

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 404-4

Première édition — First edition
1982

Matériaux magnétiques

**Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu
des pièces massives en acier**

Magnetic materials

**Part 4. Methods of measurement of the d.c. magnetic properties
of solid steels**



© CEI 1982

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembe
Genève, Suisse

Révision de la présente publication

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

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

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
- **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.

Publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente 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**
- **IEC Yearbook**
- **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.

IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the inside of the back cover, which lists IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 404-4

Première édition — First edition

1982

Matériaux magnétiques

**Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu
des pièces massives en acier**

Magnetic materials

**Part 4: Methods of measurement of the d.c. magnetic properties
of solid steels**

Mots clés: matériaux magnétiques durs;
acier; essais; propriétés
magnétiques en courant
continu des matériaux; mesure.

Key words: magnetic hard materials;
steel; testing; direct-current
magnetic properties of materials;
measurement.



© CEI 1982

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 méca-
nique, 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

3, rue de Varembe
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6

INTRODUCTION

Articles

1. Domaine d'application et objet	8
2. Reproductibilité	8

CHAPITRE I: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU TORE

3. Généralités	12
3.1 Objet	12
3.2 Domaine d'application	12
3.3 Epreuve	12
3.4 Enroulements	12
4. Méthodes de mesure	14
4.1 Champ magnétique	14
4.2 Induction magnétique	14
4.3 Connexion des appareils	16
4.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale	16
4.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet	16
4.6 Détermination de l'induction rémanente	20
4.7 Détermination du champ coercitif	20

CHAPITRE II: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU PERMÉAMÈTRE

5. Généralités	22
5.1 Objet	22
5.2 Domaine d'application	22
6. Perméamètre type NPL	22
6.1 Principe du perméamètre	22
6.2 Epreuve	24
6.3 Bobines de mesure	24
6.4 Mesure du champ magnétique	26
6.5 Mesure de l'induction magnétique	26
6.6 Mesure de l'uniformité de l'induction magnétique dans l'épreuve	26
6.7 Connexion des appareils	28
6.8 Détermination de la courbe d'aimantation normale	28
6.9 Détermination du cycle d'hystérésis complet	30
6.10 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif	30
7. Perméamètre Ilievici	32
7.1 Principe du perméamètre	32
7.2 Epreuve	32
7.3 Bobine de mesure	32
7.4 Mesure de l'intensité du champ magnétique	32
7.5 Mesure de l'induction magnétique	32
7.6 Connexion des appareils	34
7.7 Détermination de la courbe d'aimantation normale	34

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7

INTRODUCTION

Clause

1. Scope and object	9
2. Reproducibility	9

CHAPTER I: DETERMINATION OF THE MAGNETIC CHARACTERISTICS
BY THE RING METHOD

3. General	13
3.1 Object	13
3.2 Field of application	13
3.3 Test specimen	13
3.4 Windings	13
4. Methods of measurement	15
4.1 Magnetic field strength	15
4.2 Magnetic flux density	15
4.3 Connection of apparatus	17
4.4 Determination of normal magnetization curve	17
4.5 Determination of a complete hysteresis loop	17
4.6 Determination of remanent flux density	21
4.7 Determination of coercive field strength	21

CHAPTER II: DETERMINATION OF THE MAGNETIC PROPERTIES
BY THE PERMEAMETER METHOD

5. General	23
5.1 Object	23
5.2 Field of application	23
6. The NPL type permeameter	23
6.1 Principle of the permeameter	23
6.2 Test specimen	25
6.3 Search coils	25
6.4 Measurement of magnetic field strength	27
6.5 Measurement of magnetic flux density	27
6.6 Measurement of the uniformity of the magnetic flux in the test specimen	27
6.7 Connection of apparatus	29
6.8 Determination of the normal magnetization curve	29
6.9 Determination of the complete hysteresis loop	31
6.10 Determination of remanent flux density and coercive field strength	31
7. The Iliovici permeameter	33
7.1 Principle of permeameter	33
7.2 Test specimen	33
7.3 Search coil	33
7.4 Measurement of magnetic field strength	33
7.5 Measurement of magnetic flux density	33
7.6 Connection of apparatus	35
7.7 Determination of the normal magnetization curve	35

