

MULTIPONT E.N.B

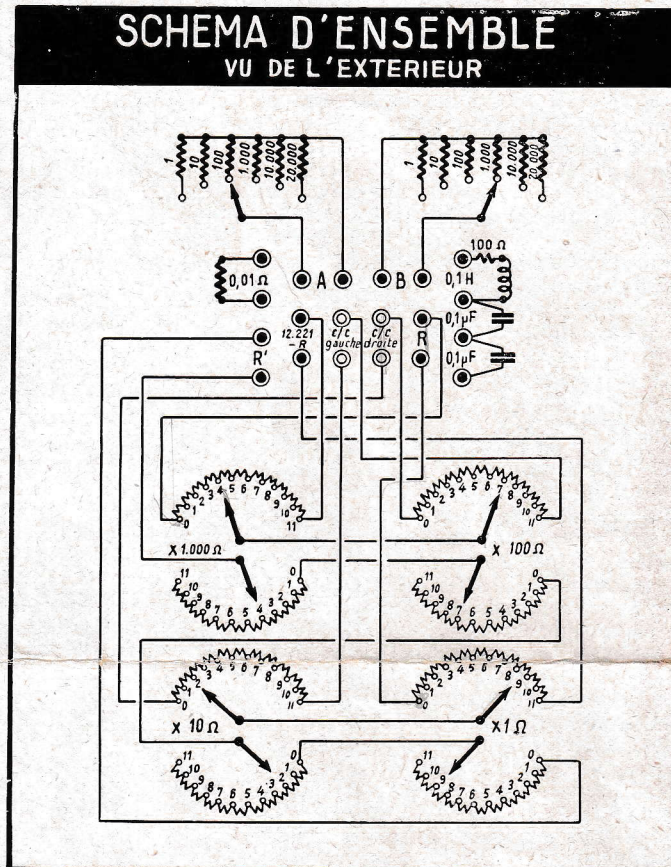
ENSEMBLE DE PRÉCISION A USAGES MULTIPLES POUR LABORATOIRES

MODÈLE

TYPE PM 88

DÉPOSÉ

Procédés E. N. BATLOUNI • Licencié ès-Sciences • Ingénieur E.S.E. et Radio E.S.E.



OBJET

Qui bien connaît les ponts, domine de haut toute la technique des mesures électriques ; aussi, les mesures au pont tiennent-elles la première place dans l'enseignement. Dans l'industrie, les ponts de mesures de toutes catégories occupent aussi une place importante, tant dans le laboratoire d'études et de recherches que dans l'atelier de mise au point et de dépannage.

La raison de cette supériorité réside en ce que les mesures au pont, étant basées sur des méthodes de zéro, sont à l'abri des erreurs dues à l'instabilité du courant de mesure ; de surcroît, leur sensibilité peut être extrêmement poussée. Aussi, sont-elles les seules employées dans tous les cas où une grande précision est requise.

L'appareil universel que nous présentons convient à tous les usages des ponts de mesures, aussi bien dans l'enseignement que dans toutes les branches de l'industrie, puisqu'il permet de constituer rapidement tous les types classiques de ponts. Ainsi, en offrant la possibilité de réaliser le montage approprié à chaque cas, l'appareil permet

de mesurer, dans les meilleures conditions de commodité et de précision, les petites, moyennes et grandes résistances, les capacités avec leur angle des pertes, les self-inductions avec leur surtension, les inductions mutuelles, les fréquences, la distortion harmonique, les tensions et les intensités, et ce, dans des limites très étendues.

COMPOSITION

Le MULTIPONT se compose essentiellement des organes suivants :

- 1°) Deux bras de proportion variables à commutateur, permettant d'obtenir 1, 10, 100, 1 000, 10 000 et 20 000 Ω chacun ;
- 2°) Deux étalons de capacité de 0,1 μF chacun ;
- 3°) Un étalon de self-induction de 0,1 H ;
- 4°) Un étalon de faible résistance de 0,01 Ω ;
- 5°) Quatre doubles décades de 11 fois 1, 10, 100 et 1 000 Ω , permettant d'obtenir les unités, dizaines, centaines et milliers d'ohms pour chaque groupe dont l'un comporte des décades montées en résistances variables, et l'autre des

décades montées en potentiomètres ; chaque double-décade est commandée par une seule manette. Les deux résistances variables constituées par ces doubles décades peuvent être rendues, soit identiques, soit complémentaires, et ce, par le simple déplacement d'une barrette de court-circuit.

L'ensemble est logé dans un coffret en matière moulée de $26 \times 16 \times 10$ cm, et tous les organes sont électriquement accessibles de l'extérieur, par l'intermédiaire de bornes universelles judicieusement réparties sur la façade de l'appareil ; sur cette dernière, sont gravées les inscriptions relatives à chaque borne ou organe. Ainsi, les différents montages peuvent être facilement réalisés à l'aide de connexions extérieures, conformément aux schémas dressés dans les deux tableaux reproduits ci-après.

Pour l'enseignement, ce système offre donc un grand intérêt pédagogique puisqu'il permet une parfaite connaissance du montage utilisé. Pour l'industrie, l'appareil présente le grand avantage d'être économique, du fait qu'il permet de remplacer une multitude d'appareils indispensables.

DESCRIPTION

Éléments étalonnés

Les résistances sont bobinées en fil de constantan, pour les faibles valeurs, et elles sont du type à couche de carbone à haute stabilité, pour les grandes valeurs.

Les résistances constituant les bras de proportion sont prévues pour une dissipation maximum de 1 W, en régime permanent. Les résistances constituant les doubles décades sont établies pour un débit maximum, en régime permanent, de 500 mA pour les décades des ohms, de 150 mA pour les décades des dizaines, de 50 mA pour les décades des centaines et de 15 mA pour les décades des milliers d'ohms. Enfin, la résistance étalon de 0,01 Ω est établie pour un débit permanent maximum de 5 A. L'influence de la capacité et de la self-induction réparties y est négligeable aux fréquences acoustiques.

Les capacités étalons sont choisies du type non-inductif et logées dans des tubes en verre hermétiquement scellés après étuvage dans le vide, afin de conserver dans le temps un très faible angle des pertes.

L'étalon de self-induction est bobiné en « sandwich » sur une carcasse à gorges logée dans un pot fermé en poudre de fer ; on obtient ainsi une bonne surtension, une faible capacité répartie et peu de fuites ; la résistance en continu est ajustée à 100 Ω afin de permettre d'en tenir facilement compte dans les calculs.

Afin que, dans tous les cas, la précision des mesures soit de 1 %, tous les éléments sont étalonnés à moins de 0,5 %, la stabilité étant du même ordre.

Signalons enfin que les résistances de 1 Ω sont étalonnées une fois montées dans l'appareil, afin de tenir compte de la résistance de contact des commutateurs ainsi que de celle des connexions et des bornes.

Commutateurs

Les commutateurs employés sont à double contact en argent et à « auto-nettoyage » (deux rampes en parallèle par circuit), ce qui leur confère une résistance de contact très faible et absolument constante.

Afin de faciliter les manœuvres et la recherche de l'équilibre, les commutateurs employés pour les quatre doubles décades sont à rotation continue, sans butée ; ils comportent 12 positions, dont une est nulle.

