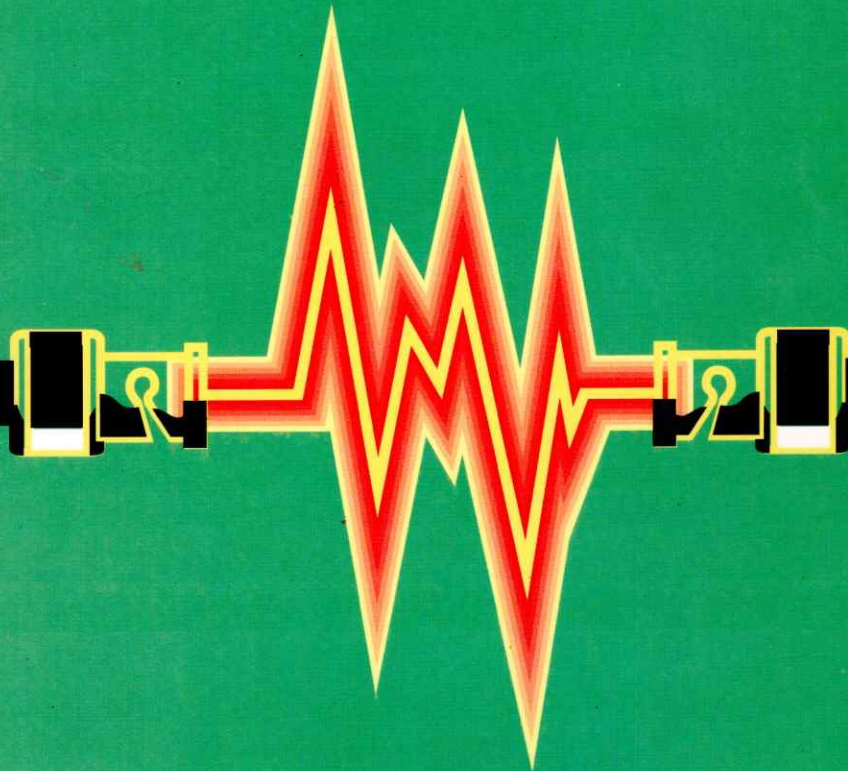


Messaoud BOUKEZZATA

METHODES ET TECHNIQUES DE MESURES ELECTRIQUES

*destiné aux élèves ingénieurs
des filières scientifiques et techniques*



Office des Publications Universitaires

Table des matières

Chapitre I : Précision de la mesure	1
I.1.1 Les erreurs de mesure.....	1
I.1.1.1 Nature des erreurs.....	1
a) Erreurs systématiques.....	1
b) Erreurs accidentelles.....	2
c) Erreurs grossières.....	2
I.1.1.2 Définitions.....	2
a) L'erreur absolue.....	2
b) La correction (c).....	2
c) L'erreur relative.....	3
I.1.1.3 De l'erreur à l'incertitude.....	3
a) Définition de l'incertitude.....	3
b) Incertitude absolue.....	3
c) Incertitude relative.....	3
I.2. Evaluation de l'incertitude systématique.....	4
I.2.1. Incertitude de méthode.....	4
a) Calcul de l'incertitude absolue.....	4
b) Calcul de l'incertitude relative.....	4
c) Exemples.....	6
d) Applications.....	6
I.2.2. Incertitude de lecture.....	8
I.2.3. Incertitude de classe.....	8
I.2.4. Incertitude d'étalon inerte.....	9
a) Incertitude inscrite en claire.....	9
b) Incertitude codée.....	9
I.3. Détermination de l'incertitude accidentelle : méthodes statistiques.....	13
I.3.1. Exemple statistique.....	13
I.3.2. Cas Gaussien.....	14

