

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

IEC STANDARD

Publication 404-2

Deuxième édition — Second edition

1978

Matériaux magnétiques

Deuxième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques, électriques et physiques
des tôles et feuillards magnétiques

Magnetic materials

Part 2: Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties
of magnetic sheet and strip



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Rapport d'activité de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du V.E.I., soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, symboles littéraux et signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 117 de la CEI: Symboles graphiques recommandés.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 117 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Revision of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the I.E.V. or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to:

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 117: Recommended graphical symbols.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 117, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

IEC STANDARD

Publication 404-2

Deuxième édition — Second edition

1978

Matériaux magnétiques

Deuxième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques, électriques et physiques
des tôles et feuillets magnétiques

Magnetic materials

Part 2: Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties
of magnetic sheet and strip



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6
Articles	INTRODUCTION
1. Domaine d'application et objet	8
2. Précision et reproductibilité	8
CHAPITRE I: CONDITIONS GÉNÉRALES DE MESURE EN COURANT ALTERNATIF AU MOYEN DU CADRE D'EPSTEIN DE 25 CM	
3. Objet	10
4. Domaine d'application	10
5. Principe de la méthode du cadre d'Epstein de 25 cm	10
6. Eprouvette	10
7. Cadre d'Epstein de 25 cm	12
8. Compensation du flux dans l'air	16
9. Source d'alimentation	16
10. Limites de l'induction	18
CHAPITRE II: DÉTERMINATION DES PERTES TOTALES SPÉCIFIQUES SELON LA MÉTHODE DU WATTMÈTRE	
11. Objet	20
12. Domaine d'application	20
13. Eprouvette	20
14. Principe de la mesure	20
15. Source d'alimentation	22
16. Appareillage	22
17. Mode opératoire	24
18. Détermination des pertes totales spécifiques	24
19. Reproductibilité	26
CHAPITRE III: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LES MÉTHODES DE PONT	
20. Objet	28
21. Domaine d'application	28
22. Eprouvette	28
23. Principe de la mesure	28
24. Source d'alimentation	32
25. Appareillage	32
26. Mode opératoire	34
27. Détermination des caractéristiques	34
28. Reproductibilité	38
CHAPITRE IV: DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ DE CHAMP MAGNÉTIQUE, DU COURANT MAGNÉTISANT ET DE LA PUISSANCE APPARENTE SPÉCIFIQUE	
29. Objet	40
30. Domaine d'application	40
31. Eprouvette	40
32. Principe de la mesure	40
33. Source d'alimentation	42

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7
INTRODUCTION	
Clause	
1. Scope and object	9
2. Accuracy and reproducibility	9
CHAPTER I: GENERAL CONDITIONS FOR A.C. MEASUREMENTS MADE WITH THE 25 CM EPSTEIN FRAME	
3. Object	11
4. Field of application	11
5. Principle of the 25 cm Epstein frame method	11
6. Test specimen	11
7. 25 cm Epstein frame	13
8. Air flux compensation	17
9. Power supply	17
10. Magnetic flux density limits	19
CHAPTER II: DETERMINATION OF SPECIFIC TOTAL LOSSES BY THE WATTMETER METHOD	
11. Object	21
12. Field of application	21
13. Test specimen	21
14. Principle of measurement	21
15. Power supply	23
16. Apparatus	23
17. Measuring procedure	25
18. Determination of specific total losses	25
19. Reproducibility	27
CHAPTER III: DETERMINATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS BY BRIDGE METHODS	
20. Object	29
21. Field of application	29
22. Test specimen	29
23. Principle of measurement	29
24. Power supply	33
25. Apparatus	33
26. Measuring procedure	35
27. Determination of characteristics	35
28. Reproducibility	39
CHAPTER IV: DETERMINATION OF MAGNETIC FIELD STRENGTH, EXCITATION CURRENT AND SPECIFIC APPARENT POWER	
29. Object	41
30. Field of application	41
31. Test specimen	41
32. Principle of measurement	41
33. Power supply	43

Articles	Pages
34. Appareillage	42
35. Mode opératoire	44
36. Détermination des caractéristiques	46
37. Reproductibilité	48

CHAPITRE V: DÉTERMINATION DE L'INDUCTION MAGNÉTIQUE EN CHAMP CONTINU

38. Principe de la mesure	50
39. Appareillage	50
40. Appareillage de mesure	52
41. Eprouvette	52
42. Méthode de la mesure	52
43. Reproductibilité	54

CHAPITRE VI: DÉTERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES TôLES MAGNÉTIQUES

44. Objet	56
45. Méthodes utilisées	56
46. Eprouvette	56
47. Méthode par immersion	56
48. Méthodes industrielles	58
49. Reproductibilité	60

CHAPITRE VII: DÉTERMINATION DE LA RÉSISTIVITÉ DES TôLES ET FEUILLARDS MAGNÉTIQUES

50. Objet	62
51. Domaine d'application	62
52. Eprouvette	62
53. Principe de la mesure	62
54. Source d'alimentation	64
55. Appareillage	64
56. Mode opératoire	64
57. Détermination de la résistivité	64
58. Reproductibilité	64

CHAPITRE VIII: DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE RÉSISTANCE D'ISOLEMENT SUPERFICIEL

59. Objet	66
60. Domaine d'application	66
61. Eprouvette	66
62. Principe de la mesure	66
63. Source d'alimentation	68
64. Appareillage	68
65. Mode opératoire	70
66. Détermination du coefficient de résistance d'isolement superficiel	70
67. Remarques sur l'essai de résistance d'isolement	70

CHAPITRE IX: DÉTERMINATION DU FACTEUR DE FOISONNEMENT

68. Objet	72
69. Mode opératoire	72

ANNEXE A — Inductance mutuelle pour la compensation du flux dans l'air	74
ANNEXE B — Théorie fondamentale de la perméabilité complexe	78
ANNEXE C — Principe de la méthode électrique de détermination de la masse volumique	84

Clause	Page
34. Apparatus	43
35. Measuring procedure	45
36. Determination of characteristics	47
37. Reproducibility	49

CHAPTER V: DETERMINATION OF MAGNETIC FLUX DENSITY IN A D.C. FIELD

38. Principle of measurement	51
39. Test apparatus	51
40. Measuring apparatus	53
41. Test specimen	53
42. Method of measurement	53
43. Reproducibility	55