Articles	Pages
7.8 Détermination du cycle d'hystérésis complet	36
8. Perméamètre MH	36
8.1 Principe du perméamètre	36
8.2 Eprouvette	38
8.3 Bobines de mesure	38
8.4 Mesure du champ magnétique	38
8.5 Mesure de l'induction magnétique	40
8.6 Connexion des appareils	40
8.7 Détermination de la courbe d'aimantation normale	40
8.8 Détermination du cycle d'hystérésis complet	40
8.9 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif	40
9. Perméamètre de Sanford-Bennett pour champs élevés	40
9.1 Principe du perméamètre	40
9.2 Eprouvette	42
9.3 Mesure du champ magnétique	42
9.4 Mesure de l'induction magnétique	42
9.5 Connexion des appareils	42
9.6 Détermination de la courbe d'aimantation normale	42
9.7 Détermination du cycle d'hystérésis complet	44
9.8 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif	44
ANNEXE A – Modes d'étalonnage de l'intégrateur de flux	46
ANNEXE B – Mesure de la grandeur «surface × nombre de spires» de la bobine de mesure	50
FIGURES	52

Clause	Page
7.8 Determination of the complete hysteresis loop	37
8. The MH permeameter	37
8.1 Principle of the permeameter	37
8.2 Test specimen	39
8.3 Search coils	39
8.4 Measurement of the magnetic field strength	39
8.5 Measurement of the magnetic flux density	41
8.6 Connection of apparatus	41
8.7 Determination of the normal magnetization curve	41
8.8 Determination of the complete hysteresis loop	41
8.9 Determination of the remanent flux density and coercive field strength	41
9. The Sanford-Bennett High H permeameter	41
9.1 Principle of the permeameter	41
9.2 Test specimen	43
9.3 Measurement of the magnetic field strength	43
9.4 Measurement of the magnetic flux density	43
9.5 Connection of apparatus	43
9.6 Determination of the normal magnetization curve	43
9.7 Determination of the complete hysteresis loop	45
9.8 Determination of the remanent flux density and coercive field strength	45
APPENDIX A – Methods of calibrating the flux integrator	47
APPENDIX B – Measurement of the effective area turns product of search coils	51
FIGURES	52

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

**Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
en courant continu des pièces massives en acier**

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 Budapest en 1977. A la suite de cette réunion, un projet, document 68(Bureau Central)13, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mars 1978.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de ce projet:

Afrique du Sud (Republic d')	Danemark	Japon
Australie	Egypte	Pologne
Autriche	Espagne	Royaume-Uni
Belgique	Etats Unis d'Amérique	Suède
Brésil	France	Union des Républiques
Canada	Italie	Socialistes soviétiques

Des modifications, document 68(Bureau Central)21, furent soumises à l'approbation des Comités nationaux suivant la Procédure des Deux Mois en mars 1980.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de ces modifications:

Afrique du Sud (République d')	Etats-Unis d'Amérique	Suède
Autriche	France	Tchécoslovaquie
Belgique	Irlande	Turquie
Canada	Pologne	Union des Républiques
Danemark	Roumanie	Socialistes Soviétiques
Espagne		

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS

Part 4: Methods of measurement of the d.c. magnetic properties
of solid steels

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 Budapest in 1977. As a result of this meeting, a draft, Document 68(Central Office)13, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in March 1978.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of this draft:

Australia	Egypt	Spain
Austria	France	Sweden
Belgium	Italy	Union of Soviet
Brazil	Japan	Socialist Republics
Canada	Poland	United Kingdom
Denmark	South Africa (Republic of)	United States of America

Amendments, Document 68(Central Office)21, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in March 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of these amendments.

Austria	Ireland	Sweden
Belgium	Poland	Turkey
Canada	Romania	Union of Soviet
Czechoslovakia	South Africa (Republic of)	Socialist Republics
Denmark	Spain	United States of America
France		

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu des pièces massives en acier

INTRODUCTION

1. Domaine d'application et objet

La présente norme a pour objet de définir la terminologie et de spécifier les méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu des pièces massives en acier. Des barres d'épaisseur importante, les pièces moulées ou forgées, telles que définies sous la référence C1 et D1 du document classification, sont des exemples de pièces massives.

Deux méthodes ont été retenues:

- a) la méthode du tore en particulier pour les champs magnétiques d'intensité inférieure à 5 kA/m;
- b) la méthode du perméamètre. Différents perméamètres sont utilisés selon le domaine d'intensité de champ magnétique:
 - le perméamètre type NPL (National Physical Laboratory) pour les champs d'intensité comprise entre 2 kA/m et 200 kA/m;
 - le perméamètre Iliovici pour les champs d'intensité comprise entre 2 kA/m et 40 kA/m;
 - le perméamètre MH (Médium H) pour les champs d'intensité comprise entre 2 kA/m et 24 kA/m;
 - le perméamètre Sanford-Bennett pour champs élevés d'intensité comprise entre 8 kA/m et 400 kA/m.