Bornes

Tous les circuits aboutissent sur des bornes universelles du type « imperdable » prévues pour connexion par fil, cosse ou fiche banane. Ce dernier mode est le plus pratique pour les laboratoires où l'on a souvent à changer de montage ; aussi, en vue de permettre l'établissement de connexions multiples sur une même borne, des douilles auxiliaires fournies avec l'appareil peuvent être adaptées instantanément sur celle-ci, permettant d'y placer plusieurs fiches bananes.

UTILISATION

Les deux tableaux ci-après reproduisent les schémas théorique et de montage pratique des différents types classiques de ponts, ainsi que, sous forme condensée et explicite, les formules théoriques et numériques applicables dans chaque cas.

Réalisation des montages

Pour effectuer un montage, les connexions entre les différents organes seront établies conformément au schéma de montage pratique correspondant ; ce travail est facilité par le fait que les inscriptions portées sur l'appareil sont conformes aux notations employées dans son schéma d'ensemble, ainsi que dans les schémas correspondant aux différents montages.

Notations

Les notations employées ont généralement les significations suivantes :

$R = R'$ = résistance variable, à décades ;

R'_1 = valeur prise par R' dans une première mesure ;

R'_2 = valeur prise par R' dans une seconde mesure ;

R_a = résistance auxiliaire extérieure ;

$R_{a(\min)}$ = valeur minimum de R_a ;

$R_{a(\max)}$ = valeur maximum de R_a ;

R_o = résistance étalon extérieure ou de 0,01 Ω ;

R_h = rhéostat de réglage de débit ;

R_p = résistance parallèle de C_x ou de L_x ;

R_s = résistance série de C_x ou de L_x ;

R_x = résistance inconnue à mesurer ;

r = résistance de l'étalon de 0,1 H (100 Ω) ;

A et B = résistances des « bras de proportion » ;

$C = C'$ = capacités étalons de 0,1 μF ;

C_a = capacité de dérivation ;

C_o = capacité étalon extérieure ;

C_x = capacité inconnue à mesurer ;

L = self-induction étalon de 0,1 H ;

L_o = self-induction étalon extérieure ;

L_x = self-induction inconnue à mesurer ;

M_x = induction mutuelle inconnue à mesurer ;

f = fréquence ;

$\omega = 2\pi f$ = pulsation ;

E = étalon de force électromotrice ;

U = tension ou force électromotrice à mesurer ;

I = intensité du courant.

$\tan \delta$ = tangente de l'angle des pertes ;

Q = coefficient de surtension ;

P = pile ;

S = source à fort débit ;

Ω = ohm ;

F = farad ;

H = henry ;

Hz = hertz.

Limites de mesure

Pour chaque montage sont indiquées entre parenthèses les limites inférieure et supérieure des valeurs normalement mesurables avec la précision nominale de l'appareil, sous réserve que

l'indicateur de zéro soit bien approprié à la source de courant et qu'il ait une sensibilité suffisante.

La limite inférieure de mesure indiquée dans les tableaux s'entend pour une valeur minimum de R ou R' égale à 10 Ω , valeur au-dessus de laquelle l'interpolation pour obtenir le troisième chiffre significatif peut encore se faire dans de bonnes conditions ; mais, au besoin, en se contentant d'une interpolation plus grossière, une limite inférieure dix fois moindre pourra être atteinte pour une valeur minimum de R égale à 1 Ω .

La limite supérieure de mesure s'entend pour un montage normal ; mais, au besoin, il sera possible de la reculer en faisant appel à certains artifices. Ainsi, dans le pont de *Wheatstone* (1), en connectant en série les résistances R et R' , la formule devient : $R_x = 2 RA/B$, et la limite supérieure de mesure se trouve doublée.

De même, en branchant en parallèle les deux capacités étalons de 0,1 μF dans les ponts de *Sauty* (3 ou 4) ou de *Maxwell* (5 et 7), les formules deviennent respectivement :

$$C_x = 2R/10B \\ \text{et } L_x = 2RB/10^7,$$

et la limite supérieure de mesure se trouve doublée.

D'ailleurs, ces mêmes artifices permettent de reculer également les limites inférieures de mesure.

Sources de courant

Dans chaque cas, il convient d'employer la source de courant qui lui est la plus appropriée.

Les résistances inductives (résistance ohmique d'une bobine, par exemple) ou capacitatives (résistance de grande valeur comportant une capacité répartie non négligeable, par exemple) doivent obligatoirement être mesurées en continu ; dans les autres cas, elles peuvent être mesurées indifféremment en continu ou en alternatif.

La mesure des capacités, des self-inductions et des inductions mutuelles se fait en alternatif ou en courant variable. La fréquence du courant généralement employé, qui doit être parfaitement sinusoïdal, est de 50, 800 ou 1 000 p/s ; mais, quand cela est possible, on utilisera de préférence, une fréquence élevée pour la mesure des faibles valeurs et une fréquence basse pour les grandes valeurs, et ce, afin de ramener l'impédance de l'élément mesuré à une valeur moyenne, pour laquelle la sensibilité de la mesure est généralement la plus grande.

Pour la mesure des faibles résistances à l'aide du pont de *Thomson* (14) ou par la méthode d'opposition (15), il faut employer, dans le circuit principal, une source à fort débit (accumulateur, par exemple).

Enfin, dans tous les cas, il faut veiller à ne pas dépasser les intensités de courant maxima admissibles dans les résistances ; un petit calcul préliminaire fixera sur la tension maximum de la source à utiliser.

Indicateurs de zéro

L'indicateur de zéro sera approprié à la source de courant employée : galvanomètre à zéro central pour les mesures en continu ; écouteur téléphonique, galvanomètre à résonance, oscilloscope cathodique ou trèfle cathodique précédé d'un amplificateur pour les mesures en alternatif ; enfin, galvanomètre balistique pour les mesures en courant variable (transitoire).

La sensibilité de l'indicateur doit être suffisante pour déceler, au moins, une variation de 0,5 p. 100 de l'élément mesuré ; elle sera réglable au moyen de shunts ou de diviseurs de tension appropriés.

Doubles-décades

Chacune des décades des unités, des dizaines, des centaines et des milliers d'ohms est double.

Les éléments d'un premier groupe, connectés en série, constituent la résistance R' , dont la valeur, mesurée aux bornes « R' », est égale à la somme des lectures des quatre décades ; elle peut être variée d'ohm en ohm, de 1 à 12 221 Ω .

Les éléments du second groupe peuvent être connectés de deux manières différentes :

1°) En réunissant les douilles c/c de droite à l'aide de la barrette de court-circuit, on obtient entre les bornes « R » une résistance R égale à R' . Ce montage est utilisé pour constituer deux résistances variables identiques dans les ponts de Wien-Robinson (12) et de Thomson (14).

2°) En réunissant les douilles c/c de gauche, on obtient entre les bornes « 12 221- R » une résistance égale à 12 221 $\Omega - R'$. Ce montage est utilisé pour constituer deux résistances variables complémentaires dans le pont de Pirani (13) ainsi que dans les méthodes d'opposition (15) et potentiométrique (16).

