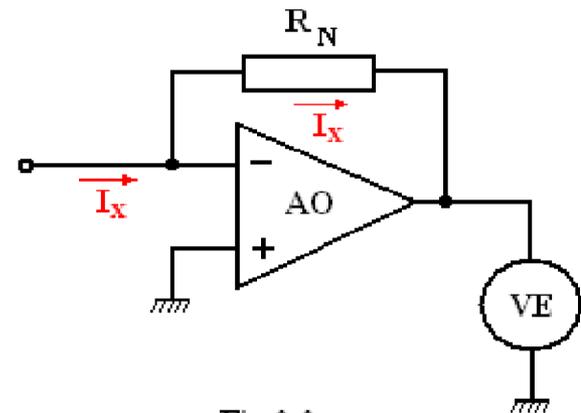


Fig 9.9

9. Appareils électroniques de mesure

■ *Ohmmètres électronique analogique*

- On mesure les résistances selon plusieurs schémas de branchement
- **$E = \text{const}$**
- **R_N – résistance étalon**
- Le circuit de mesure est formé par la source et la résistance étalon et en série la résistance à mesurer

$$U_{VE} = E \frac{R_X}{R_X + R_N}$$

- L'inconvénient de cette mesure est que l'échelle de mesure n'est pas linéaire. Presque toujours le schéma a) est utilisé pour la mesure de **$R_X < 1\text{M}\Omega$** . Pour la mesure de **$R_X > 1\text{M}\Omega$** on branche le **VE** en parallèle d **R_N** – b). Dans ce cas l'échelle est non linéaire et inverse.

$$U_{VE} = E \frac{R_N}{R_N + R_X}$$

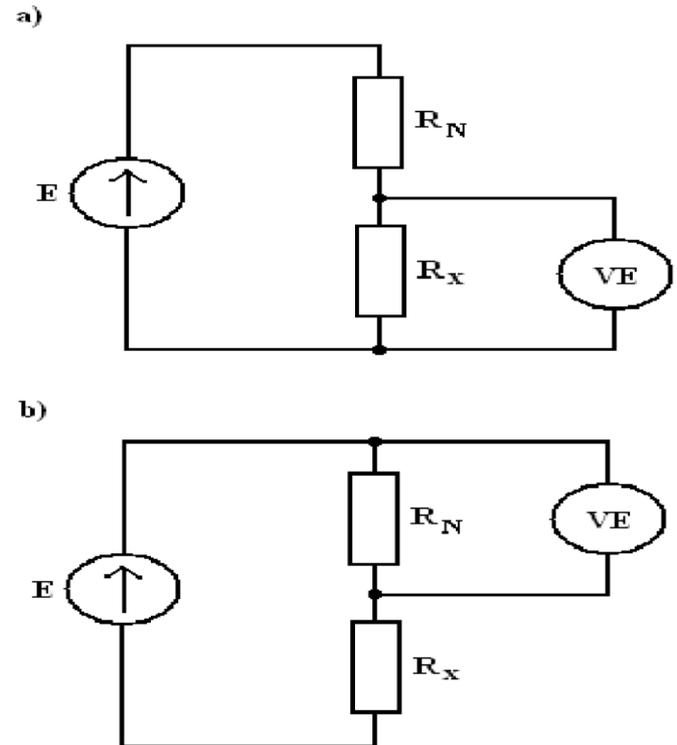


Fig.9.8

9. Appareils électroniques de mesure

■ *Ohmmètres électronique analogique*

- Le schéma a) est utilisé pour très petites résistances, pour la construction de milli- et micro- ohmmètres. Dans ce cas on utilise une source étalon de courant