Note. - Les méthodes décrites dans cette norme sont des méthodes d'essais dans lesquelles l'éprouvette est dans un circuit magnétique fermé. Il existe aussi des méthodes dans lesquelles l'éprouvette est dans un circuit magnétique ouvert.

2. Reproductibilité

La précision finale de l'appareillage d'essai est une fonction complexe dépendant des appareils 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. Particulièrement dans les méthodes du perméamètre: les paramètres de forme, les effets d'extrémité, les effets de coin, les variations de la longueur du circuit magnétique et de la section aussi bien que les caractéristiques d'hystérésis des culasses peuvent causer des différences importantes dans les résultats d'essai lorsque des échantillons provenant d'un même lot de matériau sont préparés et testés à l'aide des différents perméamètres. La meilleure utilisation de n'importe quel appareil est celle pour laquelle les facteurs d'erreur peuvent être limités à des valeurs tolérables. Cela est habituellement réalisé lorsque la coercitivité est raisonnablement importante (>1 kA/m) ou lorsque les inductions sont voisines de celles correspondant à une perméabilité maximale dans l'éprouvette.

MAGNETIC MATERIALS

Part 4: Methods of measurement of the d.c. magnetic properties of solid steels

INTRODUCTION

1. Scope and object

The object of this standard is to describe the terminology and to specify the methods of measuring the d.c. magnetic properties of solid steels. Examples of solid steels are: bars of substantial thickness, cast or forged solid steels as defined under references C1 and D1 of the classification document.

Two methods are used:

- a) the ring method particularly for magnetic field strengths of less than 5 kA/m;
- b) the permeameter method. Different permeameters are used according to the range of the magnetic field strength:
 - the NPL (National Physical Laboratory) type permeameter for field strengths of between 2 kA/m and 200 kA/m;
 - the Ilievici permeameter for field strengths of between 2 kA/m and 40 kA/m;
 - the MH (Medium H) permeameter for field strengths of between 2 kA/m and 24 kA/m;
 - the Sanford-Bennett (High H) permeameter for field strengths of between 8 kA/m and 400 kA/m.

Note. - The methods described in this standard are test methods in which the test specimen is in a closed magnetic circuit. Methods in which the test specimen is in an open magnetic circuit are existing.

2. Reproducibility

The ultimate accuracy of test equipment is a complex function dependent upon measuring instruments and other characteristics of measuring conditions and equipment; it is therefore not always possible to state the absolute accuracy that is attainable. Particularly in the permeameter methods: shape parameters, end effects, corner effects, variations in path length and cross-section, as well as hysteresis characteristics of the yokes can cause substantially different test results to be obtained when specimens from an identical batch of material are prepared and tested in the various permeameters. The best use of any apparatus is where these error factors can be limited to tolerable values. Usually that occurs where coercivity is reasonably large (>1 kA/m) or at inductions above those corresponding to maximum permeability in the test specimen.

Le résultat des mesures étant affecté par une variation de température, des précautions doivent être prises pour éviter un échauffement de l'éprouvette. Le domaine de la variation acceptable de température doit être spécifié.

Par ailleurs pour une méthode donnée, l'expérience indique la reproductibilité ou l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure qui peut être prévue. Cette erreur dépend des erreurs escomptées des appareils de mesure. L'erreur totale de mesure de l'indication magnétique ou de l'intensité du champ magnétique normalement escomptée pour les différentes méthodes est inférieure ou égale à $\pm 2\%$ en utilisant les instruments de mesure dont l'erreur estimée est inférieure ou égale à $\pm 1\%$.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-4:1982

Without 2M

As the result of the measurements is affected by changes in temperature, precautions must be taken to avoid heating the test specimen. The acceptable temperature shall be specified.

For a known method, experience shows the reproducibility or the size of the measurement error that can be expected. This error depends upon the estimated errors of the measuring instruments. The total measurement error of the measurement of the magnetic flux density or the magnetic field strength normally expected for the different methods is less than or equal to $\pm 2\%$ when using measuring instruments whose estimated measuring error is less than or equal to $\pm 1\%$.