Résistance de compensation de la phase

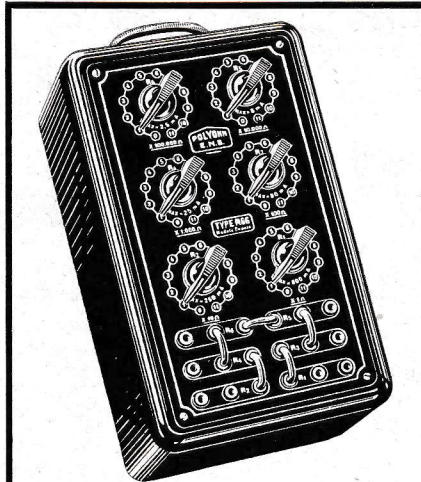
Dans les mesures de capacités et de self-inductions, l'équilibre du pont ne s'obtient que lorsque les conditions d'amplitude et de phase sont satisfaites simultanément. L'équilibrage de la phase s'obtient à l'aide d'une résistance réglable qui sera branchée extérieurement, n'étant pas prévue dans l'appareil.

Dans la plupart des cas, un simple rhéostat de valeur appropriée peut être utilisé ; mais, au cas où l'on désire obtenir une mesure assez précise de l'angle des pertes d'un condensateur ou du coefficient de surtension d'une bobine, il est nécessaire d'employer une résistance variable étalonnée avec précision, qui pourrait être une boîte à décades du même type que celles qui constituent la résistance R ou R' de l'appareil même.

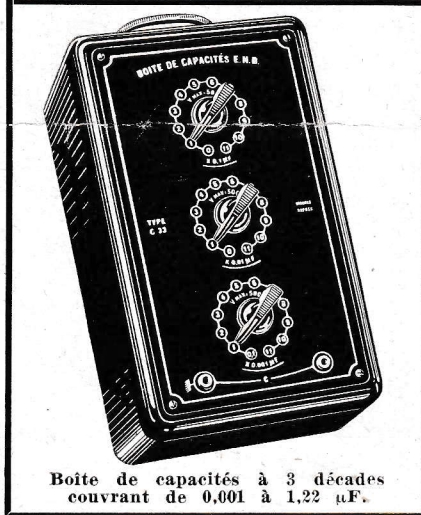
D'ailleurs, cette boîte auxiliaire, qui peut comporter six décades simples de 11 fois 1, 10, 100 1 000, 10 000 et 100 000 Ω , sera utilisée comme résistance principale dans le pont de Maxwell-Hay

pour mesures avec courant continu superposé (6), tandis que la résistance R de l'appareil sera utilisée pour la compensation de la phase ; cette boîte trouvera également son emploi dans les ponts d'Anderson (9), de Carey-Foster (10) et de Pirani (13), ainsi que dans la méthode potentiométrique (16), enfin, partout où, sur les schémas, figure une résistance dénommée R_a .

DEUX AUXILIAIRES DU MULTIPONT



Boîte de résistances à 6 décades couvrant de 1 Ω à 1,22 M Ω .



Boîte de capacités à 3 décades couvrant de 0,001 à 1,22 μF .

Recommandations générales

Les connexions doivent être aussi courtes et peu résistantes que possible, notamment pour la mesure des faibles résistances ou impédances ; elles seront bien isolées entre elles, notamment pour la mesure des grandes résistances ou impédances ; enfin, elles auront entre elles une capacité aussi faible que possible, notamment pour la mesure des hautes impédances. D'ailleurs, il est facile de satisfaire simultanément à ces trois recommandations, grâce à la répartition adéquate des différentes bornes sur l'appareil.

Il va sans dire que, lorsque la source et l'indicateur de zéro sont constitués respectivement par un oscillateur B.F. et un trèfle cathodique ayant une alimentation commune, l'emploi d'un

transformateur de liaison à écran électrostatique est indispensable entre l'un de ces organes et le pont, afin de séparer électriquement les deux circuits.

Emplois accessoires

Grâce à l'accessibilité de ses différents organes, l'appareil peut éventuellement être employé pour divers usages accessoires, dont nous citons, à titre indicatif, les principaux :

1°) Le groupe des quatre décades R ou R' peut remplir la fonction d'une boîte de résistances étalonnées de précision permettant d'obtenir de 1 à 12 221 Ω , par bonds d'un ohm. En branchant R et R' en série, on obtient de 2 à 24 442 Ω , par bonds de deux ohms ; en les branchant en parallèle, on obtient de 0,5 à 6 110 Ω , par bonds de demi ohm.

2°) Le montage des deux groupes de résistances R et R' en « identiques » trouve de nombreuses applications dans tous les cas où l'on a besoin, au même titre qu'un condensateur variable à deux cages, de deux résistances variables identiques à commande commune, pour faire varier la caractéristique de fréquence d'un filtre à deux cellules de résistance-capacité, par exemple ;

3°) Le montage des deux groupes en « complémentaires » permet de constituer un potentiomètre étalonné de précision de 12 221 Ω , susceptible de nombreuses applications, entre autres, pour diviser une tension dans un rapport donné. Il est possible de changer le jumelage des deux groupes, afin de constituer un potentiomètre de valeur dix ou cent fois moindre. Ainsi, pour constituer un potentiomètre de 12 221 Ω , on prend la résistance R' entre les bornes « R' », et la résistance complémentaire 12 221 — R entre la borne supérieure « R » et la borne inférieure « 12 221 — R » (avec barrette de court-circuit à gauche) ; de plus, il faut ramener à zéro la manette de la décade des milliers d'ohms. Et, pour constituer un potentiomètre de 121 Ω , on prend la résistance R' entre les bornes « R' », et la résistance complémentaire 121 — R entre la borne inférieure « 12 221 — R » et la borne inférieure « c/c gauche » (avec barrette de court-circuit enlevée) ; de plus, il faut ramener à zéro la manette des décades des centaines et des milliers d'ohms ;

4°) Les bras de proportion A et B peuvent également être employés pour diviser une tension dans le rapport d'une puissance de 10 ;

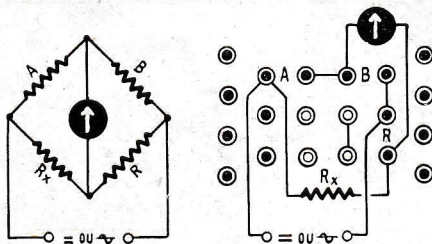
5°) La résistance de 0,01 Ω , la bobine de 0,1 H et les condensateurs de 0,1 μF peuvent, dans de nombreux cas, être utilisés comme étalons de faible résistance, de self-induction et de capacité. De plus, en connectant les deux condensateurs de 0,1 μF , soit en série, soit en parallèle, on obtient deux étalons supplémentaires de 0,05 et 0,2 μF ;

6°) En constituant un circuit résonnant à l'aide de la bobine de 0,1 H et de l'une des capacités de 0,05, 0,1 et 0,2 μF , on peut obtenir des étalons de fréquence de 2 260, 1 600 et 1 130 p/s, respectivement.

1

WHEATSTONE

R



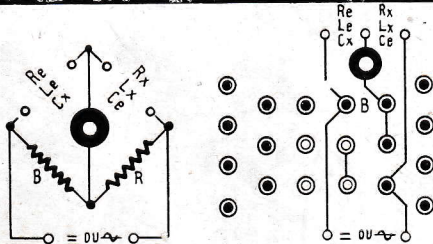
$$R_x = \frac{RA}{B} \Omega \quad (\text{de } 0,01 \Omega \text{ à } 240 \text{ M}\Omega)$$

Dans le pont de Wheatstone et ses dérivés, on peut intervertir la source et l'indicateur de zéro.

