

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 Varembé
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 WATFMETER 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

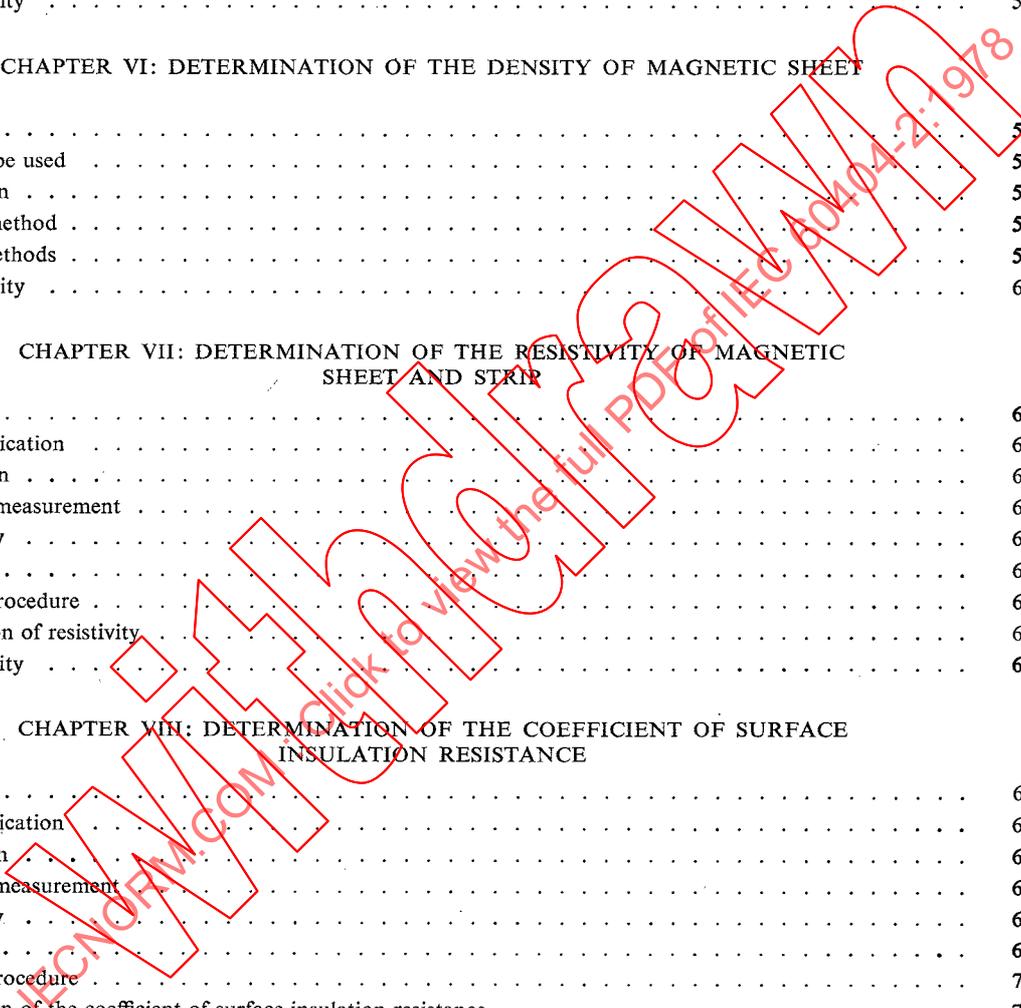
CHAPTER VIII: DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF SURFACE INSULATION RESISTANCE

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 feuillards 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 ± 5 °C sur des éprouvettes ayant été préalablement désaimantées.

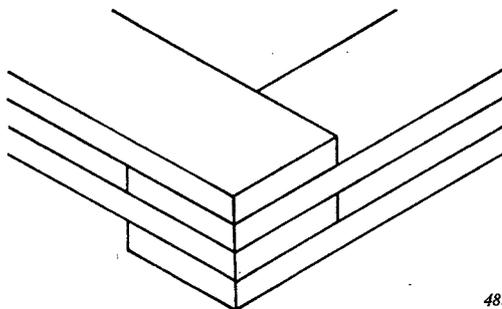
5. Principe de la méthode du cadre d'Epstein de 25 cm

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.

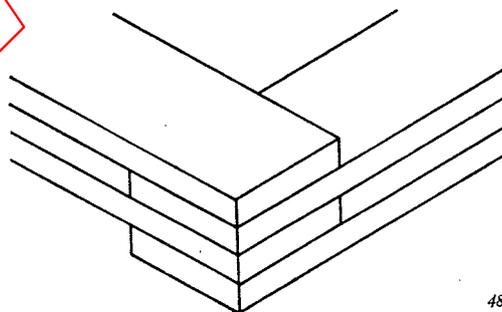
5. Principle of the 25 cm Epstein frame method

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.

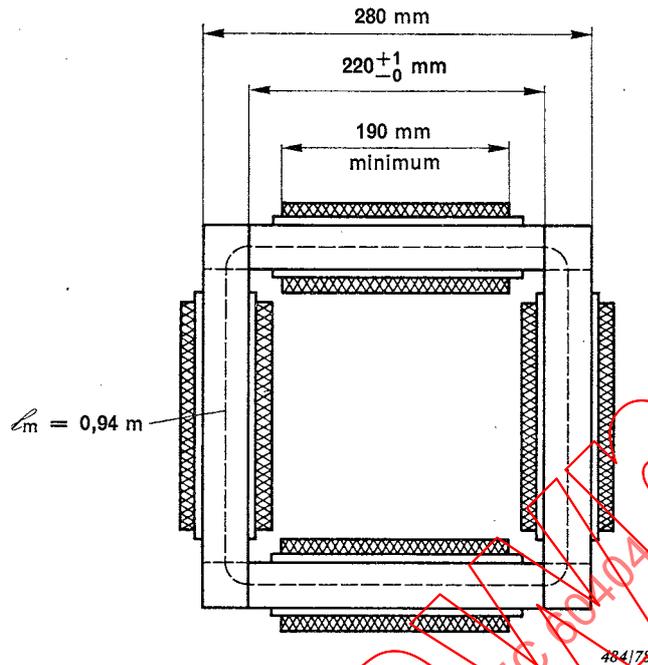


FIG. 2. — Cadre d'Epstein de 25 cm.

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).

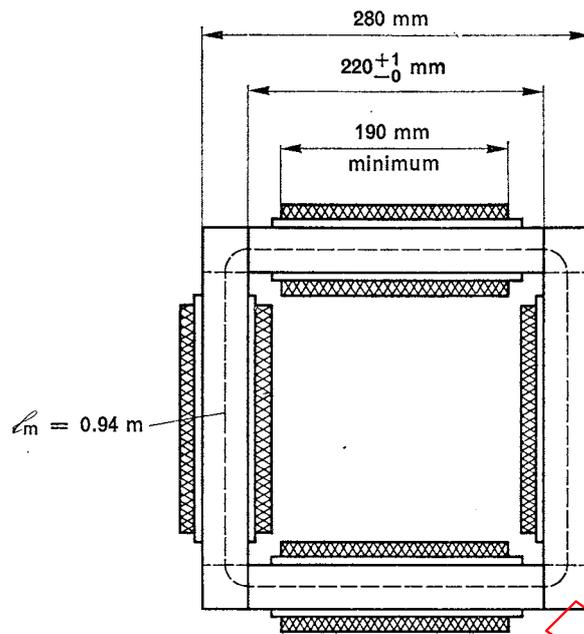


FIG. 2. — 25 cm Epstein frame.

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

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

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 laminé 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 $220 \pm \frac{1}{2}$ 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 feuillets 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. Eprouvette

Les bandes échantillons 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'échantillon 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.

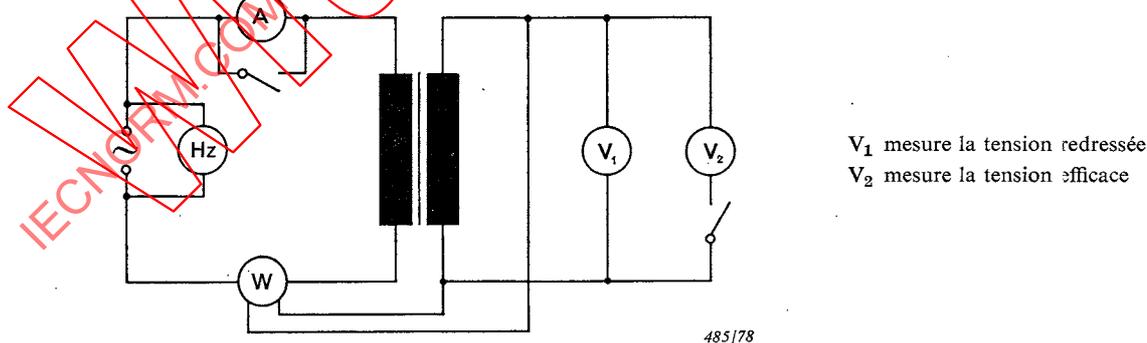


FIG. 3. — Schéma de principe pour la méthode du wattmètre.

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.

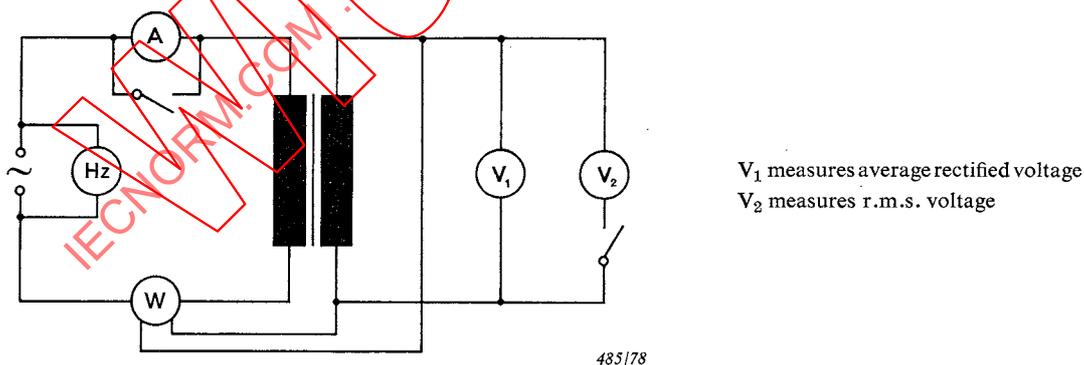


FIG. 3. — Circuit for the wattmeter method.

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 Ω/V .

An amplifier with input impedance greater than or equal to 1 000 Ω/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 Ω/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:

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

\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_i = 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:

$$\bar{U}_2 = 4 f N_2 \left(\frac{R_i}{R_i + R_t} \right) A \hat{B}_1 \quad (5)$$

\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%.

Thus, the total losses P_c of the test specimen are calculated by the equation:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \cdot P_m - \frac{(1.111 |\bar{U}_2|)^2}{R_1} \quad (7)$$

P_c = calculated total losses of test specimen, in watts

P_m = power measured by the wattmeter, in watts

N_1 = number of turns of the primary winding

N_2 = number of turns of the secondary winding

R_1 = combined equivalent resistance of the instruments in the secondary circuit, in ohms

The specific total losses P_s are obtained by dividing P_c by the effective mass of the test specimen (Clause 7).

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

P_s = specific total losses of test specimen, in watts per kilogram (corrected if necessary for flux waveform distortion according to Clause 9)

m = total mass of test specimen, in kilogrammes

m_a = effective mass of test specimen, in kilogrammes

ℓ = length of a test specimen, in metres

ℓ_m = conventional effective magnetic path length, in metres ($\ell_m = 0.94 \text{ m}$)

The specific total losses calculated in this way are rounded to the nearest hundredth of a watt per kilogramme.

19. Reproducibility

The reproducibility of the results obtained from this method is characterized by a standard deviation of 1% to 1.5%.

CHAPITRE III: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LES MÉTHODES DE PONT

20. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition des méthodes de pont à adopter pour la détermination des pertes totales spécifiques, de la perméabilité, de l'inverse de la perméabilité complexe et de ses composantes.

21. Domaine d'application

Selon ces méthodes, les caractéristiques sont déterminées pour des valeurs de crête de l'induction et pour des fréquences spécifiées. L'application de ces méthodes suppose que les mesures sont effectuées pour une forme sinusoïdale de la tension induite (voir articles 9 et 10 ainsi que l'annexe A). Par conséquent, pour les tôles à grains non orientés, les mesures de pertes totales spécifiques sont généralement possibles jusqu'à une induction \hat{B} égale à 1,2 T, pour les tôles à grains orientés jusqu'à $\hat{B} = 1,6$ T. Les caractéristiques qui sont fonction de l'inductance peuvent être déterminées jusqu'à $\hat{B} = 1,0$ T.

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 portée jusqu'à 1 000 Hz.

Pour la détermination des pertes totales spécifiques dans le domaine d'inductions où la méthode du wattmètre et les méthodes de pont sont applicables, on considère que la première assure les mesures les plus précises. Dans les cas d'arbitrage, seule la méthode du wattmètre peut être utilisée comme méthode de référence pour les mesures de pertes.

22. Epreuve

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

23. Principe de la mesure

Les caractéristiques magnétiques sont déterminées d'après des mesures, suivant une méthode de pont, de l'inductance et de la résistance parallèles apparentes considérées propres à l'éprouvette (voir figure 13, page 78). Les méthodes du pont de Hohle¹⁾ et du pont de Hay²⁾ modifiés sont recommandés comme procédés appropriés pour déterminer la valeur des composantes de l'impédance parallèle attribuée à l'éprouvette.

23.1 Pont de Hohle

La mesure des composantes de l'impédance autres que celles attribuables à l'éprouvette est évitée essentiellement en disposant le secondaire du cadre d'Epstein dans le circuit du pont ainsi qu'il apparaît sur la figure 4, page 30.

¹⁾ W. Hohle, *Messung der Eisenverluste im Epsteinapparat mit der Wechselstrombrücke*, Arch. für Elektrotechn. 25 (1931) p. 813 à 825. V. Rusbüldt et M. Ozkaya, *Messung der Ummagnetisierungsverluste an kleinen, groben Kornorientierter Bleche mit der Wechselstrombrücke*, ETZ-A 77 (1956) p. 295 à 297 et p. 912.