CHAPTER VI: DETERMINATION OF THE DENSITY OF MAGNETIC SHEET

44. Object	57
45. Methods to be used	57
46. Test specimen	57
47. Immersion method	57
48. Industrial methods	59
49. Reproducibility	61

CHAPTER VII: DETERMINATION OF THE RESISTIVITY OF MAGNETIC SHEET AND STRIP

50. Object	63
51. Field of application	63
52. Test specimen	63
53. Principle of measurement	63
54. Power supply	65
55. Apparatus	65
56. Measuring procedure	65
57. Determination of resistivity	65
58. Reproducibility	65

CHAPTER VIII: DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF SURFACE INSULATION RESISTANCE

59. Object	67
60. Field of application	67
61. Test specimen	67
62. Principle of measurement	67
63. Power supply	69
64. Apparatus	69
65. Measuring procedure	71
66. Determination of the coefficient of surface insulation resistance	71
67. Notes on insulation resistance testing	71

CHAPTER IX: DETERMINATION OF STACKING FACTOR

68. Object	73
69. Measuring procedure	73

APPENDIX A: — Mutual inductor for air flux compensation	75
APPENDIX E: — Basic theory of complex permeability	79
APPENDIX C: — Basis of the electrical method for density determination	85

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Deuxième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques, électriques et physiques des tôles et feuillets magnétiques

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Comité d'Etudes N° 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Le premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Zurich en 1974. A la suite de cette réunion, un projet, document 68(Bureau Central)6, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en avril 1975. Des modifications, document 68(Bureau Central)11, furent soumises à l'approbation des Comités nationaux suivant la Procédure des Deux Mois en mars 1977.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')	Hongrie
Australie	Italie
Autriche	Pologne
Bésil	Roumanie
Canada	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Espagne	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
Finlande	Yougoslavie
France	

Autre publication de la CEI citée dans la présente norme:

Publication n° 51: Recommandations pour les appareils de mesure électriques indicateurs à action directe et leurs accessoires.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS

**Part 2: Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties
of magnetic sheet and strip**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 68, Magnetic Alloys and Steels.

The first draft was discussed at the meeting held in Zurich in 1974. As a result of this meeting, a draft, Document 68(Central Office)6, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1975. Amendments, Document 68(Central Office)11, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in March 1977.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Romania
Austria	South Africa (Republic of)
Brazil	Spain
Canada	Sweden
Denmark	Switzerland
Finland	Turkey
France	United Kingdom
Hungary	United States of America
Italy	Yugoslavia
Poland	

Other IEC publication quoted in this standard:

Publication No. 51: Recommendations for Direct Acting Indicating Electrical Measuring Instruments and Their Accessories.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Deuxième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques, électriques et physiques des tôles et feuillets magnétiques

INTRODUCTION

1. Domaine d'application et objet

La présente norme est applicable aux tôles et feuillets d'acier magnétique destinés à la construction des circuits magnétiques.

Elle a pour objet de définir la terminologie et de spécifier les méthodes de mesure des propriétés magnétiques, électriques et physiques des tôles et feuillets magnétiques.

2. Précision et reproductibilité

Dans le cas de plusieurs méthodes d'essai décrites dans cette norme, il n'est pas toujours possible de se référer aux principes fondamentaux.

La précision finale de l'appareillage d'essai est une fonction complexe dépendant des instruments de mesure et autres caractéristiques des conditions de mesure et des composants de l'équipement; il n'est donc pas toujours possible d'indiquer la précision absolue qui peut être atteinte.

Par ailleurs, pour une méthode donnée, l'expérience indique la reproductibilité qui peut être prévue. Chaque fois que le comité d'études ayant établi le projet a retenu des valeurs concernant la reproductibilité, ces dernières ont été indiquées dans cette norme.

MAGNETIC MATERIALS

Part 2: Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip

INTRODUCTION

1. Scope and object

This standard is applicable to magnetic steel sheet and strip for the construction of magnetic circuits.

Its object is to define terms and specify methods for the measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip.

2. Accuracy and reproducibility

In the case of several of the test methods described in this standard it is not always possible to refer to fundamental principles.

The final accuracy of the test apparatus is a complex function dependent on the measuring instruments and other features of the measuring environment and equipment components; therefore it is not always possible to state the absolute accuracy which can be attained.

Moreover, experience in the use of a given method indicates the reproducibility which can be expected. Whenever the drafting technical committee has agreed upon reproducibility values, these have been given in this standard.

CHAPITRE I: CONDITIONS GÉNÉRALES DE MESURE EN COURANT ALTERNATIF AU MOYEN DU CADRE D'EPSTEIN DE 25 CM

3. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition des conditions générales se rapportant à la détermination des propriétés magnétiques des tôles en courant alternatif à l'aide du cadre Epstein de 25 cm.

4. Domaine d'application

L'emploi du cadre d'Epstein de 25 cm s'applique aux bandes éprouvettes plates obtenues à partir des tôles et feuillards magnétiques, quelle que soit leur qualité.

La fréquence de mesure est spécifiée pour chaque méthode particulière. Les caractéristiques magnétiques doivent être déterminées pour une tension induite sinusoïdale.

Les mesures sont effectuées à la température ambiante de $23 \pm 5^\circ\text{C}$ sur des éprouvettes ayant été préalablement désaimantées.

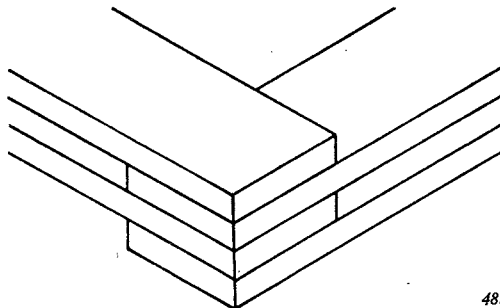
5. Principe de la méthode du cadre d'Epstein de 25 cm

Le cadre d'Epstein de 25 cm, comprenant un enroulement primaire, un enroulement secondaire et l'éprouvette à essayer comme noyau, forme un transformateur à vide dont les caractéristiques sont mesurées par un des procédés décrits dans les chapitres suivants.

6. Epreuve

Le circuit magnétique est constitué par un noyau fait avec les bandes à essayer, assemblées en carré avec joint à double recouvrement (voir la figure 1) et formant quatre branches d'égale longueur et d'égale section.

Les bandes sont prélevées suivant les prescriptions des normes de produit*.