2

COMPARAISON

RLC



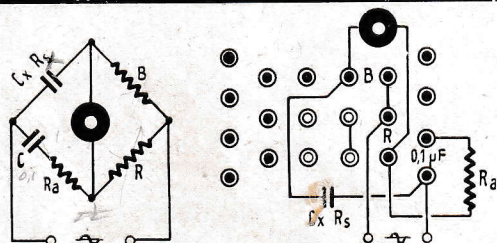
$$R_x = R_e \frac{R}{B} \quad L_x = L_e \frac{R}{B} \quad C_x = C_e \frac{R}{B}$$

$$\text{Erreur en } \pm \% = 100 \frac{R-B}{B} \%$$

3

SERIE SAUTY-WIEN (FAIBLES PERTES)

C



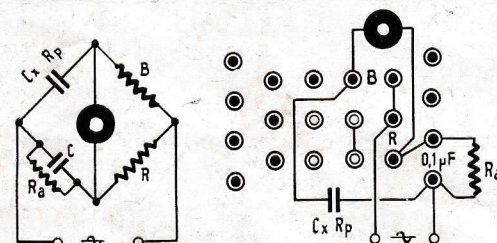
$$C_x = \frac{CR}{B} = \frac{R}{10B} \mu F \quad (\text{de } 100 \mu F \text{ à } 1.200 \mu F) \quad R_s = \frac{R_a B}{R} \quad R_p = \frac{1}{R_s C_x \omega^2}$$

$$\lg \delta = R_s C_x \omega = R_a C \omega = 10^{-7} R_a \omega \quad (\omega = 2 \pi f)$$

4

PARALLELE SAUTY-NERNST (GRANDES PERTES)

C



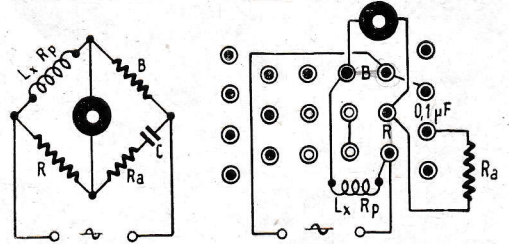
$$C_x = \frac{CR}{B} = \frac{R}{10B} \mu F \quad (\text{de } 100 \mu F \text{ à } 1.200 \mu F) \quad R_p = \frac{R_a B}{R} \Omega$$

$$\lg \delta = \frac{1}{R_p C_x \omega} = \frac{1}{R_a C \omega} = \frac{10^{-7}}{R_a \omega} \quad (\omega = 2 \pi f)$$

5

MAXWELL-HAY (FAIBLES PERTES $Q > 10$)

L



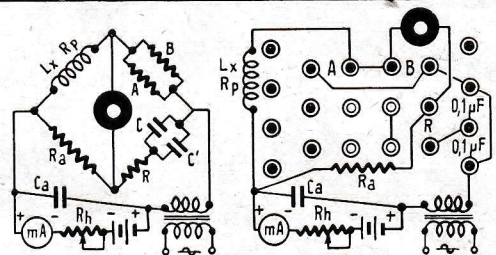
$$L_x = CRB = \frac{RB}{10^7} H \quad (\text{de } 1 \mu H \text{ à } 24 H)$$

$$R_p = \frac{RB}{R_a} \quad R_s = \frac{L_x^2 \omega^2}{R_p} \quad Q = \frac{R_p}{L_x \omega} = \frac{1}{R_a C \omega} = \frac{10^7}{R_a \omega}$$

6

MAXWELL-HAY (AVEC COURANT CONTINU SUPERPOSÉ)

L



$$L_x = (C + C') R_a \frac{AB}{A+B} = CR_a B = \frac{RB}{10^7} H \quad (C = C' \text{ et } A = B)$$

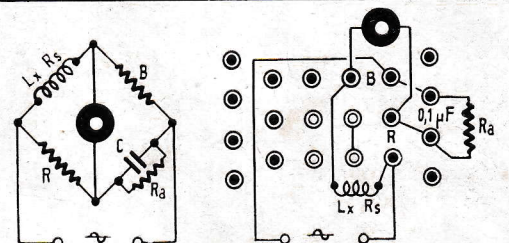
$$\left(\text{de } 10^{-7} R_a (\min) \left(\frac{1,6}{I(\max)} \right)^2 \text{ à } 10^{-7} R_a (\max) \left(\frac{1,6}{I(\max)} \right)^2 \text{ Henrys} \right) \quad I(\max) = \frac{1,6}{\sqrt{B}} \text{ Amp}$$

$$R_p = \frac{RB}{R_a} \quad R_s = \frac{L_x^2 \omega^2}{R_p} \quad Q = \frac{R_p}{L_x \omega} = \frac{1}{R_a C \omega} = \frac{10^7}{R_a \omega}$$

7

MAXWELL (GRANDES PERTES $Q < 10$)

L



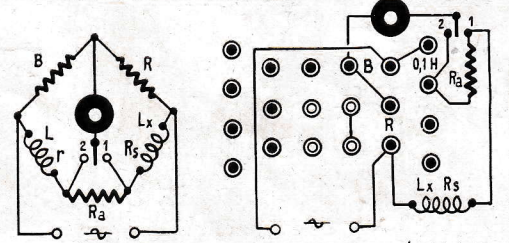
$$L_x = CRB = \frac{RB}{10^7} H \quad (\text{de } 1 \mu H \text{ à } 24 H)$$

$$R_s = \frac{RB}{R_a} \quad Q = \frac{L_x \omega}{R_s} = R_a C \omega = \frac{R_a \omega}{10^7}$$

8

MAXWELL A INDUCTANCES

L

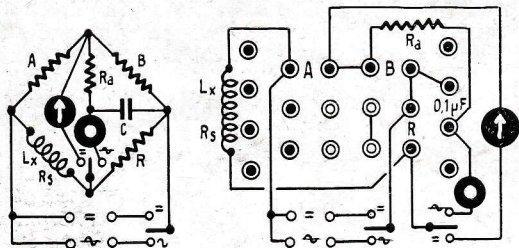


$$L_x = \frac{LR}{B} = \frac{R}{10B} H \quad (\text{de } 100 \mu H \text{ à } 1.200 H) \quad Q = \frac{L_x \omega}{R_s}$$

$$1^\circ. R_s = \frac{R}{B} (R_a + r) = \frac{R}{B} (R_a + 100) \text{ quand } \frac{R_s}{L_x} > \left(\frac{r}{L} = 1.000 \right)$$

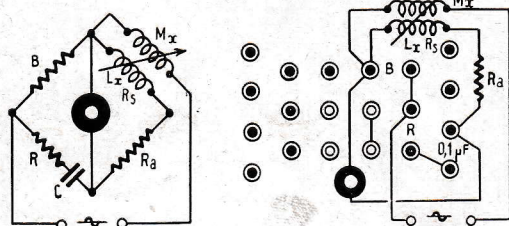
$$2^\circ. R_s = \frac{rR}{B} - R_a = \frac{100R}{B} - R_a \text{ quand } \frac{R_s}{L_x} < \left(\frac{r}{L} = 1.000 \right) \quad (r = 100 \Omega)$$

9 ANDERSON - STROUD ET DATES L



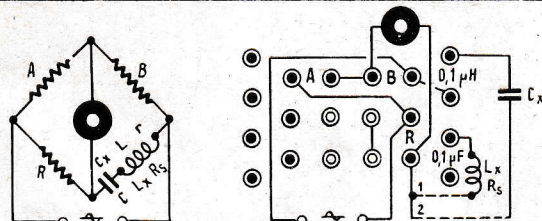
$$\begin{aligned} R_s &= \frac{RA}{B} \quad \left(\text{de } 1\mu H \text{ à } \frac{R_a(\max) + 24.000}{1.000} \text{ henrys} \right) \\ L_x &= C \left[R_a(R + R_s) + RA \right] = 10^{-7} \left[R_a(R + R_s) + RA \right] \text{ henrys} \end{aligned}$$