²⁾ D. C. Dieterly et C. E. Ward, *A Wide Range A.C. Bridge Test for Magnetic Materials*, ASTM Bulletin n° 182, mai 1952. I. L. Cooter et W. P. Harris, *Investigation of an Alternating-Current Bridge for the Measurement of Core Losses in Ferromagnetic Materials at High Densities*, Journal of Research, Nat. Bureau Standards, vol. 57, n° 2, août 1956.

CHAPTER III: DETERMINATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS BY BRIDGE METHODS

20. Object

The object of this chapter is to define bridge methods for the determination of specific total losses, permeability, the reciprocal of complex permeability and its components.

21. Field of application

According to these methods, the magnetic characteristics are determined for specified peak values of magnetic flux density and for specified frequencies. Application of the methods presumes that tests are conducted with a sinusoidal induced voltage waveform (see Clauses 9 and 10 and Appendix A). Therefore, non-oriented electrical sheet is generally measurable up to a magnetic flux density of $\hat{B} = 1.2$ T and grain-oriented sheet up to $\hat{B} = 1.6$ T when determining specific total losses. Properties which are functions of inductance may be determined up to $\hat{B} = 1.0$ T.

Measurements are made preferably within a frequency range of 15 Hz to 100 Hz. With suitable instrumentation, the upper limit may be raised to 1 000 Hz.

In the determination of specific total losses for the range of magnetic flux densities where wattmeter and bridge methods overlap, the wattmeter method is considered to provide the more accurate measurement. Only the wattmeter method for loss measurements can be used as an authoritative reference in case of dispute.

22. Test specimen

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

23. Principle of measurement

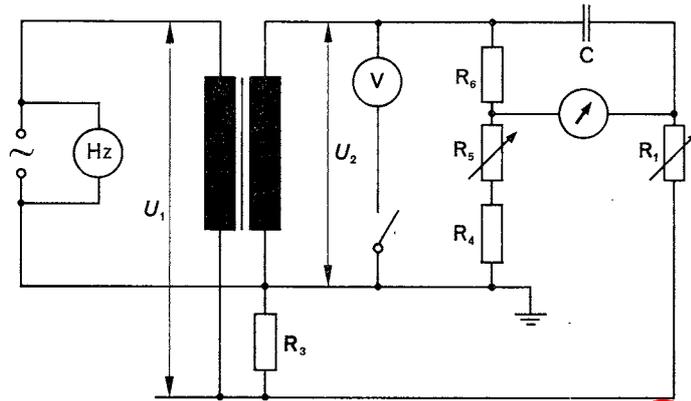
The magnetic properties are determined from bridge measurements of the apparent parallel inductance and resistance considered attributable to the test specimen (see Figure 13, page 79). The Hohle¹⁾ and the modified Hay bridge²⁾ methods are recommended as providing suitable procedures for determining the magnitude of these paralleled components of impedance ascribed to the test specimen.

23.1 Hohle bridge

As illustrated in Figure 4, page 31, measurement of impedance components other than those attributable to the test specimen is essentially avoided by inserting the secondary winding of the Epstein frame into the bridge circuit.

¹⁾ W. Hohle, *Messung der Eisenverluste im Epsteinapparat mit der Wechselstrombrücke*, Arch. für Elektrotechn. 25 (1931) p. 813 to 825. V. Rusbüldt and M. Ozkaya, *Messung der Ummagnetisierungsverluste an kleinen Proben Kornorientierter Bleche mit der Wechselstrombrücke*, ETZ-A 77 (1956), p. 295 to 297 and p. 912.

²⁾ D. C. Dieterly and C. E. Ward, *A Wide Range A.C. Bridge Test for Magnetic Materials*, ASTM Bulletin No. 182, May 1952. I. L. Cooter and W. P. Harris, *Investigation of an Alternating-Current Bridge for the Measurement of Core Losses in Ferromagnetic Materials at High Densities*, Journal of Research, Nat. Bureau Standards, Vol. 57, No. 2, August 1956.



486/78

FIG. 4. — Schéma du pont de Hohle.

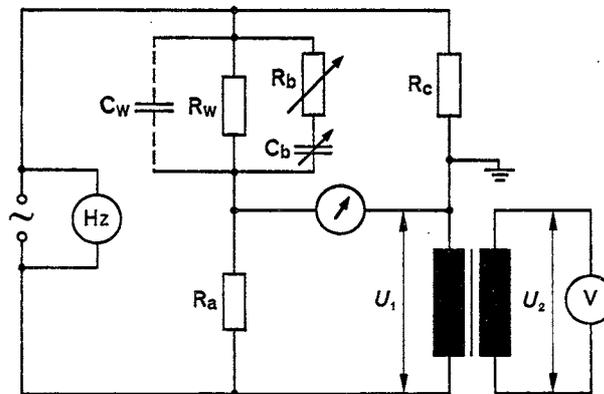
La résistance R_3 , dans laquelle circule tout le courant magnétisant, est de valeur faible comparée à l'impédance des quatre enroulements contenant l'échantillon, de sorte que l'influence des harmoniques du courant primaire est négligeable et que les tensions U_1 et U_2 sont facilement maintenues sinusoïdales.

Dans les équations d'équilibre indiquées ci-après, les hypothèses suivantes ont été faites pour le pont de Hohle:

1. Les spires primaires et secondaires sont en nombre égal.
2. Le courant circulant dans le secondaire du cadre d'Epstein est négligeable.
3. La compensation du flux dans l'air du cadre d'Epstein est réalisée.

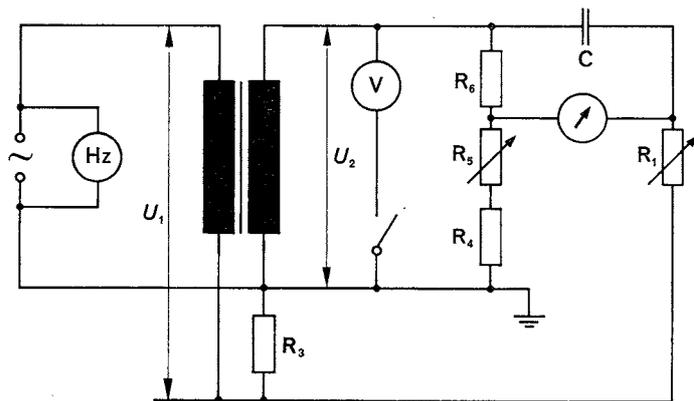
23.2 Pont de Hay modifié

Dans le schéma de base du pont de Hay modifié, représenté sur la figure 5, l'enroulement primaire du cadre d'Epstein est inséré dans le circuit de mesure. Cependant l'influence de l'impédance du circuit primaire et des connexions peut être éliminée en équilibrant au préalable R_w et C_w par rapport à la combinaison série de l'inductance et de la résistance du cadre vide. On peut aussi régler au préalable R_w et C_w aux valeurs calculées à partir de la résistance et de l'inductance des enroulements et des paramètres du pont R_a et R_c . En pratique, l'inductance du cadre vide est généralement négligeable en regard de celle observée lorsque l'éprouvette est en place, et l'utilisation de C_w n'est habituellement pas nécessaire.



487/78

FIG. 5. — Schéma du pont de Hay modifié.



486/78

FIG. 4. — Hohle bridge circuit.

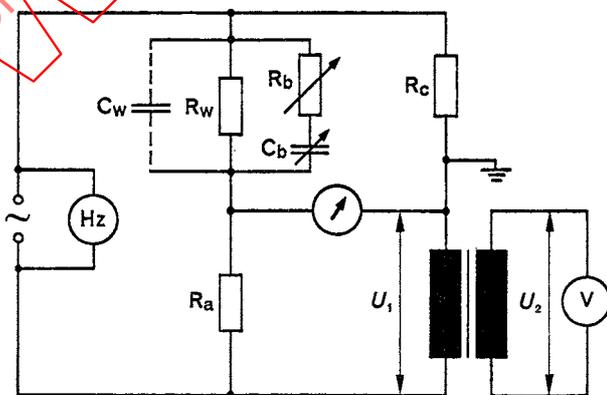
The resistor R_3 carrying the full excitation current, has a small value compared to the impedance of the four solenoids containing the test specimen, so that the influence of the higher harmonics of the primary current is negligibly small and the voltages U_1 and U_2 are easily maintained sinusoidal.

In the balance equations which follow for the Hohle bridge, the following assumptions have been made:

1. Primary and secondary turns are equal in number.
2. Negligible amounts of current are drawn from the secondary of the Epstein frame.
3. The Epstein frame has been provided with air flux compensation.

23.2 Modified Hay bridge

The basic circuit of the modified Hay bridge shown in Figure 5 has the primary winding of the Epstein frame within the measuring circuit. However, the influence of the impedance of the primary winding and leads can be eliminated by pre-balancing the values R_w and C_w against the series elements of inductance and resistance presented by the empty test frame or by pre-setting the values R_w and C_w , as calculated from the resistance and self-inductance of the test winding and the bridge parameters R_s and R_c . In practice, the self-inductance of the empty frame is usually negligible compared to that which obtains when the specimen is in place, and use of C_w is generally not required.



487/78

FIG. 5. — Modified Hay bridge circuit.

La valeur à retenir pour la résistance R_c est fonction des paramètres du cadre d'Epstein, des dimensions de l'éprouvette, du type de matériau à essayer, de la fréquence et de l'induction. En général, aux basses inductions, l'éprouvette présente une faible non-linéarité d'impédance, le courant magnétisant est alors sensiblement sinusoïdal et on peut employer pour R_c les valeurs de résistance recommandées les plus élevées afin de rendre l'équilibre du pont plus sensible. Aux inductions élevées, le courant magnétisant peut être important et fortement déformé; il est alors recommandé de prendre de faibles valeurs pour R_c .

Il faut noter qu'on utilise aussi une autre version du pont de Hay modifié, dans laquelle on insère dans le circuit du pont le secondaire du cadre d'Epstein au lieu du primaire. La résistance R_w et le condensateur C_w peuvent alors être omis. Dans ce cas, il est recommandé d'employer un cadre d'Epstein possédant un nombre de spires égal au primaire et au secondaire afin d'éviter d'avoir à introduire le rapport du nombre de spires dans les équations d'équilibre.

24. Source d'alimentation

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

25. Appareillage

25.1 Mesure de la tension

La valeur redressée de la tension secondaire est mesurée à l'aide d'un voltmètre de valeur redressée; sa résistance interne est au moins égale à 1 000 Ω/V . Etant donné que la résistance de pertes R_p ne varie que légèrement avec l'induction, un voltmètre de classe 1,5 sera suffisant pour la mesure des pertes. Cependant, pour la détermination de la perméabilité, un voltmètre de classe 0,5 sera en général suffisant.

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

25.2 Mesure du courant

S'il s'agit uniquement de vérifier une surcharge possible des résistances R_3 (pont de Hohle) ou R_c (pont de Hay), un ampèremètre de valeur efficace présentant une faible impédance interne et de classe 1 est recommandé. Si on a besoin du courant magnétisant pour le calcul de la puissance apparente de l'éprouvette, il est recommandé de déterminer ce courant à partir de la tension aux bornes des résistances R_3 ou R_c avec un voltmètre électronique de valeur efficace, de classe 1,5 et d'impédance interne élevée.

25.3 Mesure de la fréquence

Utiliser un fréquencemètre de classe 0,5 ou meilleure.

25.4 Détecteur de zéro

Pour équilibrer le pont, on utilise un détecteur de zéro de grande sensibilité, accordé à la fréquence fondamentale de la tension mesurée.

25.5 Pont à courant alternatif

Les composants du pont sont des résistances non inductives de précision réglées $\pm 0,1\%$ près ou mieux. Leur valeurs dépendent des caractéristiques du cadre d'Epstein. Par exemple, pour un cadre comprenant $N_1 = N_2 = 700$ spires, les valeurs ci-après sont recommandées:

The choice of the value of resistance for R_c depends upon test frame parameters, specimen size, type of material, test frequency and operating flux density. In general, at low magnetic flux densities where little non-linearity in impedance is exhibited by the test specimen—that is, the excitation current is nearly sinusoidal—the higher values of resistance recommended for R_c may be used to achieve a more sensitive bridge balance. At high magnetic flux densities, where the excitation current may be large and highly distorted, low values of R_c are recommended.

Also, it may be noted that another modification of the Hay bridge is in use in which the secondary winding of the Epstein frame is connected into the bridge network instead of the primary. Resistor R_w and capacitor C_w can then be omitted. With this modification, it is recommended that the primary and secondary turns of the test frame be of equal number to avoid introducing a turns-ratio factor into the balance equations.

24. Power supply

The specifications of power supply in Clause 9 shall be followed.

25. Apparatus

25.1 Voltage measurement

The rectified value of the secondary voltage is measured by means of an average type voltmeter with at least 1 000 ohms per volt internal resistance. Since resistance, R_b , varies only slightly with magnetic flux density, a voltmeter of class 1.5 is generally adequate for core loss measurements. For determination of permeability, however, a voltmeter of class 0.5 is generally adequate.

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

25.2 Current measurement

Where the purpose is to check only for possible overloading of resistors R_3 (Hohle bridge) or R_c (Hay bridge), a low impedance r.m.s. ammeter of Class 1 placed in series with the power supply is recommended. Where excitation current is to be determined for purposes of calculating the apparent power required by the test specimen, it is recommended that readings be taken across resistor R_3 or R_c with an electronic r.m.s. voltmeter of class 1.5 and of high internal impedance.

25.3 Frequency measurement

A frequency meter of class 0.5 or better is required.

25.4 Null detector

For bridge balancing, a null detector of high sensitivity is used and is tuned to the fundamental frequency of the measured voltage.