483/78

FIG. 1. — Joint à double recouvrement.

* A l'étude.

CHAPTER I: GENERAL CONDITIONS FOR A.C. MEASUREMENTS MADE WITH THE 25 CM EPSTEIN FRAME

3. Object

The object of this chapter is to define the general conditions for the determination of a.c. magnetic properties of sheet by means of the 25 cm Epstein frame.

4. Field of application

The use of the 25 cm Epstein frame is applicable to flat strip specimens obtained from magnetic sheets and strips of any quality.

The frequency of measurement is specified for each particular method. Magnetic characteristics must be determined for a sinusoidal induced voltage.

The measurements are made at an ambient temperature of $23 \pm 5^\circ\text{C}$ on test specimens which have first been demagnetized.

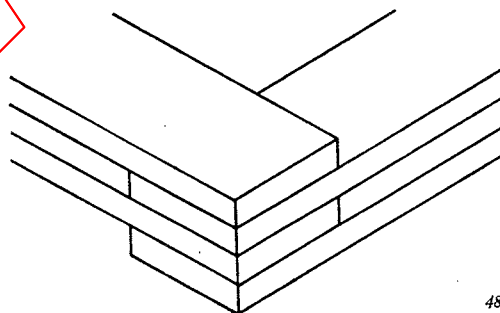
5. Principle of the 25 cm Epstein frame method

The 25 cm Epstein frame which comprises a primary winding, a secondary winding and the specimen to be tested as a core, forms an unloaded transformer whose characteristics are measured by one of the methods described in the following chapters.

6. Test specimen

The magnetic circuit is made up of a core constructed with the strips to be tested, assembled in a square having double-lapped joints (see Figure 1) to form four branches of equal length and equal cross-sectional area.

The strips are sampled in accordance with product standards*.



483/78

FIG. 1. — Double-lapped joints.

* Under consideration.

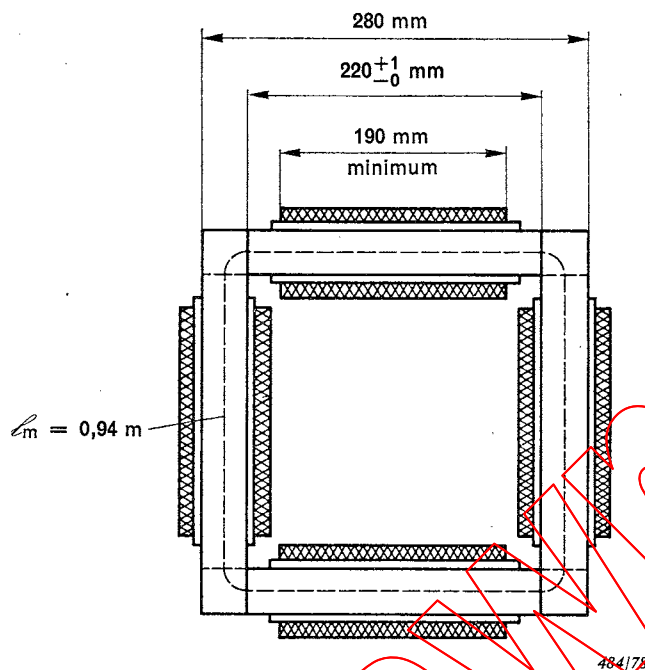


FIG. 2. — Cadre d'Epstein de 25 cm.

Elles doivent être découpées par un procédé permettant l'obtention d'une coupe franche et sans bavures. Elles doivent avoir les dimensions suivantes :

- largeur $b = 30 \pm 0,2$ mm;
- longueur l telle que $280 \text{ mm} \leq l \leq 500 \text{ mm}$, la longueur de la bande est mesurée avec une approximation de $\pm 0,5$ mm.

Dans le cas d'éprouvettes de longueur supérieure à 305 mm, des précautions seront prises pour éviter le fléchissement des bandes pendant l'essai.

Lors du découpage des bandes parallèlement ou perpendiculairement à la direction de laminage, la rive de la tôle mère est prise comme référence de cette direction.

On admettra les tolérances suivantes pour l'angle entre la direction de laminage et celle de découpage :

- $\pm 1^\circ$ pour les tôles à grains orientés;
- $\pm 5^\circ$ pour les tôles à grains non orientés.

On ne doit utiliser que des bandes planes. Les mesures devront être faites sans isolation supplémentaire.

Le nombre de bandes constituant l'éprouvette sera au moins égal à douze et sera un multiple de quatre. L'application d'une force d'environ 1 N sur chaque coin, perpendiculairement au plan des bandes se recouvrant, est tolérée.

7. Cadre d'Epstein de 25 cm

Le cadre d'Epstein de 25 cm (appelé dans ce qui suit « cadre d'Epstein ») se compose de quatre solénoïdes dans lesquels sont introduites les bandes constituant l'éprouvette, de façon à former un circuit magnétique fermé (voir la figure 2).

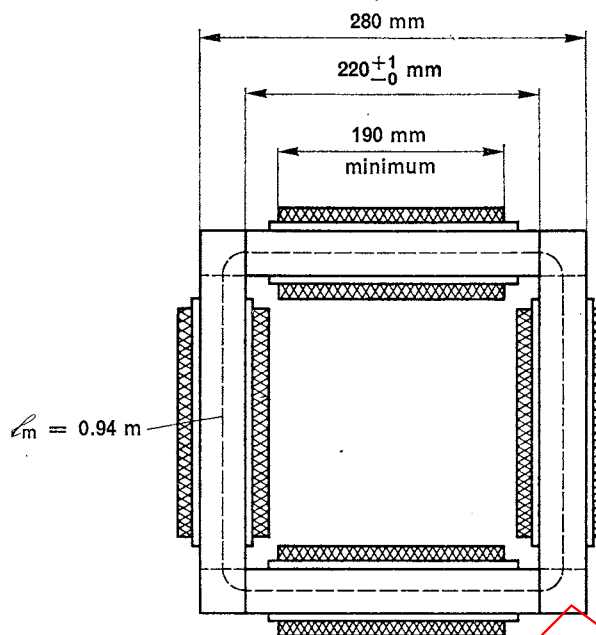


FIG. 2. — 25 cm Epstein frame.

They shall be cut by a method which will produce clean burr-free edges. They shall have the following dimensions:

- width $b = 30 \pm 0.2$ mm;
- length $280 \text{ mm} \leq l \leq 500 \text{ mm}$, the length of the strip is measured with a tolerance of ± 0.5 mm.