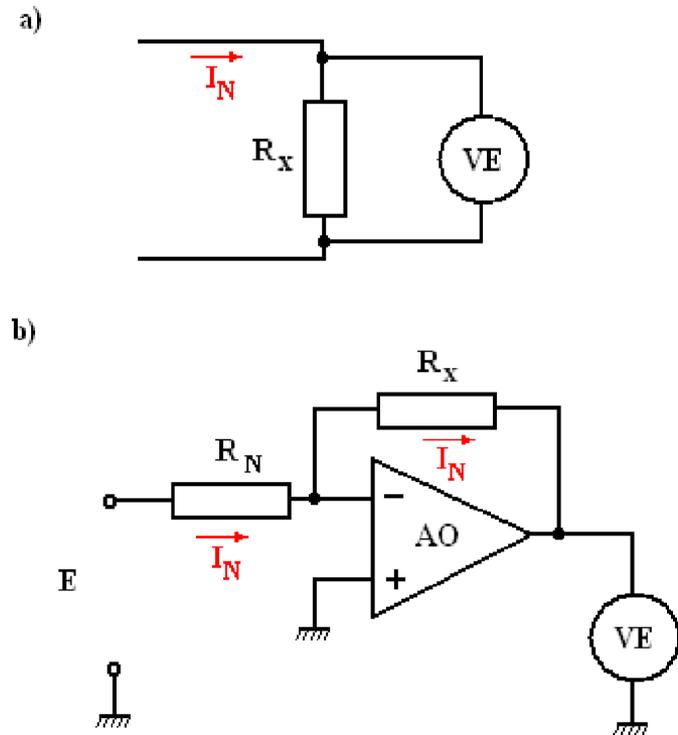
$$R_X = \frac{U_{VE}}{I_N}$$

- Le schéma b) est une solution relativement stable. A l'entrée est appliquée une tension constante

$$U_{VE} = E \frac{R_X}{R_N}$$

- Si on connaît la valeur de la source la bonne précision est de même valeur de R_N . Cela garantit une bonne précision sur la mesure de R_X .

$$R_X = R_N \frac{U_{VE}}{E}$$



Fig_9.11

9. Appareils électroniques de mesure

■ **Fréquencemètres électroniques**

Fréquencemètre à condensateur

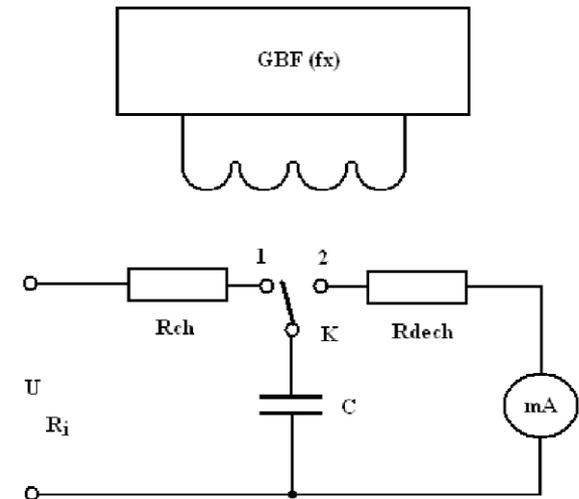
La résistance R_{ch} est nécessaire car au premier moment quand le condensateur n'est pas chargé il représente un court circuit et la source sera endommagée si la résistance manque .

$$I_{mA} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T i_{dech} dt = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T i_{ch} dt = \frac{Q}{T} = \frac{CU}{T}$$

$$\text{Si } R_i + R_{ch} = R_A + R_{dech} \Rightarrow i_{ch} = i_{dech}$$

$$T = \frac{1}{f} \quad I_{mA} = CUf \quad f = \frac{I_{mA}}{C.U}$$

Si le condensateur est étalon et si la tension qui alimente le circuit est stable par le courant mesuré par le milliampèremètre on obtient la fréquence.