10 CAREY-FOSTER ML



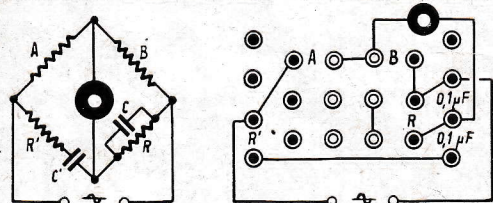
$$\begin{aligned} M_x &= -CB(R_a + R_s) = -10^{-7} B / (R_a + R_s) \quad \left(\text{de } \frac{R_s}{10} \mu H \text{ à } \frac{R_a(\max)}{1.000} H \right) \\ L_x &= -M \left(1 + \frac{R}{B} \right) = 10^{-7} (B + R) (R_a + R_s) \quad \left(\text{de } \frac{R_s}{5} \mu H \text{ à } \frac{R_a(\max)}{500} H \right) \end{aligned}$$

11 RESONANCE FLC



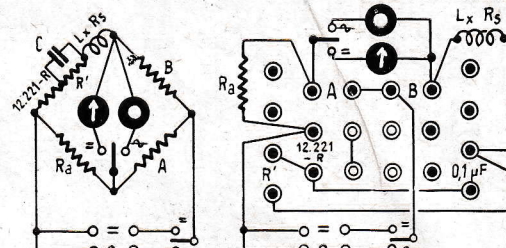
$$\begin{aligned} \frac{B}{A} &= \frac{r}{R} \text{ ou } \frac{R_s}{R} \quad f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_x C_x}} \text{ ou } \frac{1}{2\pi \sqrt{L_x C}} \\ 1^\circ / L_x &= \frac{1}{C \omega^2} = \frac{10^7}{\omega^2} = \frac{10^7}{4\pi^2 f^2} H \\ 2^\circ / C_x &= \frac{1}{L \omega^2} = \frac{10}{\omega^2} = \frac{10}{4\pi^2 f^2} \text{ Farads ou } \frac{10^7}{4\pi^2 f^2} \mu F \end{aligned}$$

12 WIEN-ROBINSON f



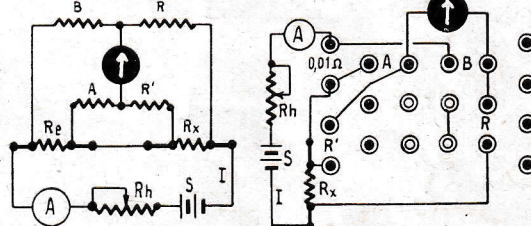
$$\begin{aligned} \frac{A}{B} &= \frac{20.000}{10.000} = 2 \quad CR\omega = C'R'\omega = 1 \quad (C = C' \text{ et } R = R') \\ f &= \frac{1}{2\pi CR} = \frac{10^7}{2\pi R} \text{ Hz} \quad \left(\text{de } 130 \text{ Hz à } 16.000 \text{ Hz} \right) \end{aligned}$$

13 PIRANI L



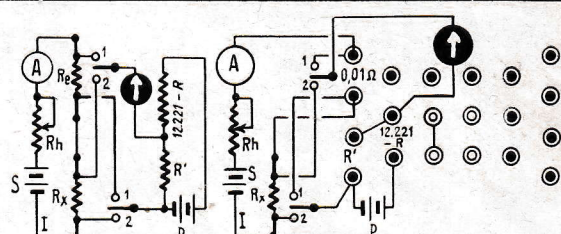
$$\begin{aligned} R_s &= \frac{R_a B}{A} - [R' + (12.221 - R)] = \frac{R_a B}{A} - 12.221 \quad (R = R') \\ L_x &= CR^2 = 10^{-7} R^2 \text{ henrys} \quad \left(\text{de } 10\mu H \text{ à } 15 H \right) \end{aligned}$$

14 THOMSON DOUBLE R faible



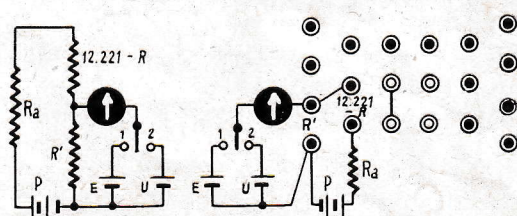
$$\begin{aligned} R_x &= R_e \frac{R}{B} = R_e \frac{R'}{A} = 0,01 \frac{R}{B} \Omega \quad (A = B \text{ et } R = R') \\ &\left(\text{de } 0,000,01 \text{ à } 120 \Omega \right) \quad I = \text{de l'ordre de } 1 \text{ ampère} \end{aligned}$$

15 METHODE D'OPPOSITION R faible



$$\begin{aligned} 1^\circ / R' &= R'_1 \quad 2^\circ / R' = R'_2 \quad (\text{pour même valeur de } I) \\ R_x &= R_e \frac{R'_2}{R'_1} = 0,01 \frac{R'_2}{R'_1} \quad \left(\text{de } 0,000,01 \text{ à } 12 \Omega \right) \\ &I = \text{de l'ordre de } 1 \text{ ampère} \end{aligned}$$

16 BOUTY-POTENTIOMETRE U



$$\begin{aligned} \text{BOUTY : } 1^\circ / R' &= R'_1 \quad 2^\circ / R' = R'_2 \quad \text{on a : } U = E \frac{R'_2}{R'_1} \\ \text{POTENTIOMETRE : } 1^\circ / \text{Poser } R' &= R'_1 = 10^n E \quad (n = \text{entier}) \\ &\text{puis larer en réglant } R_a \quad 2^\circ / R' = R'_2 \quad \text{on a : } U = \frac{R'_2}{10^n} \end{aligned}$$

ETUDE DES MONTAGES

Pour étudier à fond les différents ponts de mesures, du moins les types classiques, un volume serait insuffisant ; nous ne pouvons donc donner que quelques indications essentielles et particulières à chacun des montages, en supposant leur théorie connue.

1° Pont de Wheatstone

Pour le choix des bras de proportion A et B, tenir compte de ce que la sensibilité est la plus grande lorsque la diagonale la plus résistante, généralement l'indicateur de zéro, réunit le point de concours des deux résistances les plus faibles à celui des deux résistances les plus fortes ; pour satisfaire à cette condition, on peut éventuellement intervertir la source et l'indicateur de zéro. Ces remarques sont d'ailleurs valables pour tous les ponts dérivés du pont de Wheatstone, les résistances étant remplacées par les impédances.

2° Pont de comparaison

Ce pont sera employé pour la vérification et le triage des résistances, bobines et condensateurs destinés à une fabrication de série ; le triage se fait par comparaison avec un élément reconnu bon et qui servira d'étalon.

En posant $B = 1.000 \Omega$, par exemple, on peut mesurer de -10% à $+10\%$ par rapport à l'étalon en faisant varier R de 900 à 1.100 Ω .