For strips of greater length than 305 mm, care shall be taken to avoid the bending of the strips during the test.

When the strips are cut parallel or normal to the direction of rolling, the edge of the parent sheet is taken as the reference direction.

The following tolerances will be allowed for the angle between the direction of rolling and that of cutting:

- $\pm 1^\circ$ for grain-oriented steel sheet;
- $\pm 5^\circ$ for non-oriented steel sheet.

Only flat strips shall be used. Measurements are to be made without additional insulation.

The number of strips forming a test specimen shall be not less than twelve and shall be a multiple of four. It is permissible to apply a force of about 1 N to each corner, normal to the plane of the overlapping strips.

7. 25 cm Epstein frame

The 25 cm Epstein frame (hereafter referred to as “Epstein frame”) consists of four solenoids into which the test specimen strips are introduced in such a manner that a closed magnetic circuit is formed (see Figure 2).

Une inductance mutuelle de compensation du flux dans l'air complète cet équipement (annexe A).

Les mandrins des solénoïdes fabriqués en matière dure et isolante, par exemple en laiton phénolique, ont une section rectangulaire et une largeur intérieure de 32 mm. Une hauteur de l'ordre de 10 mm suffit et est recommandée.

Les solénoïdes sont fixés sur un support isolant et non magnétique de façon à former un cadre carré. La longueur des côtés du carré intérieur constitué par les bandes éprouvettes doit être de 220 ± 10 mm (figure 2).

En vue d'éviter une usure trop rapide des mandrins et en particulier de leurs flancs internes, on peut utiliser des mandrins de section plus grande, dans lesquels peuvent être glissés des manchons remplaçables de dimensions appropriées.

Chaque solénoïde comprend deux enroulements:

- un enroulement primaire extérieur (enroulement d'aimantation);
- un enroulement secondaire intérieur (enroulement de tension).

Un blindage électrostatique peut être prévu entre ces enroulements.

Les enroulements doivent être répartis uniformément sur une longueur au moins égale à 190 mm, chaque solénoïde comportant le quart du nombre total de spires. Les enroulements individuels primaires des quatre solénoïdes sont reliés en série, de même que les enroulements individuels secondaires.

On peut choisir le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire en fonction des conditions particulières de la source d'alimentation, de l'appareillage et de la fréquence de mesure. Il n'est pas conseillé d'employer un faible nombre de spires pour chacun des enroulements. Pour les mesures dans la gamme de fréquences de 50 Hz à 400 Hz, les nombres de 700 ou 1 000 spires au total sont le plus couramment employés et leur utilisation est recommandée. Pour les essais à des fréquences plus élevées, un nombre réduit de spires est utilisé.

En vue de réduire suffisamment les impédances des enroulements afin de minimiser la déformation de la forme d'onde et les chutes internes de tension, il est nécessaire de respecter les prescriptions suivantes:

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1,25 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$

$$\frac{L_2}{N_2^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$

R_1, R_2 = résistances des enroulements primaire et secondaire, respectivement, en ohms

L_1, L_2 = inductances des enroulements primaire et secondaire, respectivement, sans échantillon en place, en henrys

N_1, N_2 = nombres de spires totaux des enroulements primaire et secondaire, respectivement

Ces prescriptions sont respectées, par exemple, en utilisant des enroulements de caractéristiques suivantes:

Nombre total de spires: $N_1 = 700, N_2 = 700$.

Enroulement primaire (extérieur): Chaque solénoïde comprend 175 spires de deux fils de cuivre de $1,8 \text{ mm}^2$ de section, bobinés côte à côte en trois couches et connectés en parallèle.

Enroulement secondaire (intérieur): Chaque solénoïde comprend 175 spires de fil de cuivre de $0,8 \text{ mm}^2$ de section, bobiné en une couche.

A mutual inductor for air flux compensation completes this test set-up (Appendix A).

The winding formers supporting the solenoids are made of hard insulating material, such as phenolic-paper, and have a rectangular cross-section of 32 mm inner width. A height of about 10 mm will be sufficient and is recommended.

The solenoids are mounted on a non-conductive and non-magnetic base plate in a square arrangement. Each side of the inner square formed by the test specimen strips shall have a length of $220 \pm \frac{1}{0}$ mm (Figure 2).

In order to avoid undue wear of the winding formers and especially of their inner surfaces, winding formers of larger cross section may be used into which replaceable liners of appropriate dimensions may be inserted.

Each solenoid comprises two windings:

- a primary outer winding (magnetising winding);
- a secondary inner winding (voltage winding).

An electrostatic screen may be provided between these windings.

The windings on each solenoid shall be evenly distributed over a length of at least 190 mm, with each solenoid carrying one fourth of the total number of turns. The individual primary windings of the four solenoids are connected in series, and the secondary individual windings are connected in a similar fashion.

The number of turns of the primary and secondary windings may be chosen to suit the particular conditions of the power supply, instrumentation and measuring frequency. It is not advisable to use a small number of turns for either the primary or secondary winding. Totals of 700 or 1 000 turns are recommended and are commonly used for tests in the frequency range 50 Hz to 400 Hz. For testing at higher frequencies, a reduced number of turns is used.

In order to make the impedances of the windings sufficiently small to minimize waveform distortion and internal voltage drops, the following requirements should be met:

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1,25 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$

$$\frac{L_2}{N_2^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$

R_1, R_2 = resistance values of the primary and secondary windings, respectively, in ohms

L_1, L_2 = inductance values of the primary and secondary windings, respectively, without the sample in place, in henrys

N_1, N_2 = total number of turns of the primary and secondary windings, respectively

These requirements are complied with, for instance, by the use of windings with the following characteristics:

Total number of turns: $N_1 = 700, N_2 = 700$.

Primary (outer) winding: Each solenoid wound with 175 turns of two copper wires of 1.8 mm² cross-sectional area, wound side by side in three layers and connected in parallel.

Secondary (inner) winding: Each solenoid wound with 175 turns of copper wire of 0.8 mm² cross-sectional area, wound in one layer.

La longueur effective ℓ du circuit magnétique obtenue avec ce dispositif d'essai est prise conventionnellement égale à 0,94 m.