25.5 Alternating current bridge

The components of the bridge network are non-inductive precision resistors adjusted to $\pm 0.1\%$ or better. Their resistance values will depend upon the characteristics of the Epstein frame. For a frame with $N_1 = N_2 = 700$ turns, for example, the following values for bridge components are recommended:

— *Pont de Hohle*

$R_3 = R_4 = 1 \Omega$ ou 10Ω , selon la qualité de l'acier, l'induction et la fréquence de mesure

$R_5 = 0$ à $1 \text{ k}\Omega$, variable par échelons de $0,1 \Omega$

$R_6 = 100 \text{ k}\Omega$

$R_7 = 0$ à $1 \text{ k}\Omega$, variable par échelons de $0,1 \Omega$

$C = 50 \text{ nF}$; facteur de pertes diélectriques inférieur ou égal à $5 \cdot 10^{-4}$

— *Pont de Hay modifié*

$R_a = 0$ à $100 \text{ k}\Omega$, variable par échelons de 1Ω

$R_b = 0$ à $10 \text{ k}\Omega$, variable par échelons de $0,1 \Omega$

$R_c = 1000 \Omega$, max.; $0,5 \text{ W}$, aux inductions très faibles

100Ω ; 1 W , aux inductions relativement faibles

10Ω ; 10 W , aux inductions relativement élevées.

Des valeurs plus faibles peuvent être utilisées pour étendre le domaine de mesures.

$C_b = 0$ à $10 \mu\text{F}$, variable (résolution d'environ 100 pF)

R_w = résistance de réglage; peut être remplacée par une résistance fixe après détermination de la valeur convenable pour les mesures avec un enroulement donné et si le produit $R_a R_c$ est maintenu constant.

26. Mode opératoire

26.1 Préparation de la mesure

Identique au paragraphe 17.1.

26.2 Réglage de la source

Identique au paragraphe 17.2.

26.3 Mesure

Le courant primaire est lu à l'ampèremètre pour éviter toute surcharge dans le circuit primaire. L'ampèremètre est ensuite court-circuité et la tension secondaire est réglée à nouveau.

Après contrôle de la forme d'onde de la tension secondaire, selon l'article 9, on équilibre:

— le pont de Hohle par variation de R_5 et R_7 ;

— le pont de Hay par variation de R_b et C_b .

27. Détermination des caractéristiques

Comme indiqué dans l'annexe B, on présume que l'impédance de l'enroulement de mesure, l'éprouvette étant mise en place, est équivalente à la mise en parallèle d'une résistance et d'une inductance qui reflètent les caractéristiques magnétiques de l'éprouvette. La résistance R_p est inversement proportionnelle aux pertes totales de l'éprouvette alors que l'inductance L_p est directement proportionnelle à la perméabilité réelle. A l'équilibre, pour chacun des ponts, les valeurs de R_p et L_p sont les suivantes:

— *Hohle bridge*

$R_3 = R_4 = 1 \Omega$ or 10Ω , according to the steel quality and the magnetic flux density and measuring frequency

$R_5 = 0$ to $1 \text{ k}\Omega$, variable in steps of 0.1Ω

$R_6 = 100 \text{ k}\Omega$

$R_7 = 0$ to $1 \text{ k}\Omega$, variable in steps of 0.1Ω

$C = 50 \text{ nF}$; dielectric loss factor not higher than $5 \cdot 10^{-4}$

— *Modified Hay bridge*

$R_a = 0$ to $100 \text{ k}\Omega$, variable in steps of 1Ω

$R_b = 0$ to $10 \text{ k}\Omega$, variable in steps of 0.1Ω

$R_c = 1\,000 \Omega$, max.; 0.5 W , at very low magnetic flux densities
 100Ω ; 1 W , at moderately low magnetic flux densities
 10Ω ; 10 W , at moderately high magnetic flux densities

Lower values may be used to extend the measuring range.

$C_b = 0$ to $10 \mu\text{F}$, variable (resolution about 100 pF)

$R_w =$ adjusting resistor; may be replaced by a fixed resistor after the proper resistance value has been determined by measurement for a specific winding and if the product $R_a R_c$ is maintained constant.

26. Measuring procedure

26.1 *Preparation for measurement*

Same as in Sub-clause 17.1.

26.2 *Source setting*

Same as in Sub-clause 17.2.

26.3 *Measurement*

The ammeter is observed in order to prevent any overload in the primary circuit. The ammeter is then short-circuited and the secondary voltage re-adjusted.

After waveform control of the secondary voltage has been achieved in accordance with Clause 9, the bridge is balanced:

— in the Hohle bridge by varying R_5 and R_7 ;

— in the Hay bridge by varying R_b and C_b .

27. Determination of characteristics

As illustrated in Appendix B, the impedance of the test winding with the test specimen in place is assumed equivalent to parallel components of resistance and inductance which reflect the magnetic characteristics of the specimen. The resistance R_p is inversely proportional to the total losses of the specimen, and the inductance L_p is directly proportional to the real permeability of the specimen. At balance, the respective bridges yield the following values for R_p and L_p :

Pont de Hohle

$$R_p = \frac{R_3 (R_4 + R_5 + R_6)}{R_5} \quad (9)$$

$$L_p = \frac{R_3 (R_4 + R_5 + R_6)}{\omega^2 C R_6 R_7 + 2 \omega^2 C R_3 (R_4 + R_5 + R_6)} \quad (10)$$

Pont de Hay modifié

$$R_p = \frac{R_a R_c}{R_b} \quad (11)$$

$$L_p = C_b R_a R_c \quad (12)$$

- R_p = résistance parallèle équivalente, en ohms
 L_p = inductance parallèle équivalente, en henrys
 ω = fréquence angulaire, en radians par seconde
 C = capacité, en farads

Les valeurs calculées de R_p et L_p utilisées dans l'application numérique des équations ci-après permettent de définir les caractéristiques magnétiques de l'éprouvette.

Pertes totales spécifiques P_s , en watts par kilogramme

$$P_s = \frac{\tilde{U}_2^2}{R_p m_a} = \frac{(1,111 \tilde{U}_2)^2}{R_p m_a} \quad (13)$$

Perméabilité réelle (inductance), μ'_{rp}

$$\mu'_{rp} = \frac{L_p \ell_m}{N_1^2 A \mu_0} \quad (14)$$

Puissance réactive spécifique P_q , en vars par kilogramme

$$P_q = \frac{\tilde{U}_2^2}{\omega L_p m_a} = \frac{(1,111 \tilde{U}_2)^2}{\omega L_p m_a} \quad (15)$$

- N_1 = nombre de spires de l'enroulement primaire du cadre d'Epstein
 A = section magnétique de l'éprouvette, en mètres carrés
 μ_0 = $4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m (perméabilité du vide)
 ℓ_m = longueur conventionnelle effective du circuit magnétique, en mètres ($\ell_m = 0,94 l$)
 m_a = masse effective de l'éprouvette, en kilogrammes
 \tilde{U}_2 = valeur efficace de la tension secondaire, en volts
 \tilde{U}_2 = valeur redressée de la tension secondaire, en volts

Le calcul de l'inverse de la perméabilité complexe relative impose de considérer la composante de pertes du courant d'excitation comme courant magnétisant déphasé de 90° par rapport à l'induction (voir l'annexe B). Dans ces conditions, un terme de perméabilité imaginaire, μ''_{rp} , est calculé à partir de R_p .

Perméabilité imaginaire (résistive) μ''_{rp}

$$\mu''_{rp} = \frac{R_p \ell_m}{\omega N_1^2 A \mu_0} \quad (16)$$

L'inverse $\frac{1}{\underline{\mu}_r}$ de la perméabilité complexe relative est défini comme:

$$\frac{1}{\underline{\mu}_r} = \frac{1}{\mu'_{rp}} + j \frac{1}{\mu''_{rp}} \quad (17)$$

- $\underline{\mu}_r$ = perméabilité complexe relative
 j = opérateur vectoriel pour coordonnées rectangulaires

$$\begin{array}{ll}
 \text{Hohle bridge} & \text{Modified Hay bridge} \\
 R_p = \frac{R_3 (R_4 + R_5 + R_6)}{R_5} & (9) \quad R_p = \frac{R_a R_c}{R_b} \quad (11)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 L_p = \frac{R_3 (R_4 + R_5 + R_6)}{\omega^2 C R_6 R_7 + 2 \omega^2 C R_3 (R_4 + R_5 + R_6)} & (10) \quad L_p = C_b R_a R_c \quad (12)
 \end{array}$$

R_p = equivalent parallel resistance, in ohms
 L_p = equivalent parallel inductance, in henrys
 ω = angular frequency, in radians per second
 C = capacitance, in farads

The calculated values of R_p and L_p , when inserted in the following equations, define the magnetic characteristics of the test specimen:

Specific total losses P_s , in watts per kilogramme

$$P_s = \frac{\tilde{U}_2^2}{R_p m_a} = \frac{(1.111 \tilde{U}_2)^2}{R_p m_a} \quad (13)$$

Real (inductance) permeability, μ'_{rp}

$$\mu'_{rp} = \frac{L_p \ell_m}{N_1^2 A \mu_0} \quad (14)$$

Specific reactive power P_q , in vars per kilogram

$$P_q = \frac{\tilde{U}_2^2}{\omega L_p m_a} = \frac{(1.111 \tilde{U}_2)^2}{\omega L_p m_a} \quad (15)$$

N_1 = number of turns of Epstein frame primary winding
 A = magnetic cross-section of test specimen, in square metres
 μ_0 = $4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m (permeability of vacuum)
 ℓ_m = conventional effective magnetic path length, in metres ($\ell_m = 0.94$ m)
 m_a = effective mass of test specimen, in kilogrammes
 \tilde{U}_2 = r.m.s. value of secondary voltage, in volts
 \bar{U}_2 = rectified value of secondary voltage, in volts

Calculation of the reciprocal of the complex relative permeability requires that the loss component of the excitation current be treated as flux-producing current which is 90° out-of-phase with the induction (see Appendix B). Therefore, an imaginary permeability term, μ''_{rp} , is calculated from R_p :

Imaginary (resistive) permeability μ''_{rp}

$$\mu''_{rp} = \frac{R_p \ell_m}{\omega N_1^2 A \mu_0} \quad (16)$$

The reciprocal $\frac{1}{\underline{\mu}_r}$ of the complex relative permeability is defined as:

$$\frac{1}{\underline{\mu}_r} = \frac{1}{\mu'_{rp}} + j \frac{1}{\mu''_{rp}} \quad (17)$$

$\underline{\mu}_r$ = complex relative permeability
 j = vector operator for rectangular co-ordinates

Le module de l'inverse de la perméabilité complexe relative est donné par l'équation :

$$\left| \frac{1}{\underline{\mu}_r} \right| = \sqrt{\frac{1}{(\mu'_{rp})^2} + \frac{1}{(\mu''_{rp})^2}} \quad (18)$$

où

$$\left| \frac{1}{\underline{\mu}_r} \right| = \frac{N_1^2 A \mu_0}{l_m} \sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \frac{1}{(\omega L_p)^2}} \quad (19)$$

28. Reproductibilité

La reproductibilité des résultats obtenus selon ces méthodes de mesure est généralement caractérisée par un écart type d'environ 1%.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1978

Withdrawn

The modulus (magnitude) of the reciprocal of the complex relative permeability is given by:

$$\left| \frac{1}{\mu_r} \right| = \sqrt{\frac{1}{(\mu'_{rp})^2} + \frac{1}{(\mu''_{rp})^2}} \quad (18)$$

or

$$\left| \frac{1}{\mu_r} \right| = \frac{N_1^2 A \mu_0}{\ell_m} \sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \frac{1}{(\omega L_p)^2}} \quad (19)$$

28. Reproducibility

The reproducibility of the results obtained from these measuring methods is generally characterized by a standard deviation of about 1%.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1978

With 2M

CHAPITRE IV: DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ DE CHAMP MAGNÉTIQUE, DU COURANT MAGNÉTISANT ET DE LA PUISSANCE APPARENTE SPÉCIFIQUE

29. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition des méthodes de mesure à adopter pour la détermination des caractéristiques suivantes:

- la valeur efficace de l'intensité du courant magnétisant \tilde{I}_1 ;
- la valeur de crête de l'intensité de champ magnétique \hat{H} ;
- la puissance apparente spécifique S_s .

30. Domaine d'application

Les caractéristiques sont déterminées selon les méthodes suivantes pour des valeurs de crête de l'induction spécifiées et pour des fréquences spécifiées.

Afin d'obtenir des résultats comparables, le facteur de forme de la tension induite doit être maintenu dans les limites spécifiées à l'article 10.

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 une induction \hat{B} égale à 1,8 T (voir les 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.

31. Epreuve

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

32. Principe de la mesure

32.1 Valeur de crête de l'induction \hat{B}

La valeur de crête de l'induction est déterminée à partir de la valeur redressée de la tension secondaire comme décrit dans le paragraphe 16.1.

32.2 Valeur efficace de l'intensité du courant magnétisant

La valeur efficace de l'intensité du courant magnétisant est mesurée à l'aide d'un ampèremètre de valeur efficace placé dans le circuit comme indiqué à la figure 6.

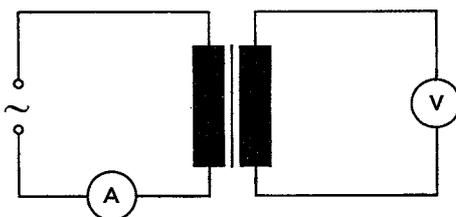


FIG. 6. — Schéma de mesure de la valeur efficace de l'intensité du courant magnétisant

CHAPTER IV: DETERMINATION OF MAGNETIC FIELD STRENGTH, EXCITATION CURRENT AND SPECIFIC APPARENT POWER

29. Object

The object of this chapter is to define measuring methods for the determination of the following characteristics:

- r.m.s. value of the excitation current \bar{I}_1 ;
- peak value of magnetic field strength \hat{H} ;
- specific apparent power S_s .

30. Field of application

The characteristics are determined according to these methods for specified peak values of magnetic flux density and for specified frequencies.

In order to obtain comparable results, test induced voltage waveforms shall be maintained within the limits specified in Clause 10.

Therefore 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.