9. Appareils électroniques de mesure

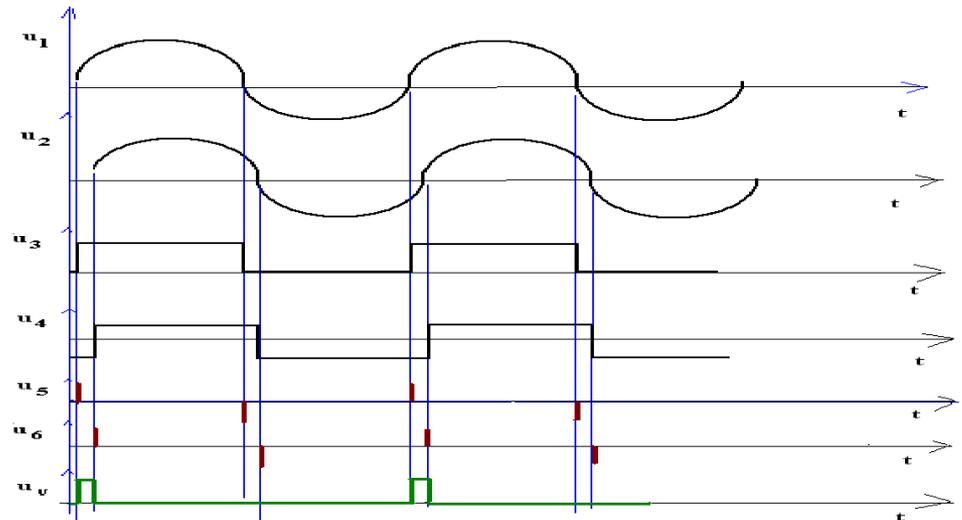
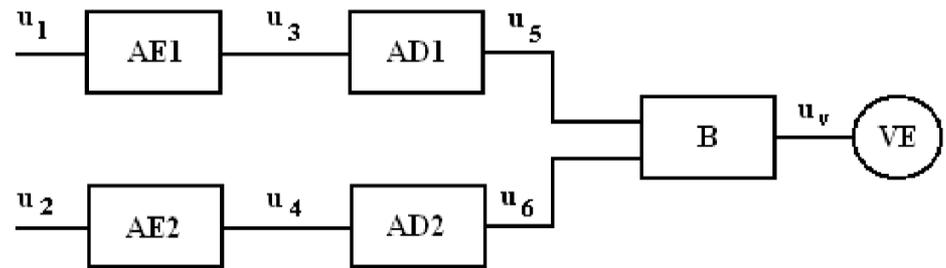
■ *Phasemètres électroniques*

AE – amplificateur
arrêteur

AD – amplificateur
différentiateur

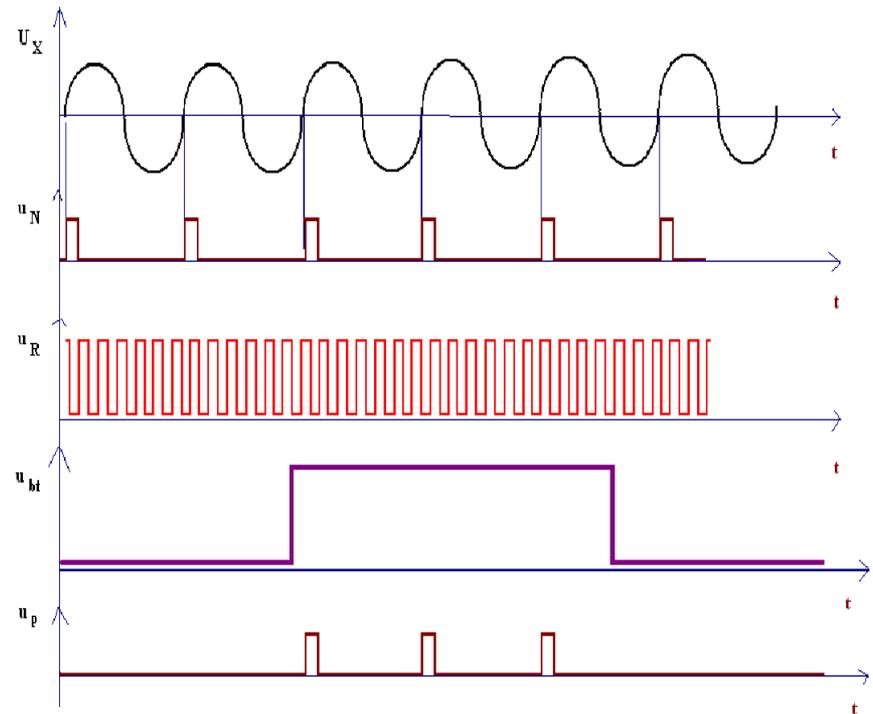
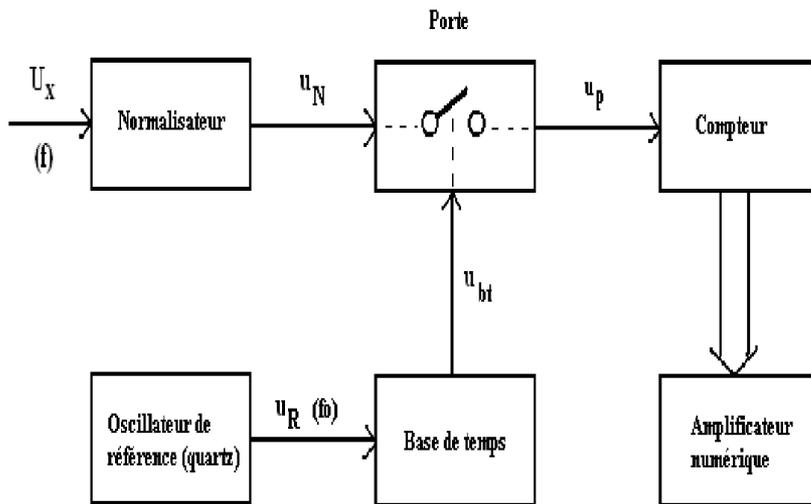
B – bascule