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-4:1982

CHAPITRE I: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU TORE

3. Généralités

3.1 Objet

Ce chapitre a pour objet la définition de la «méthode du tore» employée pour la détermination de la courbe d'aimantation normale et du cycle d'hystérésis.

3.2 Domaine d'application

Cette méthode est utilisée particulièrement pour les champs d'intensité inférieure à 5 kA/m. Cependant en prenant des précautions pour éviter un échauffement de l'éprouvette, cette méthode reste valable pour des champs magnétiques de valeur plus élevée.

3.3 Eprouvette

L'éprouvette est constituée par un tore homogène sans soudure, de section rectangulaire ou circulaire. L'aire de la section du tore sera déterminée par les dimensions du produit, l'uniformité des propriétés magnétiques, la sensibilité des instruments et l'espace requis pour les enroulements. L'aire de la section sera habituellement comprise entre 100 mm² et 500 mm².

Lors de l'usinage de l'éprouvette, veiller à éviter un écrouissage du matériau et en conséquence une altération des caractéristiques magnétiques. L'éprouvette peut être usinée par tournage suivi d'une légère rectification avec suffisamment de liquide de refroidissement pour éviter l'échauffement du matériau. Ebavurer les bords du tore.

Pour réduire l'effet des variations radiales de l'intensité du champ magnétique, la relation suivante s'applique:

$$D \leq 1,1 d \quad (1)$$

où:

D = diamètre extérieur de l'éprouvette, en mètres

d = diamètre intérieur de l'éprouvette, en mètres

Les dimensions de l'éprouvette doivent être déterminées par mesure des diamètres extérieur et intérieur du tore ainsi que l'épaisseur ou diamètre à l'aide d'un micromètre approprié ou un vernier. L'aire de la section moyenne doit être calculée avec une précision de $\pm 0,5\%$ au moins.

La longueur moyenne du circuit magnétique de l'éprouvette doit être également calculée avec une précision de $\pm 0,5\%$ au moins, à l'aide de la relation:

$$L = \pi \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

où:

L = longueur moyenne du circuit magnétique de l'éprouvette, en mètres

3.4 Enroulements

Avant la réalisation des bobinages, et après avoir réalisé une connexion à la masse en vue de la vérification de l'isolation des enroulements, une mince couche d'isolant est à déposer sur le tore.

CHAPTER I: DETERMINATION OF THE MAGNETIC CHARACTERISTICS BY THE RING METHOD

3. General

3.1 Object

This chapter describes the ring method used to obtain the normal magnetization curve and the hysteresis loop.

3.2 Field of application

This method is used particularly for magnetic field strengths of less than 5 kA/m. However if care is taken to avoid heating the test specimen, this method may be used at higher magnetic field strengths.

3.3 Test specimen

The test specimen is a homogeneous unwelded ring of rectangular or circular cross-section. The cross-sectional area of the ring will be determined by the product dimensions, uniformity of magnetic properties, instrumentation sensitivity and space required for the test windings. Usually the cross-sectional area will be in the range of 100 mm² to 500 mm².

Care shall be taken in the machining of the test specimen to avoid work hardening of the material and hence alteration of the magnetic characteristics. The test specimen may be prepared by turning and finished by light grinding with sufficient coolant to prevent heating the material. The edges of the ring shall be deburred.

To reduce the effect of the radial variation of the magnetic field strength, the following relationship shall apply:

$$D \leq 1.1 d \quad (1)$$

where:

D = outside diameter of test specimen, in metres

d = inside diameter of test specimen, in metres

The dimensions of the test specimen shall be determined by measuring the outside and inside diameters of the ring together with the height or diameter using a suitable micrometer or vernier gauge. The mean cross-sectional area shall be calculated with an uncertainty of $\pm 0.5\%$ or better.

The mean magnetic path length of the test specimen shall also be calculated with an uncertainty of $\pm 0.5\%$ or better from the relationship:

$$L = \pi \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

where:

L = mean magnetic path length of test specimen, in metres

3.4 Windings

Before winding, a connection shall be made to the core in order to check the insulation of the windings and then the ring should be overlaid with a thin layer of insulating material.

En premier lieu, un fil de cuivre isolé, enroulé uniformément tout le long de l'anneau constitue l'enroulement secondaire. Les dimensions de cet enroulement secondaire doivent être mesurées à l'aide d'un micromètre et la section moyenne A_s est calculée.