31. Test specimen

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

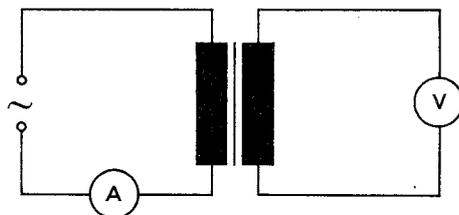
32. Principle of measurement

32.1 Peak value of magnetic flux density \hat{B}

The peak value of magnetic flux density is derived from the average value of the rectified secondary voltage measured as described in Sub-clause 16.1.

32.2 R.M.S. value of the excitation current

The r.m.s. value of the excitation current is measured by an r.m.s. ammeter in the circuit shown in Figure 6.



488/78

FIG. 6. — Circuit for measuring r.m.s. value of the excitation current.

32.3 Valeur de crête de l'intensité de champ magnétique

La valeur de crête de l'intensité de champ magnétique est déterminée à partir de la valeur de crête \hat{I} du courant primaire. Il faut tenir compte du fait que la valeur de crête ainsi obtenue n'est qu'une valeur approchée lorsque l'induction est relativement élevée. Les méthodes de mesure sont :

Méthode A

La valeur de crête \hat{I} peut être déterminée en mesurant au moyen d'un voltmètre de valeur de crête la tension aux bornes d'une résistance de précision R_n de valeur connue comme indiqué à la figure 7.

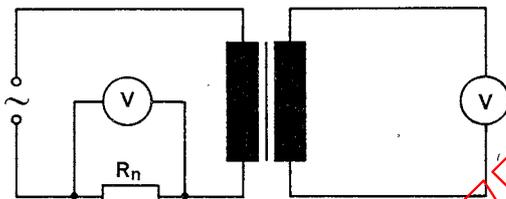


FIG. 7. — Schéma de mesure de la valeur de crête de l'intensité de champ magnétique au moyen d'un voltmètre de crête.

Méthode B

La valeur de crête \hat{I} peut être déterminée en mesurant au moyen d'un voltmètre de valeur redressée la tension apparaissant aux bornes de l'enroulement secondaire d'une inductance mutuelle dont l'enroulement primaire est parcouru par le courant magnétisant, comme indiqué à la figure 8.

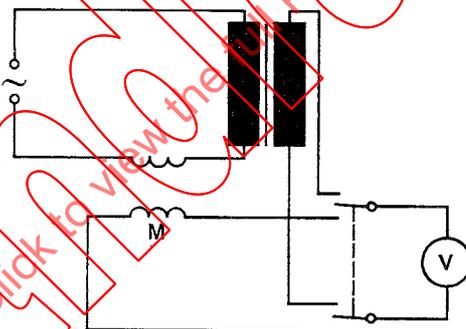


FIG. 8. — Schéma de mesure de la valeur de crête de l'intensité de champ magnétique avec une inductance mutuelle.

Dans ce cas, le voltmètre utilisé peut être le même que celui mesurant la tension secondaire du cadre d'Epstein.

33. Source d'alimentation

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

34. Appareillage

34.1 Mesure de la tension redressée

La valeur redressée de la tension secondaire du cadre d'Epstein et, dans le cas de la méthode B, de l'inductance mutuelle, doit être mesurée à l'aide d'un voltmètre de valeur redressée de résistance interne au moins égale à 1 000 Ω/V . L'appareil utilisé doit être de classe 0,5 ou meilleure (voir paragraphe 16.1).

32.3 Peak value of magnetic field strength

The peak value of magnetic field strength is derived from the peak value I of the primary current. It should be realized that this peak value only approaches the true peak magnetizing field at relatively high magnetic flux densities. The measurement methods are:

Method A

The peak value I can be determined by measuring the voltage drop across a known precision resistor R_n using a peak voltmeter as shown in Figure 7.

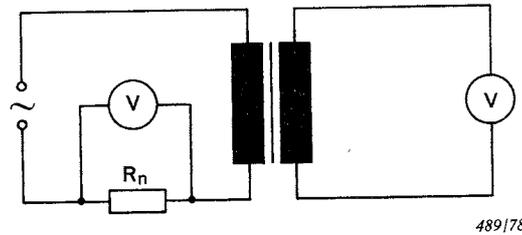


FIG. 7. — Circuit for measuring peak value of magnetic field strength using a peak voltmeter.

Method B

The peak value I can be determined by measuring the voltage appearing across the secondary winding of a mutual inductor, the primary winding of which carries the magnetizing current by using an average type voltmeter, in accordance with the circuit given in Figure 8.

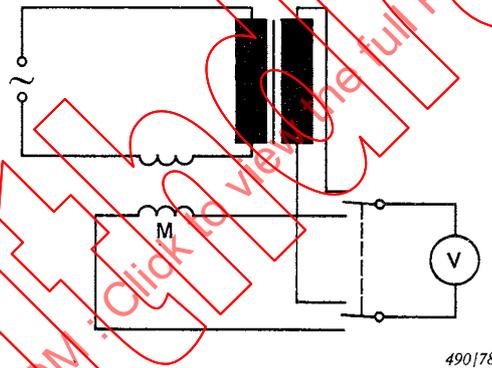


FIG. 8. — Circuit for measuring peak value of magnetic field strength using a mutual inductor.

In this case, the voltmeter can be the same instrument as is used for measuring the secondary voltage of the Epstein frame.

33. Power supply

The power supply will conform to the general specifications of Clause 9.

34. Apparatus

34.1 Average rectified voltage measurement

To measure the average rectified value of the secondary voltage of the Epstein frame and, in the case of Method B, of the mutual inductor, an average type voltmeter with at least 1 000 Ω/V internal resistance is necessary. The accuracy of the instrument used shall be class 0.5 or better (see Sub-clause 16.1).

34.2 *Mesure du courant*

La valeur efficace du courant primaire est mesurée au moyen d'un ampèremètre de valeur efficace de faible impédance de classe 0,5 ou meilleure. En variante, on peut employer une résistance de précision et un voltmètre électronique de valeur efficace.

34.3 *Mesure du courant de crête*

La mesure de la tension de crête aux bornes de la résistance R_n , selon la méthode A, peut être exécutée au moyen d'un voltmètre électronique de haute sensibilité indiquant la valeur de crête, ou au moyen d'un oscillographe étalonné. L'erreur pour la déviation maximale de ces instruments doit avoir pour limites $\pm 3\%$, ou des limites plus sévères.

34.4 *Résistance R_n*

La méthode A exige une résistance étalonnée de valeur connue avec une approximation de $\pm 0,5\%$ ou meilleure.

Le choix de la valeur de cette résistance dépend de la sensibilité du voltmètre de valeur de crête. Elle ne doit pas dépasser 1Ω si on utilise un cadre d'Epstein avec $N_1 = 700$ spires afin de minimiser la distorsion de la forme d'onde de la tension induite.

34.5 *Inductance mutuelle M*

L'inductance mutuelle du circuit représenté à la figure 8, page 42, doit être étalonnée et sa valeur M connue avec une approximation de $\pm 0,5\%$ ou meilleure; l'impédance primaire de cette inductance doit être aussi faible que possible. Pour réduire les erreurs, l'impédance du secondaire de l'inductance doit être faible par rapport à celle de l'appareil de mesure qui y est relié.

Lors de l'étalonnage et de l'emploi de l'inductance, on doit veiller à ce que le flux de fuite du cadre d'Epstein ou de tout autre appareil n'apporte aucune perturbation dans les mesures.

35. **Mode opératoire**

35.1 *Préparation de la mesure*

Identique au paragraphe 17.1.

35.2 *Mesure*

En pratique, on détermine soit des valeurs uniques, soit des groupes de valeurs de l'induction (\vec{B}) et de l'intensité de champ magnétique (\vec{H} ou \hat{H}).

Si l'intensité de champ magnétique est spécifiée et que l'induction doit être déterminée, on règle le courant primaire à la valeur correspondant à l'intensité de champ magnétique spécifié (voir ci-dessous). La tension secondaire du cadre d'Epstein est ensuite lue au voltmètre de valeur redressée (voir le paragraphe 17.2).

Si, d'autre part, l'induction est spécifiée et que l'intensité de champ magnétique doit être déterminée, la tension secondaire est réglée à sa valeur spécifiée conformément au paragraphe 17.2.

Pour la détermination de \hat{H} , la valeur efficace du courant primaire est lue à l'ampèremètre.

Pour la détermination de \vec{H} , selon la méthode A, la valeur de crête de la tension aux bornes de la résistance R_n est lue au voltmètre de valeur de crête.

Selon la méthode B, la tension redressée au secondaire de l'inductance mutuelle est lue au voltmètre de valeur redressée.

34.2 *Current measurement*

The r.m.s. value of the primary current is measured by means of an r.m.s. ammeter of low impedance of class 0.5 or better. Alternatively a precision resistor and r.m.s. electronic voltmeter may be employed.

34.3 *Peak current measurement*

The measurement of the peak voltage across resistor R_n according to Method A can be achieved by use of an electronic peak voltmeter of high sensitivity showing the peak value or a precalibrated oscilloscope. The full scale error of the device used shall be $\pm 3\%$ or better.

34.4 *Resistor R_n*

Method A requires a precision resistor of a value known to within $\pm 0.5\%$ or better.

The resistance value to be chosen depends upon the sensitivity of the peak voltmeter. It should not exceed $1\ \Omega$ when using an Epstein frame with $N_1 = 700$ turns in order to minimize distortion of the induced voltage waveform.

34.5 *Mutual inductor M*

In the circuit shown in Figure 8, page 43, the mutual inductor shall be calibrated and its value M known to within $\pm 0.5\%$ or better; the primary impedance of this inductor shall be as low as possible. To minimize errors, the secondary of the inductor shall have a low impedance compared to that of the measuring instrument connected to it.

During calibration and usage of the inductor, care shall be taken that measurements will not be affected by the leakage flux of the Epstein frame or other apparatus.

35. **Measuring procedure**

35.1 *Preparation for measurement*

As for Sub-clause 17.1.

35.2 *Measurement*

In practice, single values or groups of values of magnetic flux density (\hat{B}) and magnetic field strength (\hat{H} or \bar{H}) are determined.

If the magnetic field strength is specified and magnetic flux density is to be determined, the primary current is set to give the relevant magnetic field strength (see below). Then the secondary voltage of the Epstein frame is read on the average type voltmeter (see Sub-clause 17.2).

Again, if the magnetic flux density is specified and magnetic field strength is to be determined, the secondary voltage is set to its specified value as described in Sub-clause 17.2.

For the determination of \hat{H} , the r.m.s. value of the primary current is read on the ammeter.

For the determination of \hat{H} , according to method A, the peak value of the voltage drop across resistor R_n is read on the peak voltmeter.

According to method B, the average rectified voltage at the secondary of the mutual inductor is read on the average type voltmeter.

36. Détermination des caractéristiques

36.1 Détermination de \hat{B}

La valeur de crête de l'induction est tirée de l'équation (39) (voir l'annexe A):

$$\hat{B}_1 = \frac{1}{4 f N_2 A} \cdot \bar{E}_2 \quad (20)$$

Note. — Pour obtenir \bar{E}_2 , la lecture du voltmètre doit être corrigée par le facteur:

$$\frac{R_v + R_2}{R_v}$$

- B_1 = valeur de crête de l'induction intrinsèque, en teslas
- f = fréquence, en hertz
- N_2 = nombre de spires de l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein
- A = section magnétique de l'éprouvette, en mètres carrés
- R_v = résistance interne du voltmètre, en ohms
- R_2 = résistance de l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein, en ohms
- \bar{E}_2 = valeur redressée de la force électromotrice induite dans l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein, en volts

36.2 Détermination de \tilde{H}

La valeur efficace de l'intensité de champ magnétique est calculée à partir de la valeur efficace du courant primaire, indiquée par l'ampèremètre selon le schéma de la figure 6, page 40:

$$\tilde{H} = \frac{N_1}{\ell_m} \tilde{I}_1 \quad (21)$$

- \tilde{H} = valeur efficace de l'intensité de champ magnétique, en ampères par mètre
- N_1 = nombre de spires de l'enroulement primaire du cadre d'Epstein
- ℓ_m = longueur conventionnelle effective du circuit magnétique, en mètres ($\ell_m = 0,94$ m)
- \tilde{I}_1 = valeur efficace du courant primaire, en ampères

Après détermination de plusieurs groupes de valeurs correspondantes de \hat{B} et de $\frac{N_1}{\ell_m} \tilde{I}_1$ on peut tracer une courbe d'aimantation de \hat{B} en fonction de \tilde{H} .

36.3 Détermination de \hat{H}

Dans le cas de la méthode de mesure A, la valeur de crête de l'intensité de champ magnétique est calculée à partir de l'indication \hat{U}_m du voltmètre de valeur de crête, suivant:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{R_n \ell_m} \cdot \hat{U}_m \quad (22)$$

- \hat{H} = valeur de crête de l'intensité de champ magnétique, en ampères par mètre
- R_n = valeur de la résistance de précision de la figure 7, page 42, en ohms
- \hat{U}_m = valeur de crête de la chute de tension aux bornes de R_n , en volts

36. Determination of characteristics

36.1 Determination of \hat{B}

The peak value of the intrinsic magnetic flux density is given by equation (39) (see Appendix A):

$$\hat{B}_1 = \frac{1}{4 f N_2 A} \cdot \bar{E}_2 \quad (20)$$

Note. — To obtain \bar{E}_2 , the voltmeter reading shall be corrected by the factor:

$$\frac{R_v + R_2}{R_v}$$

- B_1 = peak value of the intrinsic magnetic flux density, in teslas
- f = frequency, in hertz
- N_2 = number of turns of the secondary winding of the Epstein frame
- A = magnetic cross-section of test specimen, in square metres
- R_v = voltmeter internal resistance, in ohms
- R_2 = resistance of the secondary winding of the Epstein frame, in ohms
- \bar{E}_2 = average rectified value of the electromotive force induced in the secondary winding of the Epstein frame, in volts

36.2 Determination of \tilde{H}

The r.m.s. value of magnetic field strength is calculated from the r.m.s. value of primary current indicated by the ammeter according to the circuit of Figure 6, page 41:

$$\tilde{H} = \frac{N_1}{\ell_m} \tilde{I}_1 \quad (21)$$

- \tilde{H} = r.m.s. value of magnetic field strength, in amperes per metre
- N_1 = number of turns of the primary winding of the Epstein frame
- ℓ_m = conventional effective magnetic path length, in metres ($\ell_m = 0.94$ m)
- \tilde{I}_1 = r.m.s. value of primary current, in amperes

After several groups of corresponding values of \hat{B} and $\frac{N_1}{\ell_m} \tilde{I}_1$ have been determined, a magnetization curve of \hat{B} against \tilde{H} can be drawn.