I.3.3. Valeur moyenne.....	16
I.3.4. L'écart-type.....	18
I.3.5. Distribution de Student.....	19
a) Principe de l'estimation.....	19
b) Estimation ponctuelle d'une grandeur physique.....	19
c) Estimateur.....	19
d) Loi de Student.....	19
I.3.6. Détermination du taux de présence.....	21
I.3.7. Intervalle et niveau de confiance.....	21
I.3.8. Courbe de répartition.....	21
I.3.9. Détermination de l'incertitude par la méthode de l'étendue.....	21
a) Définition de l'étendue.....	21
b) Méthode de l'étendue.....	21
I.3.10. Quelques valeurs des paramètres tabulés.....	21
I.4. Ecriture du résultat de mesurage.....	24
I.5. Représentation graphique.....	24
Chapitre II : Les appareils de mesure	
II.1. Classification des appareils de mesures électriques.....	27
II.1.1. Appareils magnétoélectriques (à cadre mobile).....	27
II.1.2. Appareils électrodynamiques et ferrodynamiques.....	28
II.1.3. Appareils ferromagnétiques.....	28
II.1.4. Appareils à aimant mobile.....	28
II.1.5. Appareils à induction.....	29
II.1.6. Appareils électrostatiques.....	29
II.1.7. Appareils à lames vibrantes.....	29
II.1.8. Appareils bimétalliques.....	29
II.1.9. Appareils thermiques à fil chaud.....	30
II.2. Qualités essentielles des appareils de mesure.....	30
II.2.1. La fidélité.....	30

II.2.2. La justesse (précision).....	30
II.2.3. La sensibilité.....	30
II.2.4. La robustesse.....	30
II.2.5. La rigidité diélectrique.....	31
II.2.6. La rapidité d'indication.....	31
II.2.7. La fiabilité.....	31
II.2.8. Le calibre.....	31
II.2.9. La classe.....	31
II.3. Mécanismes de fonctionnement des équipages mobiles.....	32
II.3.1. Equation de mouvement.....	32
II.3.2. Mouvement libre.....	32
a) Mouvement non amorti.....	33
b) Mouvement amorti.....	33
c) Calcul de la première amplitude du mouvement de l'équipage.....	35
II.3.3. Mouvement forcé.....	36
a) Couple moteur constant.....	36
b) Couple moteur périodique.....	36
c) Cas particulier.....	38
II.4. Exemple d'illustrations fournies sur le cadran de l'appareil.....	40
Chapitre III : Exemples d'appareils de mesure	
III.1. Appareils magnétoélectriques.....	43
A. Galvanomètre à cadre mobile.....	43
A.1. Principe de fonctionnement.....	43
A.1.1. Le champ magnétique.....	43
A.1.2. L'équipage mobile.....	44
A.2. Bilan des couples exercés sur le cadre.....	45
A.2.1. Le couple électromagnétique.....	45
A.2.2. Le couple de freinage induit.....	45
A.2.3. Le couple de torsion.....	47

A.2.4. Les couples de frottements.....	47
A.3. Etude de l'équation de mouvement du cadre.....	47
a) Régime oscillatoire amorti.....	49
b) Régime aperiodique.....	49
c) Régime d'amortissement critique.....	50
A.4. Mesure d'une induction, sensibilité.....	50
A.5. Recherche des meilleures caractéristiques du cadre.....	51
B. Ampèremètre à cadre mobile.....	52
B.1. Structure électrique.....	52
B.2. Equation de mouvement du cadre de l'ampèremètre.....	53
B.3. Etude de la sensibilité.....	54
C. Voltmètre à cadre mobile.....	54
C.1. Structure électrique.....	54
C.2. Equation de mouvement du cadre du voltmètre.....	55
C.3. Etude de la sensibilité.....	56
C.4. Mesure.....	56
C.4.1. Exemple d'une grandeur sinusoïdale redressée à une alternance.....	57
C.4.2. Exemple d'une grandeur sinusoïdale redressée à deux alternances.....	58
C.4.1. Autre types d'exemples.....	58
D. L'ohmmètre à cadre mobile.....	60
D.1. Structure électrique.....	60
D.2. Mesure.....	61
III.2. Appareils électrodynamiques.....	61
A. Le wattmètre électrodynamique en régime continu.....	61
A.1. Structure interne.....	61
A.1.1. Le circuit courant (C_I).....	61
A.1.2. Le circuit tension (C_U).....	64
A.2. Fonctionnement du wattmètre.....	65
A.3. Choix du circuit de montage du wattmètre.....	66
A.3.1. Montage aval.....	67
A.3.2. Montage amont.....	67