L'enroulement d'aimantation constitué par un fil de section suffisante pour supporter le courant maximal d'aimantation doit être ensuite enroulé en une ou plusieurs couches sur l'anneau avec un nombre de spires suffisant pour produire l'intensité de champ maximale spécifiée. L'enroulement d'aimantation peut être composé:

- a) d'un grand nombre de spires d'un fil unique appliqué uniformément et étroitement autour du tore entier, ou
- b) d'un nombre plus faible de spires d'un câble à multifils appliqué uniformément et étroitement autour du tore entier, les extrémités de chaque fil étant reliées entre elles de façon à donner l'effet d'une bobine à multicouches, ou
- c) d'un arrangement de conducteurs rigides ou de conducteurs en partie rigides et en partie flexibles, qui peut être ouvert pour mise en place du tore (comportant la bobine de flux et les isolants) et qui peut être ensuite refermé pour former un toroïde réparti uniformément autour du tore.

Si nécessaire, le tore bobiné est immergé dans un bain d'huile ou soumis à un courant d'air afin de le refroidir.

Note. – Avec les dispositifs décrits ci-dessus, employés avec une bobine de flux répartie uniformément, une erreur, qui peut être présente dans n'importe quel essai de tore, pourra être amplifiée et prendre une importance considérable. Cette erreur provient du fait qu'en bobinant une éprouvette annulaire d'une façon toroïdale, une spire effectivement circulaire de diamètre égal au diamètre moyen du tore, est ainsi produite.

Le flux entre les spires circulaires effectives de l'enroulement de magnétisation et de la bobine du flux, associée avec le flux parallèle à l'axe du tore, est ajouté ou soustrait du flux circonférentiel. Quand un câble à multifils est employé pour l'enroulement d'aimantation, le nombre de spires dans le primaire de cette inductance mutuelle supplémentaire est accru en proportion du nombre de fils, et l'erreur due à cette source peut atteindre plusieurs pour-cent, particulièrement aux fortes intensités de champ, quand la perméabilité du fer est réduite. Pour éliminer cette erreur, une spire peut être enroulée en retour sur le secondaire le long de la circonférence moyenne du tore ou, préférablement, le câble d'aimantation est à enrouler un nombre pair de couches, les couches alternées étant enroulées dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire.

4. Méthodes de mesure

4.1 Champ magnétique

L'intensité du courant d'aimantation est mesurée à l'aide d'un ampèremètre. La valeur du champ magnétique est calculée à partir de la relation suivante:

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (3)$$

où:

- H = valeur du champ magnétique, en ampères par mètre
- N_1 = nombre de spires de l'enroulement d'aimantation du tore
- L = longueur moyenne du circuit magnétique, en mètres
- I = intensité du courant d'aimantation, en ampères

4.2 Induction magnétique

L'enroulement secondaire (bobine B) est relié à un intégrateur de flux* étalonné selon l'une des procédures définies à l'annexe A.

* L'intégrateur de flux peut être un galvanomètre balistique, un fluxmètre ou un intégrateur électronique.

Firstly, a secondary winding of insulated copper wire shall be wound evenly round the core. The dimensions of the secondary winding shall be measured with a micrometer and the mean cross-sectional area, A_s of the secondary winding is calculated.

A magnetizing winding of wire capable of carrying the maximum magnetizing current and of a sufficient number of turns to produce the maximum required magnetic field strength shall be evenly wound in one or more layers on the core. The magnetizing winding may consist of:

- a) a large number of turns of a single conductor applied closely and uniformly round the whole ring, or
- b) a smaller number of turns of a multicore cable applied closely and uniformly round the whole ring, the ends of the conductors in the individual cores being interconnected to give the effect of one multilayer winding, or
- c) an arrangement of rigid, or part rigid and part flexible, conductors which can be opened to admit the ring (carrying the secondary winding and insulation) and then closed to form a uniformly wound toroid round the ring.

If necessary, the wound ring is immersed in an oil bath or subjected to an air blast in order to cool it.

Note. – If the above arrangements are used with an uniformly distributed secondary winding, an error, which may be present in any ring test, is liable to be magnified and to become of considerable importance. This error arises from the fact that, in winding a ring specimen toroidally, an effective circular turn of diameter equal to the mean diameter of the ring is produced.

The flux between the effective circular turns of the magnetizing winding and secondary winding, associated with flux parallel to the axis of the ring, is added to, or subtracted from the circumferential flux. When a multiconductor cable is used for the magnetizing winding, the number of turns in the primary of this supplementary mutual inductance is increased in proportion to the number of cores, and the error from this source, particularly at high field-strengths where the permeability of the iron is reduced, may amount to several per cent. To eliminate this error a turn may be wound back on the secondary winding along the mean circumference of the ring, or, preferably, the magnetizing cable should be wound in pairs of layers, alternate layers being wound clockwise and anti-clockwise around the ring.