36.3 Determination of \hat{H}

If measuring method A has been used, the peak value of magnetic field strength is calculated from the reading \hat{U}_m of the peak voltmeter:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{R_n \ell_m} \cdot \hat{U}_m \quad (22)$$

- \hat{H} = peak value of magnetic field strength, in amperes per metre
- R_n = resistance value of the precision resistor in Figure 7, page 43, in ohms
- \hat{U}_m = peak voltage drop across R_n , in volts

Dans le cas de la méthode de mesure B, \hat{H} est calculé à partir de l'indication \bar{U}_m du voltmètre de valeur redressée lorsqu'il est connecté aux bornes de l'inductance mutuelle M suivant :

$$\hat{H} = \frac{N_1}{4 f M \ell_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m \quad (23)$$

- M = inductance mutuelle dans le circuit de la figure 8, page 42, en henrys
 R_m = résistance du bobinage secondaire de M, en ohms
 R_v = résistance interne du voltmètre de valeur redressée, en ohms
 \bar{U}_m = valeur redressée de la tension secondaire induite aux bornes de M, en volts

Après détermination de plusieurs groupes de valeurs correspondantes de \hat{B} et \hat{H} , on peut tracer une courbe d'aimantation \hat{B} en fonction de \hat{H} .

Note. — La perméabilité d'amplitude peut être exprimée conventionnellement de la manière suivante :

$$\mu_a = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \hat{H}}$$

36.4 Détermination de la puissance apparente spécifique S_s

La puissance apparente est donnée par :

$$S = \tilde{I}_1 \cdot \tilde{U}_2 \frac{N_1}{N_2} = \tilde{I}_1 \cdot 1,111 \cdot \tilde{U}_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (24)$$

Note. — La relation $\tilde{U}_2 = 1,111 \tilde{U}_2$ n'est valable que pour les tensions sinusoïdales.

- S = puissance apparente, en voltampères
 \tilde{U}_2 = valeur efficace de la tension secondaire du cadre d'Epstein, en volts

En divisant cette quantité par la masse effective m_a calculée selon l'équation (1), on obtient la puissance apparente spécifique :

$$S_s = \frac{S}{m_a} = \frac{\tilde{I}_1 \cdot 1,111 \cdot \tilde{U}_2 \cdot 4 \ell N_1}{m \ell_m N_2} \quad (25)$$

- S_s = puissance apparente spécifique, en voltampères par kilogramme
 ℓ = longueur d'une bande éprouvette, en mètres
 m = masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes
 m_a = masse effective de l'éprouvette, en kilogrammes
 \tilde{U}_2 = valeur redressée de la tension secondaire induite, en volts
 N_1 = nombre de spires de l'enroulement primaire du cadre d'Epstein
 N_2 = nombre de spires de l'enroulement secondaire du cadre d'Epstein
 ℓ_m = longueur conventionnelle effective du circuit magnétique, en mètres ($\ell_m = 0,94$ m)
 \tilde{I}_1 = valeur efficace du courant primaire, en ampères

37. Reproductibilité

La reproductibilité des résultats obtenus selon cette méthode dépend essentiellement des erreurs des instruments de mesure et du soin apporté à l'exécution de l'équipement d'essai. Si on utilise des appareils de classe 0,5, la reproductibilité de la méthode est caractérisée par un écart type de l'ordre de 2%.

In the case of measuring method B, \hat{H} is calculated from the reading \bar{U}_m of the average rectified-type voltmeter in conjunction with the mutual inductor M:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{4 f M \ell_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m \quad (23)$$

- M = mutual inductance in the circuit given in Figure 8, page 43, in henrys
- R_m = resistance of the secondary winding of M, in ohms
- R_v = internal resistance of the average type voltmeter, in ohms
- \bar{U}_m = average rectified value of the secondary induced voltage of M, in volts

After several groups of corresponding values of \hat{B} and \hat{H} have been determined, a magnetization curve \hat{B} against \hat{H} can be drawn.

Note. — The amplitude permeability may be conventionally expressed as:

$$\mu_a = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \hat{H}}$$

36.4 Determination of the specific apparent power S_s

The apparent power is given by:

$$S = \tilde{I}_1 \cdot \tilde{U}_2 \frac{N_1}{N_2} = \tilde{I}_1 \cdot 1.111 \cdot \bar{U}_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (24)$$

Note. — The relation $\tilde{U}_2 = 1.111 \bar{U}_2$ is valid only for sinusoidal voltages.

- S = apparent power, in voltamperes
- \tilde{U}_2 = r.m.s. value of secondary voltage of the Epstein frame, in volts

Division of this quantity by the effective mass m_a , in accordance with equation (1), gives the specific apparent power:

$$S_s = \frac{S}{m_a} = \frac{\tilde{I}_1 \cdot 1.111 \cdot \bar{U}_2 \cdot 4 \ell N_1}{m \ell_m N_2} \quad (25)$$

- S_s = specific apparent power, in voltamperes per kilogramme
- ℓ = length of a test specimen strip, in metres
- m = total mass of test specimen, in kilogrammes
- m_a = effective mass of test specimen, in kilogrammes
- \bar{U}_2 = average rectified value of secondary induced voltage, in volts
- N_1 = total number of turns of Epstein primary winding
- N_2 = total number of turns of Epstein secondary winding
- ℓ_m = conventional effective magnetic path length, in metres ($\ell_m = 0.94$ m)
- \tilde{I}_1 = r.m.s. value of primary circuit, in amperes

37. Reproducibility

The reproducibility of the results obtained from this method depends essentially upon the error of the instruments used for the measurement, and careful attention to the physical details of the test equipment. When using instruments of Class 0.5, the reproducibility of the method is characterized by a standard deviation of the order of 2%.

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

38. Principe de la mesure

La détermination de l'induction magnétique en champ continu s'effectue à l'aide du cadre d'Epstein de 25 cm. L'échantillon est soumis à un champ magnétique continu par l'intermédiaire de l'enroulement primaire. Le flux magnétique est mesuré à l'aide d'un fluxmètre connecté aux bornes de l'enroulement secondaire selon le schéma représenté à la figure 9.

Par accord entre les parties, un galvanomètre balistique ou un intégrateur électronique peut être substitué au fluxmètre.

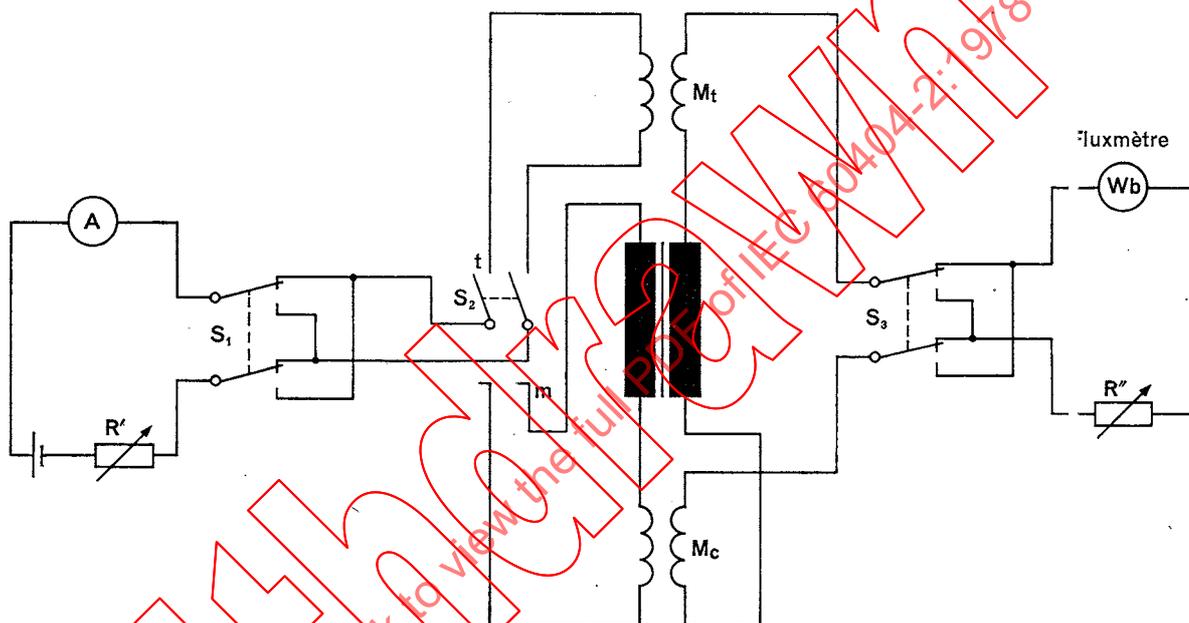


FIG. 9. — Schéma pour l'essai en champ continu.

491/78

39. Appareillage

39.1 Inductance mutuelle de compensation du flux dans l'air M_c

L'inductance mutuelle de compensation du flux dans l'air et la méthode de compensation sont identiques à celles décrites à l'article 8.

39.2 Inductance mutuelle d'étalonnage M_t

Pour l'étalonnage du fluxmètre, on utilise une inductance mutuelle dont la valeur M_t doit permettre l'essai pour toutes les valeurs de l'intensité de champ magnétique.

Il est généralement suffisant d'avoir une valeur comprise entre 50 mH et 100 mH connue avec une approximation de $\pm 0,2\%$ ou meilleure. Le primaire doit pouvoir supporter le courant d'étalonnage sans chauffer de manière appréciable.

39.3 Source d'alimentation

Le choix de la source dépend du champ maximal que l'on veut obtenir. La source doit avoir pour les faibles intensités de champ une tension au moins égale à 20 V. Le taux d'ondulation résiduelle doit être inférieur à 1%. Les fluctuations du courant primaire doivent être telles que les variations du flux qui en résultent soient inférieures ou égales à 0,2%.

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

38. Principle of measurement

The determination of magnetic flux density in a d.c. field is effected by means of a 25 cm Epstein frame. The sample is subjected to a d.c. magnetic field by means of current in the primary winding. The magnetic flux is measured with a fluxmeter connected across the secondary winding in accordance with the circuit shown in Figure 9.

By agreement between the parties, a ballistic galvanometer or electronic charge integrator may replace the fluxmeter.

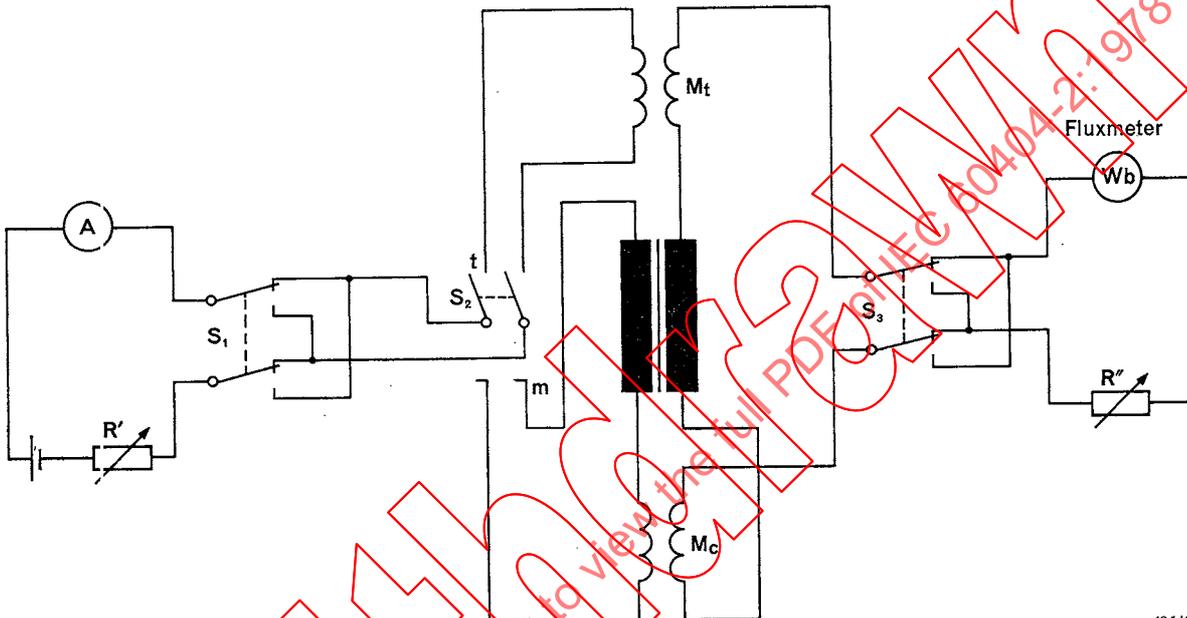


FIG. 9 — Circuit for d.c. testing.

491/78

39. Test apparatus

39.1 Mutual inductor for air flux compensation M_c

The mutual inductor and procedure for compensation for air flux compensation are exactly as described in Clause 8.

39.2 Calibration mutual inductor M_t

To calibrate the fluxmeter, use is made of a mutual inductor having a value M_t to permit testing at all field values.

It is generally sufficient to use a value between 50 mH and 100 mH with this value known to within $\pm 0.2\%$ or better. The primary must be capable of carrying the calibration current without heating up appreciably.

39.3 Power supply

The choice of supply depends on the maximum field desired. For low magnetic field strengths the source shall have a voltage at least equal to 20 V. The ripple must be less than 1%. The stability of primary current shall be such that the resultant flux variations are not more than 0.2%.