En conséquence, la masse active, c'est-à-dire la masse de l'éprouvette qui est active magnétiquement, est donnée par l'équation:

$$m_a = \frac{\ell_m}{4\ell} \cdot m \quad (1)$$

m_a = masse active de l'éprouvette, en kilogrammes

m = masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes

ℓ_m = longueur conventionnelle active du circuit magnétique, en mètres

ℓ = longueur d'une bande éprouvette, en mètres

8. Compensation du flux dans l'air

L'inductance mutuelle pour la compensation du flux dans l'air (annexe A) est logée au centre de l'espace disponible entre les quatre solénoïdes, son axe étant perpendiculaire au plan de ceux-ci. Les enroulements de l'inductance mutuelle doivent être connectés en série avec les enroulements correspondants du cadre d'Epstein.

Comme il est décrit dans l'annexe A, l'inductance mutuelle de compensation doit être réglée et rendue égale à celle des enroulements du cadre d'Epstein vide. Lorsque les enroulements sont connectés comme il convient, la tension induite par le courant primaire dans l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle compense la tension induite par le flux attribué au courant primaire dans l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein vide.

9. Source d'alimentation

La source doit avoir une faible impédance interne et une excellente stabilité en tension et en fréquence. Pendant les mesures, les variations de tension et de fréquence ne doivent pas dépasser $\pm 0,2\%$ de leur valeur spécifiée. En outre, la forme de l'onde de la tension secondaire induite sera maintenue aussi sinusoïdale que possible.

Il est préférable de maintenir le facteur de forme de la tension secondaire égal à $1,111 \pm 1\%$ (cela peut être obtenu de diverses manières: par exemple à l'aide d'une source d'alimentation électronique asservie). Si cette condition ne peut pas être remplie, on peut effectuer une correction des pertes, mais seulement si l'écart du facteur de forme par rapport à sa valeur théorique ne dépasse pas $\pm 5\%$. La formule de correction des pertes est dérivée de l'équation suivante:

$$P_t = P_h + P_p \left(\frac{F}{1,111} \right)^2 \quad (2)$$

P_t = pertes mesurées, en watts par kilogramme

P_h = pertes apparentes par hystérésis, en watts par kilogramme

P_p = pertes apparentes par courants de Foucault en régime sinusoïdal, en watts par kilogramme

F = facteur de forme mesuré

Les pertes corrigées peuvent être obtenues avec précision par la formule:

$$P_s = \frac{P_t}{P_h / P_s + (P_p / P_s) \cdot \left(\frac{F}{1,111} \right)^2} \quad (3)$$

The effective length ℓ of the magnetic path in this test equipment is conventionally taken as 0.94 m.

Consequently, the effective mass, i.e. the magnetically active mass of the test specimen, is given by the equation:

$$m_a = \frac{\ell_m}{4\ell} \cdot m \quad (1)$$

m_a = effective mass of test specimen, in kilogrammes

m = total mass of test specimen, in kilogrammes

ℓ_m = conventional effective magnetic path length, in metres

ℓ = length of a test specimen strip, in metres

8. Air flux compensation

The mutual inductor for air flux compensation (Appendix A) is located in the centre of the space enclosed by the four solenoids, its axis being directed normal to the plane of the latter. The windings of the mutual inductor shall be connected in series with the corresponding windings of the Epstein frame.

As described in Appendix A, the mutual inductance of the compensator shall be adjusted to be the same as that of the windings of the empty Epstein frame. Thus when the windings are properly connected, the voltage induced in the secondary winding of the mutual inductor by the primary current will compensate for the voltage induced in the secondary winding of the empty Epstein frame by the flux attributed to the primary current.

9. Power supply

The source shall be of low internal impedance and shall be highly stable in terms of voltage and frequency. During the measurement, the variation of voltage and the variation of frequency shall not exceed $\pm 0.2\%$ of the specified value. In addition, the waveform of the secondary induced voltage shall be maintained as sinusoidal as possible.

It is preferable to maintain the form factor of the secondary voltage within $\pm 1\%$ of 1.111 (this may be achieved by various means, e.g. electronic feedback amplifiers). If this condition cannot be maintained, it is permitted to make corrections to the loss measurement for deviation in form factor of up to a maximum of $\pm 5\%$. The formula for correcting watt loss is derived from the following equation:

$$P_t = P_h + P_p \left(\frac{F}{1.111} \right)^2 \quad (2)$$

P_t = measured loss, in watts per kilogramme

P_h = apparent hysteresis loss, in watts per kilogramme

P_p = apparent eddy loss for sine flux conditions, in watts per kilogramme

F = measured form factor

The corrected loss may be obtained most precisely with:

$$P_s = \frac{P_t}{P_h / P_s + (P_p / P_s) \cdot \left(\frac{F}{1.111} \right)^2} \quad (3)$$

mais une valeur suffisamment exacte peut être obtenue à partir de la formule approximative:

$$\Delta P = 2 \left(\frac{P_p}{P_s} \right) \left(\frac{\Delta F}{1,111} \right) P_t \quad (4)$$

P_s = pertes pour une induction sinusoïdale, en watts par kilogramme

P_t = pertes mesurées, en watts par kilogramme

$\frac{P_h}{P_s}$ = proportion de pertes par hystérésis

$\frac{P_p}{P_s}$ = proportion de pertes par courants de Foucault

ΔP = modification des pertes dues à la variation du facteur de forme, en watts par kilogramme

Les valeurs conventionnelles des proportions de pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont habituellement déterminées pour les diverses classes et épaisseurs des produits par la méthode de séparation des pertes pour deux facteurs de forme.

Le facteur de forme de la tension secondaire est le rapport de sa valeur efficace à sa valeur redressée. La première est mesurée par un voltmètre de valeur efficace, tel qu'un appareil ferromagnétique, la seconde par un voltmètre de valeur redressée, tel qu'un appareil à redresseur.

Note. — Lorsqu'une source d'alimentation électrique asservie est employée, il peut être nécessaire d'observer la forme d'onde de la tension secondaire induite au moyen d'un oscillographe afin de s'assurer que la forme d'onde de la fréquence fondamentale est bien produite.