4. Methods of measurement

4.1 Magnetic field strength

The magnetizing current shall be measured with an ammeter.
The magnetic field strength shall be calculated from the following relationship:

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (3)$$

where:

- H = magnetic field strength, in amperes per metre
- N_1 = number of turns of magnetizing winding of the ring
- L = mean magnetic path length, in metres
- I = magnetizing current, in amperes

4.2 Magnetic flux density

The secondary winding (B coil) shall be connected to a flux integrator *, the calibration of which shall be established in accordance with one of the procedures given in Appendix A.

* The flux integrator may be a ballistic galvanometer, fluxmeter or electronic charge integrator.

A condition que l'enroulement secondaire soit enroulé étroitement sur l'éprouvette, le flux de l'air inclus dans l'enroulement secondaire sera insignifiant pour la gamme de champs compris entre 0 à 4 kA/m et aucune correction ne sera nécessaire. Pour les valeurs élevées du champ magnétique, une correction pour le flux de l'air doit être appliquée selon l'équation 8.

4.3 Connexion des appareils

Les appareils sont connectés comme indiqué à la figure 1, page 52.

Une source de courant continu E (batterie ou source de courant continu stabilisé) est connectée à travers l'ampèremètre A , l'inverseur S_1 et le commutateur S_4 à l'enroulement d'aimantation N_1 du tore. Avec l'interrupteur S_5 fermé, le courant dans le circuit d'aimantation est réglé par la résistance R_1 . C'est le schéma du circuit d'aimantation pour la détermination de la courbe normale d'induction et pour la mesure des extrémités du cycle d'hystérésis. L'interrupteur S_5 , conjointement avec la résistance R_5 , est utilisé pour la détermination du cycle d'hystérésis complet.

Le circuit secondaire comprend l'enroulement secondaire N_2 (bobine B) relié à l'intégrateur de flux F à travers la résistance R_2 (réglage de sensibilité). La résistance R_4 est un shunt de réglage nécessaire avec certains types d'intégrateurs de flux.

4.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale

L'éprouvette est soigneusement désaimantée à partir d'un champ d'intensité d'au moins 5 kA/m par une lente inversion du courant continu, que l'on réduit graduellement. Les éprouvettes qui ont été soumises à des champs d'intensité élevée sont avant essai démagnétisées à partir d'un champ de valeur suffisamment élevée (par exemple lors de la rectification sur plateau magnétique).

Note. - Pour que le champ magnétique puisse complètement pénétrer dans l'éprouvette la durée pour l'inversion devrait être supérieure à 2 s pour une section de 10 mm × 10 mm et 10 s pour une section de 20 mm × 20 mm.

L'intégrateur de flux doit être étalonné conformément à l'annexe A avec l'interrupteur S_5 fermé et le commutateur S_4 dans la position 1. Ensuite le commutateur S_4 doit être fermé en position 2 et un faible courant correspondant à une faible intensité de champ magnétique (voir équation 3) circule à travers le bobinage d'aimantation N_1 . Ce courant doit être inversé environ 10 fois à l'aide de l'inverseur S_1 de façon à maintenir le matériau dans un état cyclique régulier. L'inverseur S_2 peut être fermé durant l'opération pour maintenir à zéro l'intégrateur de flux. L'inverseur S_2 étant ouvert, l'indication de l'intégrateur de flux correspondant à l'inversion du champ magnétique doit être enregistrée et l'induction magnétique correspondante doit être déterminée.

En augmentant successivement le courant d'aimantation et en répétant cette procédure, des valeurs correspondantes de l'intensité de champ magnétique et de l'induction magnétique peuvent être obtenues, à partir desquelles une courbe d'aimantation normale peut être tracée.

Note. - Le courant d'aimantation ne doit jamais décroître durant les mesures, sinon l'éprouvette doit être désaimantée avant de refaire les mesures.

4.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet

L'éprouvette est désaimantée et les extrémités du cycle d'hystérésis sont déterminées en mesurant les valeurs correspondantes du champ magnétique et de l'induction magnétique selon le paragraphe 4.4.