39.4 Commutateurs

La commutation doit permettre d'obtenir des valeurs de courant reproductibles. La stabilité doit être supérieure à la limite de précision du fluxmètre. Les commutateurs doivent :

- ne présenter aucun phénomène de rebondissement;
- satisfaire à la relation :

$$R_1 + R' > 1\,000 R_s \quad (26)$$

R_1 = résistance de l'enroulement primaire
 R' = résistance variable du circuit d'alimentation
 R_s = résistance du commutateur

Note. — Les commutateurs peuvent être remplacés par un appareillage électronique approprié.

40. Appareillage de mesure

40.1 Précision de l'appareillage

Les classes de précision des appareils de mesure seront telles que l'erreur introduite par l'ensemble inductance mutuelle d'étalonnage — fluxmètre — ampèremètre, ait pour limites $\pm 0,1\%$, ou des limites plus étroites.

40.2 Fluxmètre

La dérive du fluxmètre doit être inférieure ou égale à $2 \cdot 10^{-3}$ du maximum de l'échelle par minute. Pour les mesures à intensité de champ supérieur à 10 000 A/m, le fluxmètre doit satisfaire à la condition suivante :

$$R_1 + R'' > 1\,000 R_2 \quad (27)$$

R_1 = résistance interne de l'appareil de mesure
 R'' = résistance en série avec l'appareil de mesure
 R_2 = résistance du secondaire

41. Eprouvette

Les éprouvettes utilisées sont identiques à celles définies pour la détermination des pertes totales spécifiques (voir l'article 6).

42. Méthode de la mesure

42.1 Préparation de la mesure

L'échantillon est pesé et les bandes sont mises en place dans les enroulements du cadre d'Epstein de la même façon que pour la détermination des pertes totales spécifiques (voir le paragraphe 17.1).

42.2 Désaimantation de l'échantillon

L'échantillon servant à la détermination des valeurs d'induction doit être désaimanté par une série d'inversions du champ magnétique qui diminue progressivement à partir d'une valeur initiale d'au moins 5 000 A/m. La désaimantation s'effectue, en règle générale, en courant continu en manœuvrant l'inverseur S_1 à une cadence d'environ deux inversions par seconde, cependant que le courant décroît et s'annule par accroissement progressif de la résistance R' .

L'inverseur S_2 doit être fermé sur m et l'inverseur S_3 ouvert.

39.4 Switches

Switching shall permit reproducible current values to be obtained. Stability must be better than the limit of accuracy of the fluxmeter. The switches shall:

- not suffer from contact bounce;
- satisfy the relation:

$$R_1 + R' > 1\,000 R_s \quad (26)$$

R_1 = resistance of primary winding
 R' = variable resistance in the power circuit
 R_s = resistance of the switch

Note. — The switches may be replaced by a suitable electronic equipment.

40. Measuring apparatus

40.1 Apparatus accuracy

The accuracy classes of the measuring apparatus will be such that the error introduced by the assemblage, calibration mutual inductor — fluxmeter — ammeter, will be $\pm 0.5\%$ or better.

40.2 Fluxmeter

The drift of the fluxmeter should be less than or equal to $2 \cdot 10^{-3}$ of the scale per minute. For measurements of magnetic field strengths greater than 10 000 A/m, the fluxmeter should satisfy the following condition:

$$R_1 + R'' > 1\,000 R_2 \quad (27)$$

R_1 = internal resistance of the flux-measuring apparatus
 R'' = resistance of the resistor in series with the flux-measuring apparatus
 R_2 = resistance of secondary winding

41. Test specimen

The test specimens used are identical with those defined for the determination of total specific losses (see Clause 6).

42. Method of measurement

42.1 Preparation for measurement

The test specimen is weighed and the strips are placed in the windings of the Epstein frame in the same way as for the determination of total specific losses (see Sub-clause 17.1).

42.2 Demagnetization of the test specimen

The test specimen used for determining the magnetic flux density values must be demagnetized by a series of reversals of the magnetic field which progressively diminish from an initial value of at least 5 000 A/m. Demagnetization is achieved in general with direct current by operation of the current reversing switch S_1 at a frequency of about two reversals per second whilst the current decreases and reaches zero by progressive increase of resistance R' .

The circuit selection switch S_2 must be connected at m and the fluxmeter polarity switch S_3 opened.

Il est possible d'effectuer également la désaimantation en courant alternatif, en réduisant lentement celui-ci jusqu'à zéro, à partir d'une valeur maximale du champ égale à celle spécifiée pour la désaimantation en courant continu.

42.3 Etalonnage du fluxmètre

Le fluxmètre doit être étalonné pour chacune des valeurs d'induction à mesurer.

Pour étalonner en utilisant l'inductance mutuelle M_t , fermer l'inverseur S_2 sur t et fermer l'interrupteur S_3 . Puis procéder à l'inversion du courant d'étalonnage I_t au moyen de l'inverseur S_1 . La constante K qui donne la valeur de l'induction par degré d'échelle B/δ_t est:

$$K = \frac{M_t I_t}{A N_2 \delta_t} \quad (28)$$

M_t = valeur de l'inductance mutuelle d'étalonnage, en henrys

I_t = valeur du courant d'étalonnage, en ampères

δ_t = lecture faite au fluxmètre

La résistance R'' montée dans le circuit est utilisée pour faire varier la sensibilité de l'appareil et permettre, dans la mesure du possible, une lecture directe des valeurs d'induction.

42.4 Détermination des valeurs de l'induction

Pour déterminer les valeurs de l'induction, l'inverseur S_1 est fermé sur l'une des deux positions possibles, l'inverseur S_2 étant en position m. On règle ensuite le courant d'aimantation I_1 au moyen de la résistance R' .

L'intensité de champ magnétique est calculée conformément à la formule:

$$H = \frac{N_1 I_1}{l_m} \quad (29)$$

l_m = longueur conventionnelle utile du circuit magnétique ($l_m = 0,94$ m)

I_1 = intensité du courant dans l'enroulement primaire, en ampères

On procède à l'inversion du courant par l'intermédiaire de l'inverseur S_1 ; on relève le flux sur le fluxmètre, ce qui permet de calculer l'induction intrinsèque dans le matériau en utilisant l'équation:

$$B_i = \frac{\Phi_1}{N_2 A} \quad (30)$$

B_i = induction intrinsèque, en teslas

Φ_1 = flux magnétique mesuré en webers pour N_2 spires

A = section magnétique de l'échantillon, en mètres carrés

Pour passer de l'induction intrinsèque à l'induction, on peut utiliser l'équation suivante:

$$B = \mu_0 H + B_i \quad (31)$$

où $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ H/m

Le cadre d'Epstein conventionnel est utilisé couramment pour les intensités de champ inférieures ou égales à 10 000 A/m. Pour les valeurs supérieures, des précautions devront être prises pour éviter l'échauffement des enroulements et par la suite de l'échantillon.

43. Reproductibilité

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

It is equally possible to demagnetize with alternating current by slowly reducing this to zero, from a maximum field value equal to that indicated for d.c. demagnetization.

42.3 Fluxmeter calibration

The fluxmeter shall be calibrated at each of the magnetic flux density values to be measured.

In order to calibrate by using the mutual inductor M_t , connect the switch S_2 at t and close the switch S_3 . Then reverse the calibrating current I_t by means of the reversing switch S_1 . The constant K which gives the value of the magnetic flux density per scale division B/δ_t is:

$$K = \frac{M_t I_t}{A N_2 \delta_t} \quad (28)$$

M_t = value of the calibration mutual inductor, in henrys

I_t = value of calibration current, in amperes

δ_t = reading on the fluxmeter

The resistor R' included in the circuit is used to vary the response of the instrument and to permit, as far as is possible, direct reading of the magnetic flux density values.

42.4 Determination of magnetic flux density values

In order to determine the magnetic flux density, the switch S_1 is closed in one of the two possible positions, the switch S_2 being in position m. The magnetizing current I_1 is then adjusted by means of the resistor R' .

The magnetic field strength is calculated according to the formula:

$$H = \frac{N_1 I_1}{l_m} \quad (29)$$

l_m = conventional magnetic path length ($l_m = 0.94$ m)

I_1 = value of current in primary winding, in amperes

The current is reversed by means of reversing switch S_1 ; from the fluxmeter reading the intrinsic magnetic flux density in the material may be calculated from the following equation:

$$B_i = \frac{\Phi_i}{N_2 A} \quad (30)$$

B_i = intrinsic magnetic flux density, in teslas

Φ_i = magnetic flux measured in webers for N_2 turns

A = magnetic cross-section of the specimen, in square meters

To change from intrinsic magnetic flux density to magnetic flux density, the following equation may be used:

$$B = \mu_0 H + B_i \quad (31)$$

where $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ H/m

The conventional Epstein frame is generally used for field strengths no higher than 10 000 A/m. For higher values care must be taken to avoid the heating of the windings and subsequently the test specimen.

43. Reproducibility

The reproducibility of the results obtained from this method is characterized by a standard deviation of 1%.

CHAPITRE VI: DÉTERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES TÔLES MAGNÉTIQUES

44. Objet

Les valeurs de la masse volumique normalement utilisées dans le calcul de la section magnétique des éprouvettes Epstein selon l'équation (6) sont celles définies dans les normes de produit comme valeurs conventionnelles de la masse volumique.

Toutefois, par accord entre les parties, des valeurs plus précises peuvent être employées. L'objet du présent chapitre est donc de définir les méthodes les plus appropriées à la détermination des masses volumiques des produits plats laminés en fer-silicium, ou en fer-silicium-aluminium du commerce.

45. Méthodes utilisées

La méthode par immersion est la méthode fondamentale de détermination de la masse volumique, mais elle requiert, en application, que la surface de l'échantillon soit exempte de couche d'oxyde ou de revêtement. Cependant, en cas d'arbitrage, seule cette méthode fera foi.

Pour les besoins industriels, la mesure de la résistance électrique d'échantillons revêtus ou non revêtus et la détermination des teneurs en silicium et aluminium procurent des moyens sûrs l'obtention de la masse volumique des produits plats laminés à base de fer du commerce.

46. Eprouvette

Des bandes éprouvettes aux dimensions adéquates, comme les bandes Epstein définies dans l'article 6, peuvent être utilisées pour les mesures.

47. Méthode par immersion

Pour les essais d'arbitrage, la méthode classique par immersion doit être appliquée. Cette méthode ne convient que pour les éprouvettes sans aucun revêtement. Avant la mesure, les éprouvettes doivent être dégraissées.

Au moyen d'une balance hydrostatique, l'éprouvette est pesée avant et après immersion dans de l'eau de masse volumique connue ρ_w . Toutes les bulles d'air présentes à la surface de l'éprouvette doivent être éliminées. La masse volumique ρ_m de l'éprouvette est alors donnée par la relation:

$$\rho_m = \frac{m}{m - m_1} \cdot \rho_w \quad (32)$$

ρ_m = masse volumique de l'éprouvette, en kilogrammes par mètre cube

ρ_w = masse volumique de l'eau, en kilogrammes par mètre cube

m = masse de l'éprouvette, en kilogrammes

m_1 = masse apparente de l'éprouvette immergée dans l'eau, en kilogrammes

Pour obtenir des valeurs comparables, un nombre minimal de cinq éprouvettes doit être mesuré, le résultat étant exprimé par la moyenne des valeurs obtenues.

CHAPTER VI: DETERMINATION OF THE DENSITY OF MAGNETIC SHEET

44. Object

Density values normally used in the calculation of the magnetic cross-section of the Epstein specimens in accordance with equation (6) are those values defined as the conventional density in product standards.

However, by agreement between the interested parties, more precise densities may be employed and it is the object of this chapter to define those methods which have been found most suitable for determining densities of commercial iron-silicon and iron-silicon-aluminium flat-rolled products.

45. Methods to be used

The immersion method is a fundamental method of determining density but, in application, requires that the surfaces of the test specimen be essentially free of oxide films or applied coatings. However, in cases of arbitration, only this method will be valid.

For industrial purposes, measurements of electrical resistance on coated or uncoated specimens or determinations of weight percentages of silicon and aluminium contents provide reliable means of establishing densities for commercial iron-base flat-rolled products.

46. Test specimen

Test specimen strips of suitable dimensions, for example Epstein strips as specified in Clause 6, may be used for the measurements.

47. Immersion method

In arbitration tests, the conventional immersion method must be applied. This method is appropriate only when test specimens without any coating are used. The test specimens should be degreased prior to use in the test.

By means of hydrostatic balance, the test specimen is weighed before and after immersing it in water of known density ρ_w . All air bubbles should be removed from the surface of the test specimen. Then the density ρ_m of the test specimen is given by:

$$\rho_m = \frac{m}{m - m_1} \cdot \rho_w \quad (32)$$

ρ_m = density of test specimen, in kilogrammes per cubic metre

ρ_w = density of water, in kilogrammes per cubic metre

m = mass of test specimen, in kilogrammes

m_1 = apparent mass of test specimen immersed in water, in kilogrammes

In order to obtain comparable results, it is necessary to test at least five test specimens and to average the results.

48. Méthodes industrielles

Pour des essais industriels, les méthodes suivantes sont recommandées.

48.1 Méthode électrique

Comme il est exposé à l'annexe C, la masse volumique de la bande éprouvette peut être déterminée en mesurant sa résistance électrique, éliminant ainsi l'incertitude de la mesure d'épaisseur.

La bande éprouvette est pesée et sa longueur totale mesurée avec une approximation de $\pm 0,2\%$ ou meilleure. Sa résistance électrique est mesurée suivant la méthode décrite au chapitre VII. Le produit de la masse volumique ρ_m par la résistivité ρ est alors donné par l'équation:

$$\rho_m \cdot \rho = \frac{R_e \cdot m}{l \cdot l_e} \quad (33)$$

- ρ = résistivité du matériau essayé, en ohm mètres
- R_e = résistance électrique mesurée de la bande éprouvette, en ohms
- l = longueur totale de la bande éprouvette, en mètres
- l_e = distance entre les électrodes de potentiel, en mètres

La masse volumique peut être lue sur la courbe de ρ_m en fonction de $\rho_m \cdot \rho$, représentée sur la figure 10.