B. Le wattmètre en régime sinusoïdal.....	67
B.1. Puissance instantanée, puissance moyenne et puissance complexe.....	67
B.1.1. Puissance instantanée.....	67
B.1.2. Puissance moyenne.....	68
B.1.3. Puissance complexe.....	68
B.2. Principe de fonctionnement.....	69
C. Mesure de puissance.....	69
C.1. Mesure directe.....	70
C.2. Mesure indirecte.....	70
C.2.1. Méthode des trois ampèremètres.....	70
C.2.2. Méthode des trois voltmètres.....	71
C.2.3. Méthode des deux wattmètres.....	71
III.3. Appareils à induction.....	72
A. Le compteur d'énergie électrique.....	74
Chapitre IV : Les ponts de mesure.....	77
IV.1. Les ponts en continu.....	77
IV.1.1. Principe.....	77
IV.1.2. Equilibre du pont.....	78
IV.1.3. Sensibilité du pont.....	78
IV.1.4. Pont de Wheatstone.....	80
IV.1.5. Pont double de Thomson.....	81
IV.2. Les ponts en alternatif.....	82
IV.2.1. Principe.....	82
IV.2.2. Ponts en (P/Q).....	84
IV.2.3. Ponts en (P/Q).....	85
IV.3. Mesure de capacités.....	86
IV.3.1. Schémas équivalents.....	86
IV.3.2. Facteur de dissipation ou de perte D	86
IV.3.3. Angle de perte.....	87

IV.3.4. Pont de Saury-Wien.....	87
IV.3.5. Pont de Nernst.....	88
IV.3.6. Pont de Schering.....	89
IV.4. Mesure d'inductance.....	91
IV.4.1. Schémas équivalents.....	91
IV.4.2. Facteur de qualité Q	91
IV.4.3. Angle de perte.....	92
IV.4.4. Pont de Siemens.....	92
IV.4.5. Pont de Maxwell.....	91
IV.4.6. Pont de Hay.....	91
IV.4.7. Pont de Owen.....	94
IV.4.8. Pont d'Anderson.....	95
IV.5. Mesure d'inductances mutuelles.....	96
IV.5.1. Pont de Caey-Foster.....	96
IV.5.2. Pont de Campbell.....	98
IV.5.3. Pont de Smith.....	99
IV.6. Mesure de fréquences.....	100
IV.6.1. Pont de Wien-Robinson.....	100
IV.6.2. Pont en double T.....	101
IV.6.3. Pont résonant.....	102
Chapitre V : Méthodes de résonance et de battement.....	103
A. Méthodes de résonance.....	103
A.1. Circuits résonants.....	103
A.1.1. Définition de la résonance.....	103
A.1.2. Circuits RLC résonants.....	103
A.1.3. Circuits résonants RLC série.....	103
a) Impédance du circuit.....	104
b) Intensité efficace du courant.....	104

c) Déphasage du circuit.....	104
d) Variations de $V_R(x)$	106
e) Variations de $V_C(x)$	107
f) Variations de $V_L(x)$	108
g) Bande passante.....	109
h) Fréquence de coupure (f_c).....	110
i) Notion de filtre.....	110
j) Facteur de surtension Q_V	111
A.1.4. Circuits résonants RLC parallèle.....	113
a) Grandeurs totales I_T , V_T , Y_T et.....	113
b) Surtension.....	114
c) Désaccord relatif.....	115
d) Sélectivité.....	115
e) Filtrage.....	116
A.1.5. Circuits résonants RLC série-parallèle.....	117
A.2. Applications de la résonance.....	118
A.2.1. Mesures de capacités et d'inductances.....	118
A.2.2. Mesures de fréquences et de déphasages.....	118
A.2.3. Aiguillage de signaux.....	119
A.3.4. Alignement, réglage et équilibrage.....	119
A.3.5. Amélioration du facteur de puissance.....	119
B. Méthode de battement.....	120
B.1. Composition d'oscillations harmoniques de même fréquence.....	120
B.2. Composition d'oscillations harmoniques de fréquences différentes.....	121
B.3. Phénomène de battement.....	122
B.4. Applications de la méthode de battement.....	122
B.4.1. Mesures de fréquences.....	122
B.4.2. Réception radiophonique.....	124