La partie PQ du cycle d'hystérésis (voir figure 2, page 52) est ensuite déterminée avec l'inverseur S_1 fermé en position 1 en ouvrant l'interrupteur S_5 , et en mesurant le champ magnétique correspondant et la modification de l'induction magnétique. En réglant la résistance R_5 , un

Provided that the secondary winding is wound closely on the test specimen, the air flux included in the secondary winding over the range of magnetic field strength 0 to 4 kA/m will be insignificant and no correction need be applied. At higher values of magnetic field strength, an air flux correction shall be applied in accordance with equation 8.

4.3 Connection of apparatus

The apparatus is connected as shown in Figure 1, page 52.

A source of direct current E (battery or stabilized d.c. supply) is connected through ammeter A , reversing switch S_1 and changeover switch S_4 to the magnetizing winding N_1 on the ring specimen. With switch S_5 closed, the current in the magnetizing circuit is controlled by resistor R_1 . This is the arrangement of the magnetizing circuit for the determination of the normal induction curve and for the measurement of the tips of hysteresis loops. Switch S_5 , together with resistor R_5 , is used in the determination of the complete hysteresis loop.

The secondary circuit comprises the secondary winding N_2 (B coil) connected to the flux integrator F through resistor R_2 (sensitivity control). Resistor R_4 is a shunt control required with some types of flux integrator.

4.4 Determination of normal magnetization curve

The specimen shall be carefully demagnetized from a magnetic field strength of not less than 5 kA/m by the slow reversal of a gradually reducing direct current. Test specimens which have been subjected to a higher magnetic field strength shall be demagnetized from a suitably high field before test (for example when machined using a magnetic chuck).

Note. – In order that the magnetic field may completely penetrate the test specimen, the duration of reversal should be greater than 2 s for a cross-section 10 mm × 10 mm and 10 s for a cross-section 20 mm × 20 mm.

With switch S_5 closed and changeover switch S_4 in position 1, the flux integrator shall be calibrated as described in Appendix A. Then changeover switch S_4 shall be closed in position 2 and a small current corresponding to a small magnetic field strength (see equation 3) passed through the magnetizing winding N_1 . The current shall be reversed about 10 times by means of reversing switch S_1 to bring the material into a steady cyclic state. Switch S_2 may be closed during this operation to maintain the flux integrator at zero. With switch S_2 open the flux integrator reading corresponding to the reversal of the magnetizing field shall be recorded and the corresponding magnetic flux density shall be calculated.

By successively increasing the magnetizing current and repeating this procedure, corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density may be obtained from which a normal induction curve may be plotted.

Note. – The magnetizing current must never be decreased during the measurements otherwise the test specimen must be demagnetized before resuming measurements.

4.5 Determination of a complete hysteresis loop

The test specimen shall be demagnetized and the tip points of the hysteresis loop shall be determined by measuring the corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density in accordance with Sub-clause 4.4.

Portion PQ of the hysteresis loop (see Figure 2, page 52) is then determined with switch S_1 closed in position 1 by opening switch S_5 , and measuring the corresponding magnetic field strength and change in magnetic flux density. By adjusting resistor R_5 a number of points on

nombre de points de la courbe PQ peut être obtenu. Le point Q est obtenu avec l'interrupteur S_5 fermé et en mesurant la modification de l'induction magnétique à l'ouverture de l'inverseur S_1 .

La valeur de l'intensité du champ magnétique en chaque point est calculée à partir de la valeur mesurée correspondante du courant passant (voir équation 3).

La valeur de l'induction magnétique en chaque point est calculée à partir de l'équation suivante:

$$B_{P'} = B_P - \Delta B \quad (4)$$

où:

$B_{P'}$ = induction magnétique au point P' de la courbe PQ, en teslas

B_P = induction magnétique à la pointe du cycle d'hystérésis, en teslas

ΔB = variation de l'induction magnétique mesurée, à l'ouverture de l'interrupteur S_5 , l'inverseur S_1 étant fermé en position 1, en teslas

La partie QS du cycle d'hystérésis est déterminée avec l'interrupteur S_5 ouvert et en fermant l'inverseur S_1 . Les modifications de l'intensité du champ magnétique et de l'induction magnétique sont mesurées en premier lieu avec l'inverseur S_1 en position ouverte et ensuite en le fermant à la position 2.

La valeur de l'intensité du champ magnétique en chaque point est calculée à partir de la valeur mesurée du courant circulant quand S_1 est fermé en position 2 (voir équation 3).