10. Limites de l'induction

Pour chaque méthode de mesure décrite dans les chapitres suivants, sont spécifiées les limites typiques du domaine des inductions pour lesquelles on a pu déterminer que les mesures étaient valables. Ces limites dépendent de la qualité de l'acier, des caractéristiques de la source, des instruments, du cadre d'Epstein, de l'inductance mutuelle utilisée pour la compensation du flux dans l'air, etc. Pour assurer des mesures valables, il est essentiel de maintenir une forme d'onde de la tension induite sinusoïdale (voir article 9). En aucun cas, l'écart du facteur de forme de la tension induite par rapport à la valeur correspondant à une tension sinusoïdale ne doit dépasser $\pm 5\%$.

but a result of sufficient accuracy can be obtained from the approximate formula:

$$\Delta P = 2 \left(\frac{P_p}{P_s} \right) \left(\frac{\Delta F}{1.111} \right) P_t \quad (4)$$

P_s = loss for sine flux conditions, in watts per kilogramme

P_t = measured loss, in watts per kilogramme

$\frac{P_h}{P_s}$ = proportion of hysteresis losses

$\frac{P_p}{P_s}$ = proportion of eddy losses

ΔP = change in watt loss due to waveform distortion, in watts per kilogramme

The conventional values of proportions of hysteresis and eddy losses are commonly derived for the various thicknesses and classes of commercial materials by the two form factor loss separation procedure.

The form factor of the secondary voltage is the quotient of the r.m.s. value and the average rectified value. The former is measured by an r.m.s. voltmeter, such as a moving iron instrument, and the latter by an average voltmeter, such as a rectifier-type instrument.

Note. — When a negative feedback amplifier is used for the supply it may be necessary to observe the waveform of the secondary induced voltage on an oscilloscope to ensure that fundamental frequency waveform is being produced.

10. Magnetic flux density limits

In each measuring method described in the following chapters, the magnetic flux density limits which typically have been found to ensure validity of test are specified. These limits depend upon the quality of the steel, the characteristics of the source, the instrumentation, the Epstein frame, and the mutual inductor used for air flux compensation, etc. To permit valid testing, it is essential that the induced voltage waveform shall be maintained sinusoidal (see Clause 9). In no case should the form factor of the induced voltage deviate from that of a sinusoidal voltage by more than $\pm 5\%$.

CHAPITRE II: DÉTERMINATION DES PERTES TOTALES SPÉCIFIQUES ; SELON LA MÉTHODE DU WATTMÈTRE

11. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition de la méthode du wattmètre pour la détermination des pertes totales spécifiques des tôles et feuillards magnétiques.

12. Domaine d'application

Les pertes totales spécifiques sont déterminées selon la méthode suivante, pour des valeurs de crête de l'induction spécifiées et pour une fréquence spécifiée.

Afin d'obtenir des résultats comparables, les valeurs d'essais doivent se rapporter à une induction de forme d'onde sinusoïdale. Par conséquent, pour les tôles à grains non orientés, les mesures sont généralement possibles jusqu'à une induction $\hat{B}$ égale à 1,5 T et pour les tôles à grains orientés jusqu'à $\hat{B}$ égale à 1,8 T (voir articles 9 et 10).

Les mesures sont faites de préférence dans une gamme de fréquences de 15 Hz à 100 Hz. Moyennant l'emploi d'instruments appropriés, la limite supérieure peut être augmentée.

13. Epreuve

Les bandes épreuve utilisées pour les mesures sont conformes aux spécifications de l'article 6.

14. Principe de la mesure

Le cadre d'Epstein de 25 cm contenant l'épreuve constitue un transformateur fonctionnant à vide dont les pertes totales sont mesurées par la méthode du wattmètre selon le schéma de principe de la figure 3.

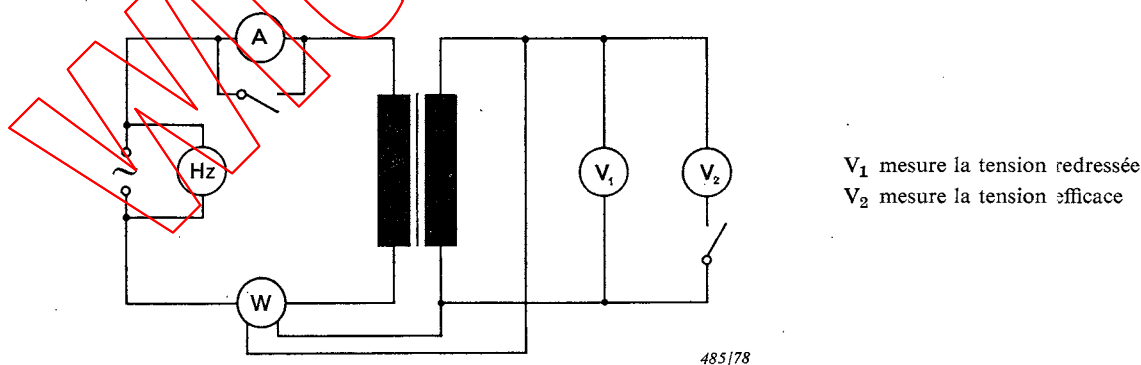


FIG. 3. — Schéma de principe pour la méthode du wattmètre.

En vue d'éviter l'influence sur les mesures des pertes Joule et de la chute de tension dans l'enroulement primaire, le voltmètre et le circuit de tension du wattmètre sont reliés au secondaire.

Note. — Pour des raisons de simplification, on n'a pas représenté, sur la figure 3 et sur les schémas suivants, l'inductance mutuelle de compensation du flux dans l'air.

CHAPTER II: DETERMINATION OF SPECIFIC TOTAL LOSSES BY THE WATTMETER METHOD

11. Object

The object of this chapter is to define the wattmeter method for the determination of the specific total losses of magnetic sheet and strip.

12. Field of application

The specific total losses are determined, according to this method, for specified peak values of magnetic flux density and for a specified frequency.

In order to obtain comparable results, test values must be referred to magnetic flux density of sinusoidal waveform. Consequently, non-oriented sheet is generally measurable up to a magnetic flux density of $\hat{B} = 1.5$ T, and grain-oriented sheet up to $\hat{B} = 1.8$ T (see Clauses 9 and 10).

Measurements are made preferably within a frequency range of 15 Hz to 100 Hz. If suitable instruments are used, the upper limit may be raised.

13. Test specimen

Test specimen strips complying with the specifications of Clause 6 are used for the measurements.

14. Principle of measurement

The 25 cm Epstein frame with the test specimen represents an unloaded transformer whose total losses are measured by the wattmeter method in the circuit shown in Figure 3 which illustrates the principle.