Pour la comparaison des capacités et des self-inductions, le zéro absolu ne peut être obtenu que si l'étalon et l'élément à comparer ont même angle des pertes ou même surtension ; il convient donc d'intercaler une résistance réglable appropriée en série ou en parallèle, soit avec l'étalon, soit avec l'élément à comparer, suivant le cas. La valeur de cette résistance permet également d'apprécier la qualité de l'élément comparé.

3° Pont de Sauty-Wien

Ce pont sera employé pour la mesure des condensateurs à faibles pertes, c'est-à-dire, en général, dans tous les cas où un condensateur est pratiquement utilisable.

L'alimentation est effectuée généralement en alternatif à 50, 400, 800 ou 1 000 p/s. La recherche de l'équilibre se fait en réglant conjointement les résistances R et R_a .

4° Pont de Sauty-Nernst

Ce pont sera employé pour la mesure des capacités à grandes pertes ou, plutôt, des résistances capacitatives. Mêmes remarques que pour le pont précédent quant à l'alimentation et la recherche de l'équilibre.

5° Pont de Maxwell-Hay

Ce pont sera employé pour la mesure des self-inductions à grande surtension.

L'alimentation se fait généralement en alternatif à 50, 400, 800 ou 1 000 p/s. La recherche de l'équilibre est faite en

réglant conjointement les résistances R et R_a .

Dans la mesure des bobines à fer, on peut remarquer une diminution de la self-induction lorsqu'on augmente l'intensité du courant de mesure, en raison de la saturation du noyau ; pour obtenir une valeur bien définie de la self-induction, il convient donc d'employer un courant aussi faible que possible, compatible avec la sensibilité de l'indicateur de zéro.

Pour des bobines à faible surtension, cette méthode introduit une erreur d'autant plus grande que la surtension est faible.

6° Pont de Maxwell-Hay (avec courant continu superposé)

On sait que la self-induction d'une bobine à noyau de fer varie sensiblement en fonction du courant continu qui la traverse : elle diminue généralement lorsque le courant augmente.

Le cas d'une bobine parcourue par un courant continu se rencontre souvent en pratique (bobine de filtrage, bobine d'arrêt, primaire d'un transformateur de haut-parleur, etc.), et il est souhaitable de pouvoir mesurer sa self-induction en fonction du courant continu qui la traverse, afin d'en déterminer la condition optimum d'emploi.

Le pont de *Maxwell-Hay* n° 5, traité au paragraphe précédent, pourrait, en principe, convenir pour cette mesure ; mais des restrictions d'ordre pratique en limiteraient l'emploi à de faibles intensités de courant ou à de faibles coefficients de self-induction. En effet, le courant continu traversant la bobine doit passer dans la résistance B ; or, cette dernière étant prévue pour une dissipation maximum de 1 W en régime permanent, en laissant une marge de 0,2 W de dissipation pour le courant alternatif de mesure, le courant continu maximum admissible est de $I_{(max)} = 0,8/\sqrt{B}$. Cette formule, ainsi que celle fournissant la valeur de la self-induction :

$$L_x = CRB = RB/10^7,$$

montrent qu'en posant : $B = 100 \Omega$, par exemple, on peut mesurer, sous un courant continu maximum de 80 mA, une self-induction maximum de 0,12 H, ce qui serait insuffisant, étant donné que les bobines de filtrage, par exemple, ont couramment une valeur de plusieurs henrys pour un débit de l'ordre de 50 mA. En augmentant B, on augmente $L_{x(max)}$ mais on diminue $I_{(max)}$, et vice versa.

C'est donc en vue d'élargir les limites de mesure que le montage normal a été modifié : les bras A et B sont connectés en parallèle, ainsi que les deux capacités étalons de 0,1 μF , ce qui permet de doubler l'intensité de courant maximum pour une même valeur de self-induction mesurable ; ensuite, la résistance R de l'appareil, limitée à 12 221 Ω , est utilisée pour la compensation de la phase, tandis qu'elle-même est remplacée par une résistance variable extérieure R_a pouvant atteindre toute valeur désirée.

Ainsi, en utilisant pour cette dernière la boîte à décades citée au paragraphe « Résistance de compensation de la phase », et qui permet d'obtenir une résistance allant jusqu'à 1,22 M Ω , on peut mesurer, sous un courant continu maximum de 160 mA, une self-induction maximum de 12 H, ou bien, sous un courant continu maximum de 50 mA, une self-induction maximum de 120 H, ce qui est largement suffisant pour les besoins de la pratique courante.

Le courant continu, fourni par une source appropriée, sera réglé à l'aide du rhéostat R_h et contrôlé par un milliampèremètre.

Le courant alternatif de mesure sera appliqué au pont par l'intermédiaire d'un transformateur dont le secondaire sera branché en série avec le circuit continu, et un condensateur de dérivation C_a , de capacité suffisante, facilitera le passage de la composante alternative.

Enfin, il est à remarquer que le courant continu qui pourrait traverser la dérivation constituée par l'indicateur de zéro et la résistance R_a en série est pratiquement toujours négligeable devant le courant total ; dès lors, on peut considérer que le courant mesuré par le milliampèremètre est celui qui traverse la bobine.

7° Pont de Maxwell

Ce pont sera employé pour la mesure des self-inductions à faible surtension. Mêmes remarques que pour le pont de *Maxwell-Hay*, quant à l'alimentation et la recherche de l'équilibre.

8° Pont de Maxwell à inductances

Selon que la surtension de la bobine à mesurer est plus grande ou plus petite que celle de la bobine étalon de l'appareil, la résistance de compensation de la phase R_a sera placée en série avec la bobine à mesurer ou avec l'étalon.

La résistance ohmique de la bobine étalon, qui est de 100 Ω environ, permet de calculer, d'une manière suffisamment approchée, la surtension de celle-ci pour une fréquence donnée ; en effet, les pertes dans cette bobine, qui est du type « à poudre de fer », sont constituées presque uniquement par ses pertes ohmiques. Mais il peut ne pas en être de même pour la bobine à mesurer, qui pourrait comporter du fer en tôles et, par conséquent, avoir plus de pertes que ne l'indique sa simple résistance ohmique. Il convient donc, dans certains cas, de rechercher expérimentalement le sens de branchement de la résistance R_a .

REMARQUE

Dans les ponts de *Sauty-Wien* (3), de *Sauty-Nernst* (4), de *Maxwell-Hay* (5), de *Maxwell* (7) et de *Maxwell* à inductances (8), les deux réglages de R et de R_a dépendent, dans une certaine mesure, l'un de l'autre, et il faut procéder par tâtonnements successifs pour obtenir l'équilibre.

9° Pont d'Anderson

Le pont représenté dans le tableau est celui d'Anderson ; le pont de Stroud et Oates en diffère uniquement par l'inversion des diagonales « source » et « indicateur de zéro », ce qui, dans certains cas, pourrait procurer une plus grande sensibilité, la résistance R_a étant placée en série avec la source, au lieu de l'être avec l'indicateur de zéro.

L'équilibre en courant continu étant obtenu par le réglage de la résistance R , on réalise ensuite l'équilibre en alternatif, en réglant la résistance R_a , ce qui, en principe, ne doit pas modifier le premier équilibre ; toutefois, l'équilibre obtenu en continu ne tient compte que des pertes ohmiques de la bobine ; or, comme nous venons de le signaler au paragraphe précédent, la bobine à mesurer pourrait, dans certains cas, comporter des pertes dans le fer ; dans ce cas, il convient de retoucher, en alternatif, le réglage de la résistance R .