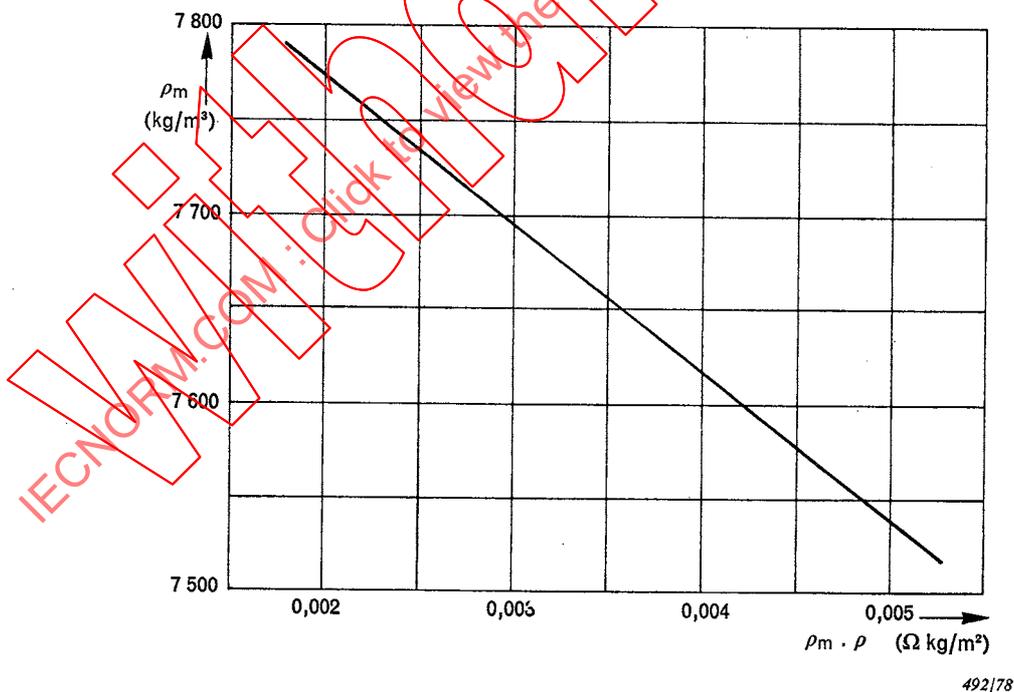


FIG. 10. — Masse volumique ρ_m en fonction du produit $\rho_m \cdot \rho$.

Pour obtenir des valeurs représentatives, un nombre minimal de cinq éprouvettes doit être mesuré, le résultat étant exprimé par la moyenne des valeurs obtenues.

48. Industrial methods

For industrial tests, the following methods are recommended.

48.1 Electrical method

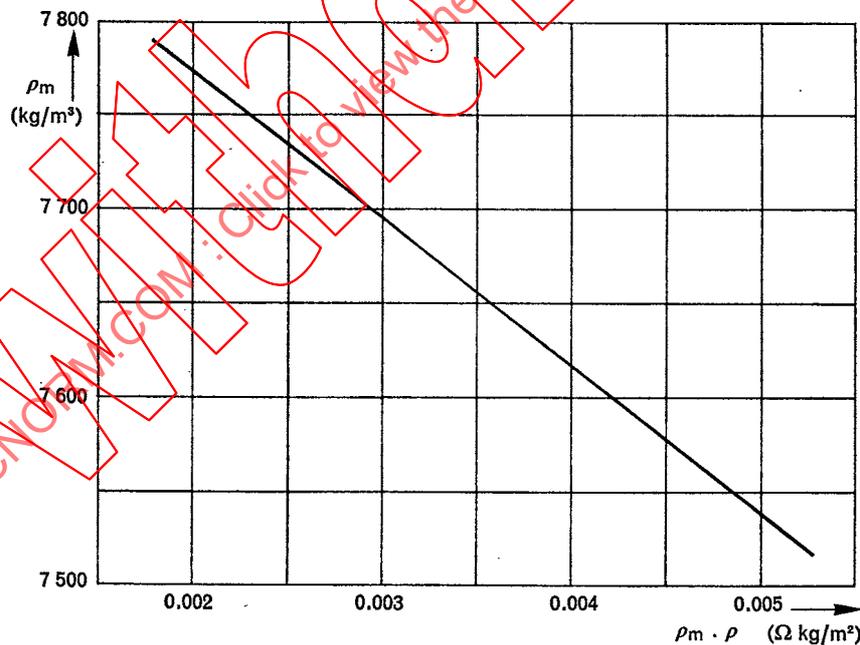
As described in Appendix C, the density of a test specimen strip can be determined by measuring its electrical resistance, thus eliminating uncertainty in the measurement of thickness.

The test specimen strip is weighed and the total length measured to within $\pm 0.2\%$ or better. The electrical resistance is measured according to the procedure described in Chapter VII. Then the product of density ρ_m and resistivity ρ is given by the equation:

$$\rho_m \cdot \rho = \frac{R_e \cdot m}{l \cdot l_e} \tag{33}$$

- ρ = resistivity of the test material, in ohm metres
- R_e = measured electrical resistance of the test specimen strip, in ohms
- l = total length of test specimen strip, in metres
- l_e = distance between the potential contacts (electrical path length), in metres

Density can be read from the curve of ρ_m against $\rho_m \cdot \rho$, shown in Figure 10.



492/78

FIG. 10. — Density ρ_m against product $\rho_m \cdot \rho$.

In order to obtain comparable results, it is necessary to test at least five test specimens and to average the results.

48.2 *Méthode chimique*

Pour les alliages ferreux, on a constaté, dans la pratique, qu'il existe une relation entre la masse volumique et la teneur en silicium ou les teneurs en silicium et en aluminium; elle est donnée par l'équation:

$$\rho_m = 7\,865 - 65 (P_{Si} + 1,7 P_{Al}) \quad (34)$$

ρ_m = masse volumique, en kilogrammes par mètre cube

P_{Si} = proportion de silicium (en masse, exprimée en pour-cent)

P_{Al} = proportion d'aluminium (en masse, exprimée en pour-cent)

49. **Reproductibilité**

La reproductibilité des résultats obtenus avec chacune de ces méthodes est caractérisée par un écart type de l'ordre de 0,2% à 0,3%.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1978

Withdrawn

48.2 *Chemical method*

For iron-based alloys the relationship found in practice between density and silicon content or silicon and aluminium content is given by the equation:

$$\rho_m = 7\,865 - 65 (P_{\text{Si}} + 1.7 P_{\text{Al}}) \quad (34)$$

ρ_m = density, in kilogrammes per cubic metre

P_{Si} = proportion of silicon (in per cent, mass)

P_{Al} = proportion of aluminium (in per cent, mass)

49. **Reproducibility**

The reproducibility of the results obtained from each method is characterized by a standard deviation of the order of 0.2% to 0.3%.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1978

Withdrawn

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

50. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition d'une méthode de mesure pour la détermination de la résistivité des tôles et feuillards magnétiques.

51. Domaine d'application

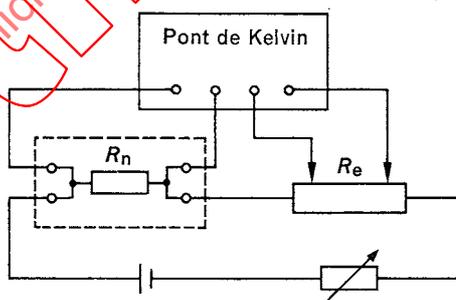
Cette méthode est applicable à toutes les tôles magnétiques. Les mesures doivent être faites à une température ambiante de $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

52. Epreuve

Des bandes éprouvettes de longueur supérieure ou égale à 250 mm et de largeur inférieure ou égale à 30 mm, comme par exemple les bandes éprouvettes Epstein spécifiées à l'article 6, seront utilisées pour la mesure. Il n'est pas nécessaire d'éliminer les revêtements d'oxyde ou de matière isolante si ce n'est aux endroits où doivent être assurés les contacts électriques.

53. Principe de la mesure

La résistivité des tôles magnétiques est déterminée en mesurant la résistance R_e d'une bande éprouvette de longueur spécifiée l . Cette résistance, habituellement de l'ordre de $1\text{ m}\Omega$ à $100\text{ m}\Omega$, est mesurée par comparaison avec une résistance connue R_n , au moyen d'un pont de type Kelvin ou de tout autre instrument approprié de précision équivalente. La méthode décrite ci-dessous utilise un pont de Kelvin suivant le circuit de la figure 11.



493/78

FIG. 11. — Schéma pour la mesure de résistance.

Pour une bande de section uniforme, la résistivité est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{R_e A}{l} \quad (35)$$

- ρ = résistivité du matériau essayé, en ohms mètres
- R_e = résistance mesurée de la bande éprouvette, en ohms
- A = section de la bande éprouvette, en mètres carrés
- l = distance entre les électrodes de potentiel, en mètres

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

50. Object

The object of this chapter is to define a measuring method for the determination of the resistivity of magnetic sheet and strip.

51. Field of application

This method is applicable to all magnetic sheet. Measurements shall be made at an ambient temperature of $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

52. Test specimen

Test specimen strips with a minimum length of 250 mm and a maximum width of 30 mm, as for example Epstein test specimen strips, specified in Clause 6 shall be used for the measurement. The oxide or other insulating coating need not be removed except from places where electrical contacts must be made.

53. Principle of measurement

The resistivity of magnetic sheet is determined by measuring the resistance R_e of a defined length ℓ of a test specimen strip. This resistance, which is usually of the order of $1\text{ m}\Omega$ to $100\text{ m}\Omega$, is measured by comparison with a known resistance R_n , by means of a Kelvin type bridge or other suitable instrumentation of equal precision. The procedure described here assumes use of a Kelvin type bridge employed as shown in Figure 11.

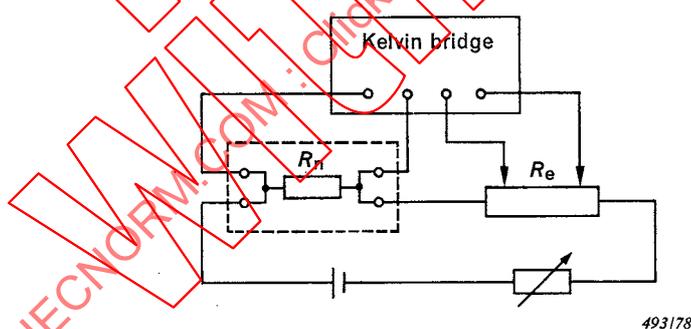


FIG. 11. — Resistance measurement circuit.

For a strip of uniform cross-section, the resistivity is given by the equation:

$$\rho = \frac{R_e A}{\ell} \quad (35)$$

- ρ = resistivity of the test material, in ohm metres
- R_e = measured resistance of the test specimen strip, in ohms
- A = cross-section of the test specimen strip, in square metres
- ℓ = distance between the potential contacts, in metres

54. Source d'alimentation

La source d'alimentation sera constituée par une source de courant continu à basse tension, capable de débiter un courant de l'ordre de 1 A à 10 A dans le circuit de la figure 11, page 62.

55. Appareillage

55.1 Dispositif à contacts

Le dispositif destiné à assurer les contacts électriques avec la bande éprouvette comprendra quatre contacts, les deux contacts d'amenée de courant encadrant ceux de prise de potentiel. La distance entre les prises de potentiel sera aussi grande que possible et la distance entre une amenée de courant et la prise de potentiel correspondante sera au moins égale à deux fois la largeur de la bande éprouvette.

55.2 Résistance R_n

Il faut avoir une résistance de précision de valeur connue avec une approximation de $\pm 0,5\%$ ou meilleure.

55.3 Pont de Kelvin

Pour la mesure de résistance on doit utiliser un pont de Kelvin avec une étendue de mesure et une sensibilité telles que des résistances de $1\text{ m}\Omega$ à $100\text{ m}\Omega$ puissent être mesurées avec une erreur comprise entre $\pm 0,5\%$, ou entre des limites plus étroites.

56. Mode opératoire

La résistance électrique R_e entre prises de potentiel est mesurée au moyen d'un pont de Kelvin conforme au paragraphe 55.3 et au schéma de la figure 11, page 62.

La valeur du courant dans les résistances R_e et R_n est réglée de manière à assurer une sensibilité suffisante du pont, sans pour autant surcharger la résistance R_n ou sans provoquer d'échauffement excessif de l'éprouvette.

Pour éliminer les erreurs dues au potentiel de contact, deux lectures successives doivent être faites avec des directions opposées du courant.

57. Détermination de la résistivité

La section A de l'éprouvette est déterminée à partir de sa largeur et de son épaisseur. La résistivité ρ peut alors être calculée d'après l'équation (35).

Pour obtenir des valeurs comparables, un nombre minimal de cinq éprouvettes doit être mesuré, le résultat étant exprimé par la moyenne des résultats obtenus.

58. Reproductibilité

La reproductibilité des résultats obtenus selon cette méthode dépend essentiellement de la précision de la mesure d'épaisseur et est caractérisée par un écart type de l'ordre de 1% à 2%.

Il faut noter qu'en utilisant la méthode de mesure électrique de masse volumique du paragraphe 48.1, conjointement avec la relation ρ_m en fonction de $\rho_m \cdot \rho$, la résistivité est automatiquement obtenue en divisant la valeur de l'abscisse par celle de l'ordonnée. En raison de la difficulté de mesurer l'épaisseur de façon suffisamment exacte, il est recommandé d'utiliser de préférence cette dernière méthode.

54. Power supply

The power supply will consist of a low voltage d.c. power supply, capable of delivering a current of the order of 1 A to 10 A to the circuit in Figure 11, page 63.

55. Apparatus

55.1 Contact apparatus

The apparatus for making electrical contact with the test specimen strip employs four contacts: two potential contacts and two current contacts arranged so that the two potential contacts lie within and are in line with the current contacts. The distance between the potential contacts shall be as large as possible and the distance between a current and potential contact point shall be at least twice the test specimen strip width.