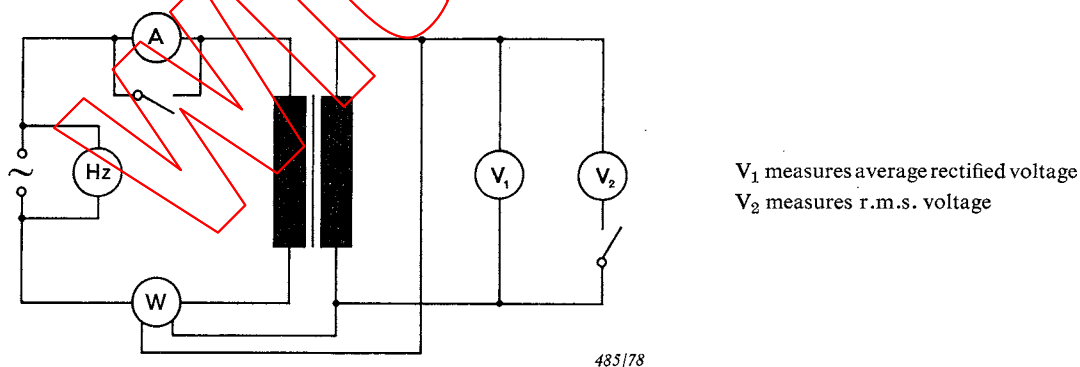


FIG. 3. — Circuit for the wattmeter method.

In order to prevent the Joule losses and the voltage drop in the primary winding from influencing the measurement, the voltmeter and the voltage circuit of the wattmeter are connected to the secondary winding.

Note. — For simplicity, the mutual inductor used for air flux compensation is not shown in Figure 3 and subsequent diagrams.

15. Source d'alimentation

La source d'alimentation doit être conforme aux spécifications générales de l'article 9.

16. Appareillage

16.1 Mesure de la tension

16.1.1 Voltmètre de valeur redressée

La valeur redressée de la tension secondaire du cadre d'Epstein est mesurée à l'aide d'un voltmètre de valeur redressée de classe 0,5 ou meilleure (pour les classes de précision des instruments, voir la Publication 51 de la CEI: Recommandations pour les appareils de mesure électriques indicateurs à action directe et leurs accessoires).

Note. — Les appareils de ce type sont généralement gradués en valeur redressée multipliée par 1,111.

Les voltmètres électroniques peuvent être également utilisés.

La charge du circuit secondaire sera aussi faible que possible. Par conséquent, la résistance interne du voltmètre de valeur redressée sera au moins égale à $1\,000\ \Omega/V$.

Un amplificateur ayant une impédance d'entrée supérieure ou égale à $1\,000\ \Omega/V$ peut être utilisé si la précision totale du dispositif (y compris l'appareil de mesure) est équivalente à celle d'un voltmètre de classe 0,5 ou meilleure.

16.1.2 Voltmètre de valeur efficace

Un voltmètre de valeur efficace de classe 0,5 ou meilleure doit être utilisé.

16.2 Mesure du courant

Le courant primaire peut être mesuré au moyen d'un ampèremètre de faible impédance de classe 1 ou meilleure. Dans ce cas, l'ampèremètre doit être court-circuité pour le réglage de la tension secondaire et la mesure des pertes.

16.3 Mesure de la fréquence

Utiliser un fréquencemètre de classe 0,5 ou meilleure. Un instrument de classe 0,2 est indiqué lorsqu'on vise une grande précision de mesure.

16.4 Mesure de la puissance

La puissance sera mesurée au moyen d'un wattmètre très sensible de classe 0,5 ou meilleure, adapté à des circuits à faible facteur de puissance ($\cos \varphi = 0,1$ ou $0,2$). Les lectures dans le premier quart d'échelle doivent être évitées autant que possible.

La résistance du circuit de tension du wattmètre sera supérieure ou égale à $100\ \Omega/V$ pour tous les calibres. Si nécessaire, les pertes dans le circuit secondaire doivent être soustraites de la valeur des pertes indiquée. Un wattmètre électronique approprié peut être utilisé.

De plus, la résistance du circuit de tension sera au moins égale à 5000 fois sa réactance, à moins que le wattmètre ne soit compensé pour celle-ci. On évite de cette façon les corrections d'angle de phase. Une liaison électrique peut être établie entre les enroulements primaire et secondaire s'il faut égaliser le potentiel entre les bobines de tension et de courant du wattmètre, conformément aux spécifications de ce dernier.

15. Power supply

The general specifications of power supply in Clause 9 should be followed.

16. Apparatus

16.1 Voltage measurement

16.1.1 Average type voltmeter

The average value of the secondary rectified voltage of the Epstein frame is measured by an average type voltmeter of class 0.5 or better (for instrument classes see IEC Publication 51, Recommendations for Direct Acting Indicating Electrical Measuring Instruments and Their Accessories).

Note. — Instruments of this type are usually graduated in average rectified value multiplied by 1.111.

Electronic voltmeters can also be used.

The load on the secondary circuit of the network should be as small as possible. Consequently, the internal resistance of the average type voltmeter should be at least $1\,000\ \Omega/V$.

An amplifier with input impedance greater than or equal to $1\,000\ \Omega/V$ may be used, if the total accuracy of the apparatus (including measuring instrument) is equivalent to that of a voltmeter of class 0.5 or better.

16.1.2 R.M.S. voltmeter

A voltmeter of accuracy class 0.5 or better, responsive to r.m.s. values shall be used.

16.2 Current measurement

The primary current may be measured by a class 1 ammeter or better of low impedance. In such a case the ammeter should be short-circuited when the secondary voltage is adjusted and the losses are measured.

16.3 Frequency measurement

A frequency meter of class 0.5 or better is required. An instrument of class 0.2 is indicated when the aim is high accuracy measurement.

16.4 Power measurement

Power is measured by a highly sensitive wattmeter of class 0.5 or better, suitable for circuits of low power factor ($\cos \varphi = 0.1$ or 0.2). Readings in the first quarter of the scale should be avoided as far as possible.

The resistance of the voltage circuit of the wattmeter should be greater than or equal to $100\ \Omega/V$ for all ranges. If necessary the losses in the secondary circuit should be subtracted from the indicated loss value. A suitable electronic wattmeter can be used.

Moreover, the ohmic resistance of the voltage circuit should be at least 5 000 times the reactance, unless the wattmeter is compensated for the latter. Thus, corrections of phase angle are avoided. Where appropriate, to meet the specification of the wattmeter in respect of the voltage between current and voltage coils, the primary and secondary windings of the square may be joined.