$$U_{VE} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} U d\omega t = \frac{U}{2\pi} \varphi$$

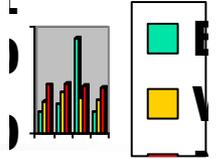


9. Appareils électroniques de mesure

■ *Appareils numériques – fréquencemètre numérique*



9. Appareils électroniques de mesure



■ Appareils numériques – fréquencesmètre numérique

- Le normalisateur convertit le signal en série d'impulsions rectangulaires qui marquent le début de chaque période. Cette série est envoyée à la partie. A l'intérieur de l'appareil il y a un oscillateur de référence de haute fréquence (**5 ou 10Mhz**). Il est basé à l'effet piézoélectrique. La série d'impulsions est envoyée vers la base du temps qui est un diviseur de tension c'ad la fréquence de l'oscillateur de référence est divisée. La tension à la sortie de la base de temps est envoyée vers le même module (la port) qui est un élément électronique. La tension u_{bt} est la commande qui ouvre la port. Pendant l'intervalle de temps quand u_{bt} se produit la port est ouverte. Dans ce cas les impulsions, qui passent par la port sont u_p . Après la port se ferme. Ces impulsions u_p sont envoyées au compteur, qui les compte et renvoie leur nombre à l'amplificateur numérique.
- Le nombre des impulsions $N(u_p)$ est de l'ordre de 1000.

$$N = \frac{T_{BT}}{T_x}$$

$$N = \frac{f_x}{f_{BT}} = n \frac{f_x}{f_o}$$

- La précision d'un fréquencesmètre numérique est très élevée car f_o est connue d'une excellente précision et manque de synchronisation entre la T_{bt} et T_x . Ces deux périodes ne commencent pas au même moment.

$$\delta_{f_o} = (10^{-4} \div 10^{-5})\%$$

$$\delta_{f_x} = \delta_{f_o} + \frac{1}{N}$$

- L'appareils numérique dont la précision est meilleur.

9. Appareils électroniques de mesure

■ *Appareils numériques – péri odomètres numériques*

- Ces appareils sont utilisés pour la mesure de périodes est après pour des mesures de tensions de bas fréquence
- Les impulsions de l'oscillateur sont envoyées vers la porte qui est commandée par le signal inconnu qui est normalisé et qui va vers la porte par le bascule . Il ouvre et le signal entre dans le compteur pendant la période. Après la porte est fermée.

$$N = \frac{T_X}{T_o} = f_o T_X$$

- Les péri odomètres numériques sont utilisés pour la construction des ohmmètres numériques. En fait ce sont des fréquencemètres qui à partir d'un commutateur deviennent péri odomètres.