10° Pont de Carey-Foster

Ce pont est parfois employé pour la mesure précise d'une capacité à partir d'un étalon absolu d'induction mutuelle :

$$C = \frac{M}{B(R_a + R_s)}$$

En effet, la réalisation pratique d'un étalon d'induction mutuelle, en fonction de ses grandeurs géométriques, est plus aisée que celle d'un étalon de capacité ; de surcroît, le premier pourra être rendu plus stable dans le temps et en fonction des agents atmosphériques, que le second.

Néanmoins, le pont de Carey-Foster est plus généralement employé pour la mesure des coefficients d'induction mutuelle à partir d'une capacité étalon. Remarquons que l'équilibre de ce pont, sous sa forme simplifiée actuelle, est indépendant de la fréquence.

La recherche de l'équilibre est faite en réglant conjointement les résistances R et R_a ; ce double réglage est assez délicat et, pour plus de facilité, on peut effectuer chacun d'eux indépendamment de l'autre, en agissant sur la résistance R_a pour satisfaire à l'équation donnant M_x , et sur la résistance R pour satisfaire à l'équation donnant L_x .

Le signe — dans les formules indique que M_x doit être négatif par rapport à L_x ; l'équilibre n'étant possible qu'à cette condition, intervertir, au besoin, les connexions de l'une des bobines. Il va sans dire que L_x sera toujours plus grand que M_x .

11° Pont à résonance

Ce pont permet de mesurer l'une des trois grandeurs, fréquence, capacité, ou self-induction, en fonction des deux autres.

Comme nous l'avions déjà signalé au paragraphe « Emplois Accessoires », on peut déjà mesurer les trois fréquences de 1130, 1600 et 2260 p/s en faisant résonner la bobine étalon de 0,1 H avec les trois capacités étalons de 0,2, 0,1 et 0,05 μF que l'appareil

permet de constituer. Mais, pour mesurer une fréquence quelconque, il faut, soit faire résonner la capacité étalon de l'appareil avec une self-induction extérieure réglable, soit faire résonner la bobine étalon de l'appareil avec une capacité extérieure réglable. Ce dernier procédé est plus couramment employé que le premier, car il est plus facile, et surtout moins onéreux de réaliser une capacité réglable dans de larges limites qu'une self-induction : en effet, il existe des boîtes de capacités variables à décades permettant d'obtenir de 0,001 à 1,221 μF par bonds de 0,001 μF , ce qui permet, par résonance avec la self-induction de 0,1 H de l'appareil, de couvrir la gamme de 450 à 16 000 p/s ; bien entendu, pour descendre jusqu'à 45 p/s, il suffit de remplacer l'étalon de 0,1 H par une bobine de 10 H.

Pour mesurer une capacité, on cherche à obtenir la résonance de celle-ci avec l'étalon de 0,1 H de l'appareil en faisant varier la fréquence de la source ; cette dernière peut être constituée par un générateur B.F., à battements, par exemple, couvrant de 16 à 16 000 p/s, ce qui permet de mesurer de 0,001 à 1 000 μF .

Pour mesurer une self-induction, on cherche à obtenir la résonance de celle-ci avec l'étalon de 0,1 μF de l'appareil en faisant varier la fréquence de la source ; à l'aide du même générateur cité à l'alinéa précédent, on peut mesurer de 0,001 à 1 000 H. D'ailleurs, si l'on ne dispose que d'une seule fréquence, il suffit de remplacer l'étalon de 0,1 μF par une capacité réglable et de chercher à obtenir la résonance par le réglage de cette dernière ; à l'aide de la boîte de capacités à décades citée plus haut et d'une source à 1 000 p/s, par exemple, on peut mesurer de 0,02 à 25 H.

Signalons, enfin, que, dans tous les cas, la résistance R n'intervenant que pour compenser l'amortissement du circuit résonnant, son réglage n'influe pas sur celui de la résonance ; d'ailleurs, à la résonance, le pont fonctionne en pont de Wheatstone simple.

12° Pont de Wien-Robinson

Comme le précédent, ce pont convient pour la mesure des fréquences acoustiques.

La recherche de l'équilibre y est très facile, du fait que les résistances R et R' peuvent être variées simultanément tout en restant toujours égales.

Remarquons, à cette occasion, que c'est notamment afin de pouvoir réaliser la condition $A/B = 2$ que les bras de proportion comportent la résistance inhabituelle de 20 000 Ω .

Signalons que la limite supérieure en fréquence de 16 000 p/s a été calculée pour une limite inférieure de R égale à 100 Ω (au lieu de 10 Ω , pour les autres montages).

Ce pont se prête bien également à la mesure de la distorsion harmonique d'une tension périodique complexe ; en effet, l'équilibre étant réalisé pour la fréquence fondamentale, il suffit de mesurer la tension résiduelle composée

des harmoniques, à l'aide d'un voltmètre quadratique qui remplacera l'indicateur de zéro ; toutefois, étant donné que les premières harmoniques de la tension seront atténuées dans une certaine proportion, un dispositif correcteur doit être prévu, par exemple, en incorporant convenablement le pont à un amplificateur muni d'un dispositif de contre-réaction ayant pour effet d'augmenter la sélectivité.

13° Pont de Pirani

La mesure d'une self-induction à l'aide du pont de Pirani est aussi commode qu'avec le pont d'Anderson, étant donné que les deux réglages de recherche de l'équilibre se font indépendamment l'un de l'autre. En effet, la recherche de l'équilibre en continu se fait d'abord par le réglage de la résistance R_a , comme dans un pont de Wheatstone simple ; ensuite, il suffit de rechercher l'équilibre en alternatif par le seul réglage du potentiomètre constitué par les doubles décades.

Une variante de cette méthode consiste à rendre la résistance 12 221 — R nulle et la résistance R' fixe, et à rechercher l'équilibre en alternatif par le réglage d'une capacité variable qui remplacera l'étalon C ; cette capacité pourra être constituée par la boîte de capacités à décades citée plus haut, dans l'étude du pont à résonance (11).

14° Pont double de Thomson

La mesure des faibles résistances à l'aide du pont de Wheatstone est limitée par l'influence de la résistance de contact et des connexions, qui ne peut plus être négligée devant la résistance à mesurer. Dans le pont double de Thomson cette influence est rendue négligeable ; toutefois, certaines précautions doivent être prises :

La résistance des circuits dérivés $B + R$ et $A + R'$ doit être grande devant celle du circuit principal $R_s + R_x$;

La connexion qui relie R_s à R_x doit être aussi peu résistante que possible ;