Chapitre VI : Le Q-mètre	127
VI.1. Principe du Q -mètre.....	127
VI.2. Structure électronique de l'appareil.....	128
VI.3. Modes de connexions de l'échantillon à mesurer.....	129
VI.3.1. Mode de connexion direct.....	130
VI.3.2. Mode de connexion parallèle.....	130
VI.3.3. Mode de connexion série.....	131
VI.4. Opérations théoriques.....	131
VI.4.1. Facteur de qualité d'un dipôle.....	131
3 VI.4.1.1. Cas d'une bobine.....	131
VI.4.1.2. Cas d'un condensateur.....	132
VI.4.2. Facteur de qualité de deux dipôles en série.....	132
VI.4.3. Facteur de qualité d'une forte impédance.....	133
VI.4.4. Facteur de qualité d'une faible impédance.....	135
VI.5. Mesures et applications.....	136
VI.5.1. Mesure d'une forte inductance L	136
VI.5.2. Influence de la capacité répartie sur la mesure des paramètres d'une bobine.....	137
VI.5.3. Mesure d'une faible capacité < 450 pF.....	140
VI.5.4. Mesure des fortes résistances.....	140
VI.5.5. Mesure de la constante diélectrique d'un isolant.....	141
VI.5.6. Mesure d'une faible inductance.....	143
VI.5.7. Mesure d'une faorte capacité > 450 pF.....	143
VI.5.8. Mesure d'une faible résistance.....	144
VI.5.9. Tableau récapitulatif.....	145
Chapitre VII : Mesures des grandeurs magnétiques	147
VII.1. Position du problème.....	147
VII.2. Définitions des grandeurs magnétiques.....	148
VII.2.1. L'excitation magnétique.....	148

VII.2.2. L'induction magnétique.....	148
VII.2.3. Le flux magnétique Φ	148
VII.2.4. La perméabilité des milieux magnétiques μ	149
VII.2.5. Notion d'inductance (L et M).....	149
VII.2.6. Notion de reluctance.....	150
VII.3. Méthodes et techniques de mesures.....	151
VII.3.1. Mesure de l'inductance magnétique par effet Hall.....	155
VII.3.2. Mesure de l'inductance magnétique par le tracé du cycle d'hystérésis.....	157
VII.3.2.1. Courbe d'aimantation et cycle d'hystérésis.....	157
VII.3.2.2. Tracé expérimental du cycle d'hystérésis.....	158

Chapitre VIII : Le logomètre et ses applications.....

161

VIII.1. Principe du logomètre.....	161
VIII.2. Logomètre magnétoélectrique.....	162
VIII.3. Logomètre électrodynamique.....	163
VIII.4. Applications.....	164
VIII.4.1. Logophascemètre.....	164
VIII.4.2. Logofréquencemètre.....	167

Bibliographie.....

169

Table des matières.....

171

Annexe.....

181

Index alphabétique.....

183



Après un premier cycle à l'Université de Constantine et une post-graduation à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France) où il obtint, en 1985, un DEA en électronique, Messaoud Boukezata devient, en 1988, titulaire d'un doctorat en microélectronique. Parallèlement, il fut admis en qualité de chercheur externe au sein du *Laboratoire d'Automatique et d'Architecture des Systèmes* (le LAAS) du CNRS. De retour en Algérie en 1989, il accéda au grade de Professeur d'enseignement supérieur en 1999. Les technologies des composants VLSI/ULSI et la modélisation des processus et leurs applications dans les systèmes microélectriques sont les thèmes sur lesquels il axera ses recherches à l'Institut d'Electronique de l'Université de Constantine tout en publiant des articles dans des revues spécialisées de renommée avérée.

Cet ouvrage traite les aspects fondamentaux et les bases essentielles des techniques de mesures électriques. Il s'adresse aux étudiants des années préparatoires aux grandes écoles ainsi qu'à ceux des cycles court et long des filières techniques et technologiques de l'université. Il tient compte des réalités d'actualisation et de mise au point imposées par le développement rapide et soutenu des techniques de mesures et du programme revu et révisé par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.



280 DA