17. Mode opératoire

17.1 Préparation de la mesure

L'éprouvette est pesée et sa masse déterminée avec une approximation meilleure que $\pm 0,1\%$. Après pesée, les bandes sont introduites dans les solénoïdes du cadre d'Epstein et empilées de façon à former des joints à double recouvrement. Dans le cas de bandes découpées, moitié dans le sens parallèle à l'axe de laminage et moitié perpendiculairement à ce sens, on veillera à ce que les bandes découpées dans le sens du laminage soient toutes placées dans deux branches opposées du cadre et celles découpées perpendiculairement à ce sens dans les deux autres branches opposées. Les joints doivent former un entrefer minimal entre les bandes. Les bandes doivent être disposées conformément aux indications de l'article 7. Le nombre de bandes doit être le même dans chaque solénoïde.

Avant la mesure, l'éprouvette doit être désaimantée par application d'un champ magnétique alternatif décroissant.

17.2 Réglage de la source

La source est réglée de manière que la valeur redressée de la tension secondaire soit:

$$\bar{U}_2 = 4fN_2 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_t} \right) A \hat{B}_1 \quad (5)$$

$\bar{U}_2$ = valeur redressée de la tension secondaire, en volts

f = fréquence, en hertz

R_1 = résistance équivalente combinée des appareils dans le circuit secondaire, en ohms

R_t = somme des résistances des enroulements secondaires du cadre d'Epstein et de l'inductance mutuelle, en ohms

N_2 = nombre de spires de l'enroulement secondaire

A = section de l'éprouvette, en mètres carrés

$\hat{B}_1$ = valeur de crête de l'induction intrinsèque, en teslas

La section A est donnée par l'équation:

$$A = \frac{m}{4\ell\rho_m} \quad (6)$$

m = masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes

ℓ = longueur d'une bande éprouvette, en mètres

ρ_m = masse volumique du matériau en essai, en kilogrammes par mètre cube

(quelques méthodes de mesure de la masse volumique sont décrites au chapitre 11).

17.3 Mesures

Le courant primaire est lu à l'ampèremètre pour vérifier que le circuit de courant du wattmètre n'est pas surchargé. Ensuite l'ampèremètre est court-circuité et la tension secondaire est réglée à nouveau. Après contrôle de la forme d'onde du circuit secondaire conformément à l'article 9, on procède à la lecture du wattmètre.

18. Détermination des pertes totales spécifiques

La puissance P_m mesurée par le wattmètre comprend la puissance consommée par les instruments du circuit secondaire; celle-ci est égale, en première approximation, à $(1,111 |\bar{U}_2|)^2/R$ puisque la tension secondaire est essentiellement sinusoïdale.

17. Measuring procedure

17.1 Preparation for measurement

The test specimen is weighed and its mass determined within $\pm 0.1\%$. After weighing, the strips are stacked into the solenoids of the Epstein frame with double-lapped joints at the corners. In the case of strips which are cut half in the direction of rolling and half normal to that direction, care shall be taken that all the strips cut in the direction of rolling are placed in two opposite arms of the frame and that those out normal to that direction are placed in the two other opposite arms. The joints shall form a minimum gap between the strips. The strips shall be positioned so as to conform with the requirements of Clause 7. The number of strips shall be the same in each solenoid.

Before measurement, the test specimen should be demagnetized by a decreasing alternating magnetic field.

17.2 Source setting

The source is adjusted so that the average rectified value of the secondary voltage is:

$$\bar{U}_2 = 4fN_2 \left(\frac{R_i}{R_i + R_t} \right) A \hat{B}_1 \quad (5)$$

$\bar{U}_2$ = average value of secondary rectified voltage, in volts

f = frequency, in hertz

R_i = combined resistance of instruments in the secondary circuit, in ohms

R_t = series resistance of the secondary windings of Epstein frame and mutual inductor, in ohms

N_2 = number of turns of the secondary winding

A = cross-section of test specimen, in square metres

$\hat{B}_1$ = peak value of intrinsic magnetic flux density, in teslas

The cross-section A is obtained by the equation:

$$A = \frac{m}{4\ell\rho_m} \quad (6)$$

m = total mass of test specimen, in kilogrammes

ℓ = length of a test specimen strip, in metres

ρ_m = density of the test material, in kilogrammes per cubic metre

(some methods of determining density are detailed in Chapter VI).

17.3 Measurements

The ammeter in the primary circuit is observed to ensure that the current circuit of the wattmeter is not overloaded. Then the ammeter is short-circuited and the secondary voltage readjusted. After checking the waveform of the secondary voltage in compliance with Clause 9, the wattmeter is read.

18. Determination of specific total losses

The power P_m measured by the wattmeter includes the power consumed by the instruments in the secondary circuit, which to a *first approximation* is equal to $(1.111 |\bar{U}_2|)^2 / R_i$ since the secondary voltage is essentially sinusoidal.

Les pertes totales P_c de l'éprouvette sont donc calculées d'après l'équation:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \cdot P_m - \frac{(1,111 |\bar{U}_2|)^2}{R_1} \quad (7)$$

P_c = pertes totales calculées de l'éprouvette, en watts

P_m = puissance mesurée par le wattmètre, en watts

N_1 = nombre de spires de l'enroulement primaire

N_2 = nombre de spires de l'enroulement secondaire

R_1 = résistance équivalente combinée des appareils dans le circuit secondaire, en ohms

Les pertes totales spécifiques P_s sont obtenues en divisant P_c par la masse active de l'éprouvette (article 7).

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c \cdot 4\ell}{m \cdot \ell_m} \quad (8)$$

P_s = pertes totales spécifiques de l'éprouvette, en watts par kilogramme (éventuellement corrigées selon l'article 9)

m = masse totale de l'échantillon, en kilogrammes

m_a = masse active de l'éprouvette, en kilogrammes

ℓ = longueur d'une éprouvette, en mètres

ℓ_m = longueur conventionnelle effective du circuit magnétique, en mètres ($\ell_m \approx 0,94 m$)

Les pertes totales spécifiques ainsi calculées sont arrondies au centième de watt par kilogramme.

19. Reproductibilité

La reproductibilité des résultats obtenus selon cette méthode de mesure est caractérisée par un écart type de 1% à 1,5%.