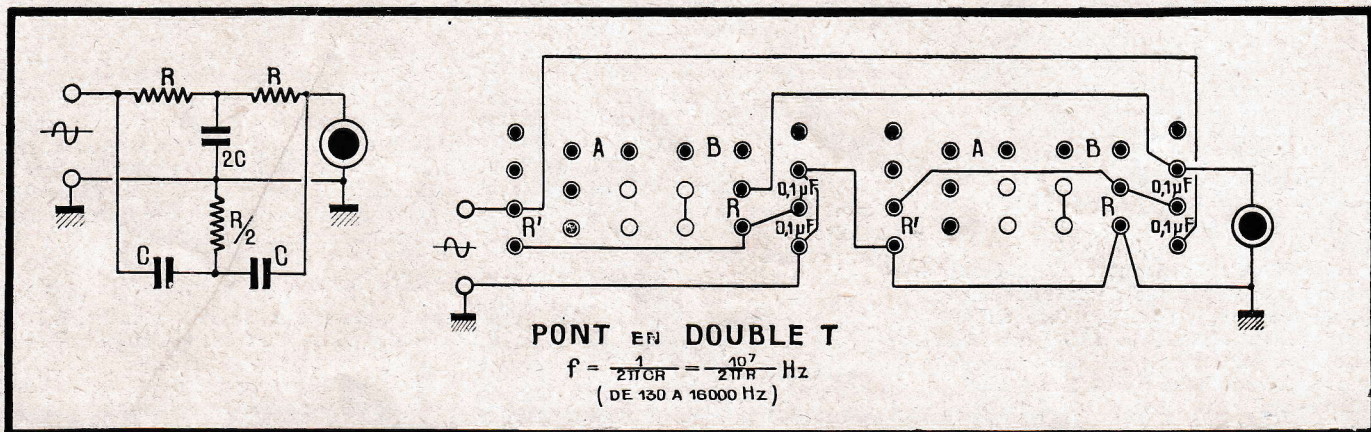
Afin que les potentiels soient bien définis à l'endroit où seront prises les dérivations sur la résistance à mesurer, celles-ci seront pratiquées assez loin des amenées de courant ;

Le courant doit être amené à la résistance étalon de 0,01 Ω du côté « douille » des bornes, tandis que les dérivations seront prises du côté « cosse » des mêmes bornes (bien distinguer cela en regardant de près le schéma de montage pratique de ce pont) ; c'est ainsi qu'est définie la résistance de l'étalon de 0,01 Ω .

Le courant dans le circuit principal ne doit pas dépasser 5 ampères.

La limite supérieure de mesure de 120 Ω indiquée dans le tableau ne sera pratiquement jamais atteinte, car, déjà, pour la mesure des valeurs d'une dizaine d'ohms, le pont de Wheatstone se trouve plus indiqué.

Rien ne s'oppose à l'emploi du pont de Thomson en courant alternatif, ce qui offre l'avantage d'éliminer l'influence parasite du couple thermoelectrique, dans l'étalonnage des « shunts », par



Exemple de montage réalisé à l'aide de deux Multipoints

exemple ; on peut ainsi procéder à une mesure sans attendre le refroidissement d'une soudure ; il en résulte une appréciable économie de temps.

15° Méthode d'opposition

Cette méthode convient également pour la mesure des faibles résistances ; elle offre l'avantage d'éliminer complètement les résistances de contact, mais, par contre, elle présente l'inconvénient de nécessiter un courant abondamment constant dans le circuit principal, ainsi que, d'ailleurs, dans le circuit dérivé, ce qui est pratiquement difficile à réaliser dans le circuit principal, en raison du courant important nécessaire pour obtenir une sensibilité suffisante.

En conséquence, afin de pouvoir contrôler avec une précision suffisante la constance du courant principal, il convient d'employer un ampèremètre d'une sensibilité telle que la lecture puisse se faire dans le voisinage du maximum de l'échelle. Pour s'affranchir de cette cause d'erreur, on peut également effectuer trois mesures à intervalles de temps égaux, la première avec opposition sur R_e , la deuxième avec opposition sur R_x et la troisième, de nouveau, avec opposition sur R_e ; si l'on admet que l'intensité I varie proportionnellement au temps, on a :

$$R_x = R_e \frac{R'_1 + R'_3}{2 R'_2}$$

R'_1 , R'_2 et R'_3 étant respectivement les valeurs trouvées pour R' dans les trois oppositions successives.

Pour que l'équilibre soit possible, il faut que la différence de potentiel aux bornes de R_e ou R_x soit en opposition avec celle aux bornes de R' .

La précision de la mesure est la meilleure lorsque R_x et R_e ont même ordre de grandeur ; pour satisfaire à cette condition, on peut, au besoin, remplacer R_e par un étalon extérieur de valeur appropriée.

16° Méthode de Bouty et méthode potentiométrique

Ces méthodes sont employées pour la mesure précise et sans consommation des forces électromotrices et des différences de potentiel. Elles permettent également la mesure des intensités par la mesure de la différence de potentiel produite, aux bornes d'une résistance connue, par le courant à mesurer. Elles conviennent donc pour l'étalonnage des voltmètres et ampèremètres à partir d'un étalon absolu de force électromotrice.

Ces méthodes étant des méthodes d'opposition, l'équilibre du galvanomètre n'est possible qu'autant que la différence de potentiel aux bornes de R' et celle aux bornes de E ou de U sont en opposition.

La méthode potentiométrique, bien qu'elle nécessite l'emploi d'une résistance de tarage auxiliaire R_a , est plus pratique que la méthode de Bouty, du fait que, une fois le tarage effectué, la valeur de la tension à mesurer se lit directement, à un coefficient décimal près, sur les décades R' .

AUTRES MONTAGES

Les seize montages que nous venons d'étudier ne sont pas les seuls qu'il est possible de réaliser à l'aide de l'appareil. On peut, au besoin, utiliser plusieurs appareils pour réaliser des montages complexes. A titre d'exemple, nous indiquons le montage d'un pont en double T constitué à l'aide de deux appareils.

Ce type de pont donne le même résultat que le pont de Wien-Robinson (12) et, bien qu'il soit un peu plus compliqué, puisque la recherche de l'équilibre y nécessite le réglage de trois éléments au lieu de deux, il présente néanmoins sur ce dernier, entre autres avantages, celui de comporter un point commun à la source et à l'indicateur

de zéro ; ce point commun est généralement relié à la masse et, de ce fait, il devient inutile de prévoir un transformateur à écran pour séparer électriquement la source de l'indicateur de zéro, lorsqu'ils sont alimentés à partir d'une alimentation commune.

Le premier T du pont est fourni par le premier appareil, en connectant les résistances égales R et R' en série et les condensateurs égaux C et C' en parallèle pour former $2C$. Le deuxième T est fourni par le deuxième appareil, en connectant les deux condensateurs égaux C et C' en série et les résistances égales R et R' en parallèle pour former $R/2$.

Les condensateurs étant fixes, la recherche de l'équilibre se fait en réglant conjointement les doubles décades des deux appareils, tout en maintenant les commutateurs correspondants sur des positions identiques de sorte que $R/2$ du deuxième appareil, soit toujours égale à la moitié de R lue sur le premier appareil.

Comme on le remarque, les formules de ce pont sont les mêmes que celles du pont de Wien-Robinson (12) et les limites de mesure sont les mêmes. Toutefois, étant donné que les bras de proportion A et B des deux appareils restent disponibles, on peut songer à les utiliser pour reculer la limite inférieure de f ; en effet, en intercalant A et B en série respectivement avec R et R' sur les deux appareils, on peut atteindre une limite inférieure en fréquence de 50 p/s.

Enfin, rappelons que ce pont convient pour la mesure des fréquences et de la distorsion harmonique ainsi que pour la constitution d'un amplificateur sélectif ou d'un générateur B.F.

Nous pensons qu'en s'inspirant des nombreux montages que nous venons d'étudier, l'utilisateur de l'appareil pourra, avec un peu d'imagination, constituer, suivant ses besoins, tout autre montage désiré.

E. N. B.

LABORATOIRE INDUSTRIEL RADIOÉLECTRIQUE
25, Rue Louis-le-Grand, PARIS (2^e) Téléphone : OPEra 37-15