55.2 Resistor R_n

A precision resistor with a value known to within $\pm 0.5\%$ or better is necessary.

55.3 Kelvin bridge

The resistance measurement necessitates the use of a Kelvin bridge of adequate measuring range and sensitivity so that resistances of 1 m Ω to 100 m Ω can be measured with an error of $\pm 0.5\%$ or better.

56. Measuring procedure

The electrical resistance R_e between the potential contacts is measured by a Kelvin bridge in accordance with Sub-clause 55.3 and the circuit shown in Figure 11, page 63.

The value of the current through resistances R_e and R_n is adjusted so that sufficient bridge sensitivity is achieved without overloading resistor R_n or unduly heating up the sample.

To eliminate errors due to contact potential, two successive readings shall be taken with opposite directions of current.

57. Determination of resistivity

The cross-section A of the test specimen is determined from its width and thickness. The resistivity ρ can then be calculated from equation (35).

In order to obtain comparable results, it is necessary to test at least five test specimens and to average the results.

58. Reproducibility

The reproducibility of the results obtained from this method depends essentially upon the accuracy of thickness measurement and is characterized by a standard deviation of the order of 1% to 2%.

It should be noted that when using the electrical method for measuring density described in Sub-clause 48.1 with the relationship ρ_m against $\rho_m \cdot \rho$, the resistivity is automatically obtained by dividing the abscissa by the ordinate. Because of the difficulty of measuring thickness with sufficient accuracy, this latter method is to be preferred.

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

59. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition d'une méthode de mesure pour la détermination du coefficient de résistance d'isolement superficiel des tôles et feuillets magnétiques.

60. Domaine d'application

Cette méthode est applicable à tous les tôles et feuillets magnétiques isolés.

61. Epreuve

Des éprouvettes formées chacune d'une seule bande de tôle sont utilisées pour les mesures. La largeur et la longueur d'une éprouvette seront supérieures respectivement à la largeur et à la longueur de l'assemblage de contacts, décrit au paragraphe 64.1.

62. Principe de la mesure

Dix contacts métalliques de surface déterminée sont appliqués sur la face revêtue de la tôle, dans des conditions spécifiées de tension électrique et de pression. Une résistance de 5Ω est connectée en série avec chaque contact.

La somme des courants passant par les dix contacts, comme indiqué à la figure 12, permet la mesure de l'aptitude de l'isolement superficielle à limiter le courant à travers la surface. Ce courant passant par les dix contacts est appelé I_m .

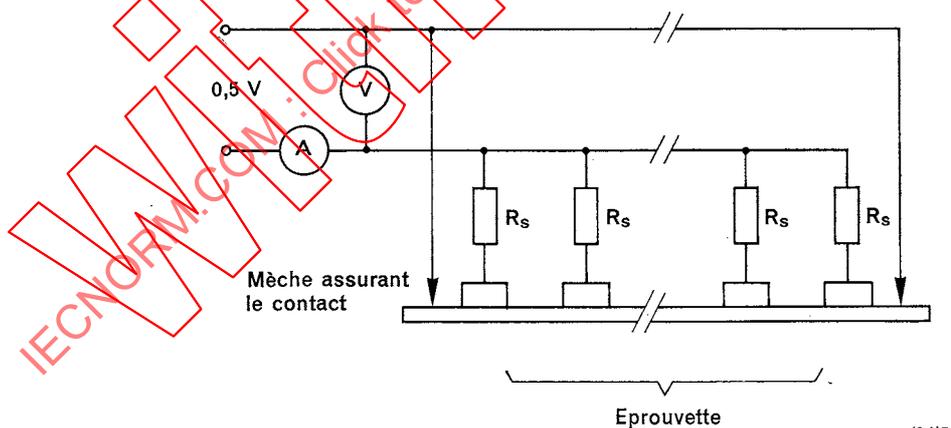


FIG. 12. — Schéma pour la mesure de la résistance d'isolement superficiel.

Comme le courant circule entre les contacts et le substrat métallique, on ne procède pas à une véritable mesure de la résistance d'isolement interlaminaire. Toutefois, cet essai permet d'obtenir un indice utile de la qualité de l'isolement superficiel.

Si, dans l'essai, on désire évaluer la qualité de l'isolement d'une seule face, on fait dix lectures de I_m et on en reporte la valeur moyenne dans l'équation (36):

CHAPTER VIII: DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF SURFACE INSULATION RESISTANCE

59. Object

The object of this chapter is to define a measurement method for the determination of the coefficient of surface insulation resistance of magnetic sheet and strip.

60. Field of application

This method is applicable to all insulated magnetic sheet and strip.

61. Test specimen

Test specimens, each one formed from a single strip of sheet, are used for these measurements. The width and length of a test specimen shall be respectively greater than the width and length of the contact assembly described in Sub-clause 64.1.

62. Principle of measurement

Ten metallic contacts of fixed area are applied to the coated surface of the sheet, under specified conditions of voltage and pressure. A $5\ \Omega$ resistor is connected in series with each contact.

Measurement of the effectiveness of the surface insulation in limiting current flow across the surface is provided by the sum of the currents through the ten contacts as shown in Figure 12. This current is defined as I_m .

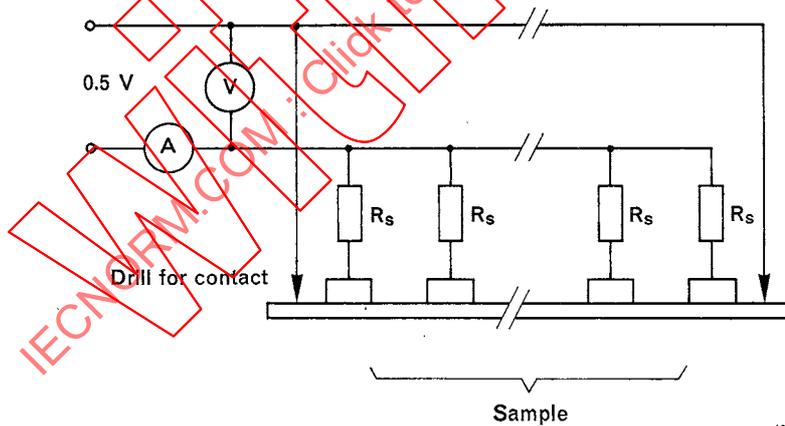


FIG. 12. — Circuit for the measurement of surface insulation resistance.

Because the current path is between the contacts and the metallic substrate, this is not a true measurement of interlaminar insulation resistance. However, this test provides a useful index of surface insulation quality.

If the insulation quality of a single surface is to be evaluated in the test, ten readings of I_m are made and the average value applied to equation (36):

$$C = A_c \left(\frac{U_m}{\frac{1}{10} \sum_{I=1}^{10} I_m} - \frac{R_s}{10} \right) = 645 \left(\frac{0,5}{\frac{1}{10} \sum_{I=1}^{10} I_m} - 0,5 \right) \quad (36)$$

U_m = tension de mesure ($U_m = 0,5$ V)

R_s = résistance en série avec chaque contact ($R_s = 5 \Omega$)

A_c = surface totale des dix contacts ($A_c = 645 \text{ mm}^2$)

C = coefficient de résistance d'isolement superficiel, en ohms millimètres carrés

Si on désire une valeur composite représentant la résistance moyenne applicable à l'une ou l'autre face de la tôle, on doit procéder à cinq lectures de I_m sur chaque face et en déduire une valeur de

$$\frac{1}{10} \sum_{I=1}^{10} I_m.$$

Si on désire exprimer la valeur composite en termes de résistance par tôle, la valeur obtenue par l'équation (36) doit être doublée.

63. Source d'alimentation

Le circuit de mesure peut être alimenté par des batteries ou par une source de courant continu stabilisée en tension capables de fournir une tension de $0,5 \text{ V} \pm 0,5\%$ pour des courants variant de zéro à $1,0 \text{ A}$.

64. Appareillage

64.1 Assemblage de contacts

L'éprouvette est comprimée entre un plateau et l'assemblage de contacts. L'assemblage de contacts se compose de dix tiges métalliques verticales mobiles axialement en comprimant ces ressorts et logées dans un bâti support. Ces dix tiges de contact sont normalement disposées sur deux rangées parallèles de cinq contacts chacune. Toutefois, il est possible pour raison de commodité de disposer les dix contacts sur une seule rangée. Chaque tige est pourvue d'un disque de contact de bronze ou d'un autre métal approprié (en acier inoxydable, par exemple), et doit être isolée électriquement du bâti de montage. La surface totale de contact des dix disques de contact doit être de 645 mm^2 , tous les disques devant avoir des surfaces de contact égales.

La prise de contact avec le métal de base de l'éprouvette est assurée par deux mèches d'environ 3 mm de diamètre; ces mèches compriment des ressorts et percent le revêtement isolant.

64.2 Résistance de 5Ω

Une résistance de $5 \Omega \pm 1,0\%$ est connectée en série avec chaque disque de contact. Les dix contacts et leurs résistances sont connectés en parallèle comme l'indique la figure 12, page 66.

64.3 Mesure de la tension

La tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre approprié de classe 1 ou meilleure: sa résistance interne doit être supérieure ou égale à $1\,000 \Omega/\text{V}$. Utiliser, si possible, un voltmètre de résistance interne très élevée de sorte qu'il ne soit pas nécessaire de faire de correction pour tenir compte de la consommation de cet appareil.

$$C = A_c \left(\frac{U_m}{\frac{1}{10} \sum_{\text{T}} I_m} - \frac{R_s}{10} \right) = 645 \left(\frac{0.5}{\frac{1}{10} \sum_{\text{T}} I_m} - 0.5 \right) \quad (36)$$

U_m = measuring voltage ($U_m = 0.5$ V)

R_s = resistor in series with each contact ($R_s = 5 \Omega$)

A_c = total area of the ten contacts ($A_c = 645 \text{ mm}^2$)

C = coefficient of surface insulation resistance, in ohm square millimetres

If a composite result representative of an average resistance applicable to either surface of the sheet is required, then a value of $\frac{1}{10} \sum_{\text{T}} I_m$ shall be derived from five readings of I_m on each surface.

If it is desired to express the composite result in terms of resistance per lamination, the value obtained in equation (36) shall be doubled.

63. Power supply

The measuring circuit may be operated from batteries or from a voltage-regulated d.c. supply capable of supplying a voltage of $0.5 \text{ V} \pm 0.5\%$ for currents varying from zero to 1.0 A.

64. Apparatus

64.1 Contact assembly

The test specimen is pressed between a plate and the contact assembly. The contact assembly consists of ten vertically-mounted metallic rods which move axially against springs in a mounting block. These ten contact rods are normally arranged in two parallel rows of five contacts. However, for convenience the ten contacts may be arranged in one row. Each rod is provided with a bronze (or other suitable metal, for example, stainless steel) contact button and shall be electrically insulated from the mounting frame. The total contact area of the ten contact buttons shall be 645 mm^2 , all the buttons having contact areas of identical value.

Electrical contact with the substrate of the test specimen is achieved by means of two spring-loaded twist drills of about 3 mm diameter which pierce the insulant.

64.2 5 Ω Resistor

A resistor of $5 \Omega \pm 1.0\%$ is connected in series with each contact button. The ten contacts with their resistors shall be connected in parallel as shown in Figure 12, page 67.

64.3 Voltage measurement

Voltage is measured by a suitable voltmeter of Class 1 or better; its internal resistance must be equal to or greater than $1\,000 \Omega/\text{V}$. If possible a voltmeter with very high internal resistance should be used so that corrections for the current it consumes are not required.

64.4 *Mesure du courant*

Le courant est mesuré à l'aide d'un ampèremètre approprié de classe 1 ou meilleure. Le zéro de cet ampèremètre peut être décalé afin de ne pas inclure dans la lecture le courant circulant dans le voltmètre.

64.5 *Mesure de la force appliquée*

Tout moyen de mesure de la force exercée par l'ensemble des contacts sur l'éprouvette peut convenir à condition que cette force soit mesurée avec une erreur comprise entre $\pm 5\%$, ou entre des limites plus étroites.

65. **Mode opératoire**

Après avoir disposé l'éprouvette entre le plateau et l'assemblage des dix contacts, la force spécifiée est appliquée. En vue d'obtenir des résultats comparables, il est recommandé d'appliquer une force de 1 290 N (valeur normale). Cette force correspond à une pression de 2 N/mm² si la surface totale de contact est de 645 mm².

La tension indiquée par le voltmètre sera ensuite réglée à 0,50 V et la lecture de l'ampèremètre effectuée. Le domaine des courants s'étend de 0 A pour un isolant parfait jusqu'à 1,0 A pour un conducteur parfait.

On peut vérifier qu'il en est bien ainsi en remplaçant l'éprouvette par une feuille de cuivre propre. L'ampèremètre doit alors indiquer 1,0 A $\pm 1\%$. Sinon, nettoyer les pastilles de contact, vérifier le tranchant et la résistance de contact des mèches, et vérifier la tension d'alimentation.

66. **Détermination du coefficient de résistance d'isolement superficiel**

Le coefficient de résistance d'isolement superficiel est calculé d'après l'équation (36). Cette grandeur caractérise la qualité du revêtement.

67. **Remarques sur l'essai de résistance d'isolement**

- a) Cette méthode est particulièrement indiquée pour le contrôle de fabrication lors de l'application de revêtements isolants.
- b) La nature du dispositif d'essai et celle de l'éprouvette sont telles que des mesures successives effectuées sur la même éprouvette donnent fréquemment des valeurs différentes de résistance. Pour cette raison un essai unique est sans valeur. De plus, des mesures successives faites sur des zones voisines d'une même éprouvette donnent souvent des valeurs de courant différentes. Pour cette raison un nombre suffisant d'essais est impératif.
- c) En vue d'obtenir un résultat plus représentatif, l'échantillonnage prélevé pour cet essai doit représenter la largeur totale de la tôle.
- d) Si les deux faces de la tôle sont revêtues, on ne doit pas utiliser la même zone de l'échantillon pour essayer les deux faces.