La valeur de l'induction magnétique pour chaque point est calculée à partir de l'équation suivante:

$$B_{Q'} = B_Q - \Delta B \quad (5)$$

où:

$B_{Q'}$ = induction magnétique sur la courbe QS, en teslas

B_Q = induction magnétique au point Q' , en teslas

ΔB = variation de l'induction magnétique mesurée, l'inverseur S_1 étant fermé en position 2 avec l'interrupteur S_5 ouvert, en teslas

Pour l'établissement du cycle d'hystérésis complet, la séquence des commutations doit être conforme à la procédure définie au tableau I, pour maintenir l'éprouvette dans un état cyclique régulier.

the curve PQ can be obtained. The point Q is obtained with switch S_5 closed and measuring the change in magnetic flux density when opening switch S_1 .

The value of the magnetic field strength at each point is calculated from the corresponding measured value of current flowing (see equation 3).

The value of the magnetic flux density at each point is calculated from the following relationship:

$$B_{P'} = B_P - \Delta B \quad (4)$$

where:

$B_{P'}$ = magnetic flux density at the point P' on curve PQ, in teslas

B_P = magnetic flux density at tip of hysteresis loop, in teslas

ΔB = change in magnetic flux density measured when switch S_5 is opened, switch S_1 being closed in position 1, in teslas

Portion QS of the hysteresis loop is determined with switch S_5 opened and by closing switch S_1 . Changes in magnetic field strength and magnetic flux density are measured starting with switch S_1 in the open position and closing it to position 2.

The value of the magnetic field strength at each point is calculated from the measured value of the current flowing when S_1 is closed in position 2 (see equation 3).

The value of the magnetic flux density at each point is calculated from the following relationship:

$$B_{Q'} = B_Q - \Delta B \quad (5)$$

where:

$B_{Q'}$ = magnetic flux density on curve QS, in teslas

B_Q = magnetic flux density at the point Q, in teslas

ΔB = change in magnetic flux density measured when switch S_1 is closed in position 2 with the switch S_5 open, in teslas

To obtain the complete hysteresis loop, the switching sequence shall be in accordance with the arrangement given in Table I to maintain the test specimen in a steady cyclic state.

TABLEAU I

*Séquence des commutations nécessaires au maintien
de l'éprouvette dans un état cyclique régulier*

	Inverseur S_1	Interrupteur S_5	Lieu
1 ^{er} temps	Fermé (1)	Fermé	P
2 ^e temps	Fermé (1)	Ouvert	P'
3 ^e temps	Ouvert	Ouvert	Q
4 ^e temps	Fermé (2)	Ouvert	Q'
5 ^e temps	Fermé (2)	Fermé	S
6 ^e temps	Fermé (2)	Ouvert	S'
7 ^e temps	Ouvert	Ouvert	T
8 ^e temps	Fermé (1)	Ouvert	T'
9 ^e temps	Fermé (1)	Fermé	P

Les résistances R_1 et R_5 sont respectivement réglées pour avoir:

- résistance R_1 : les valeurs d'intensité du champ magnétique $+H$ ou $-H$, c'est-à-dire le point P ou le point S du cycle (figure 2, page 52);
- résistance R_5 : les valeurs d'intensité du champ magnétique $+H'$ ou $-H'$, c'est-à-dire les points P' et T' ou les points Q' et S' du cycle (figure 2).

Il est souhaitable de faire des mesures sur le cycle d'hystérésis complet, ce qui permet d'éliminer les erreurs de dérive (fluxmètre et intégrateur). Cependant, comme la partie STUP du cycle est symétrique de la partie PQRS, les mesures peuvent n'être faites que sur la moitié du cycle d'hystérésis.

4.6 Détermination de l'induction rémanente

Pour un cycle d'hystérésis donné, l'induction rémanente du matériau est la valeur de l'induction magnétique en teslas quand l'intensité du champ magnétique est nulle (point Q sur le cycle d'hystérésis ou son symétrique T).

4.7 Détermination du champ coercitif

Pour un cycle d'hystérésis donné, le champ coercitif du matériau est la valeur du champ magnétique, en ampères par mètre quand l'induction magnétique est nulle (point R sur le cycle d'hystérésis ou son symétrique U). Cette dernière détermination est généralement obtenue par interpolation entre R'R'' et U'U''.

TABLE I
Switching sequence to maintain the test specimen in
a steady cyclic state

	Switch S_1	Switch S_5	Point on loop
1	Closed (1)	Closed	P
2	Closed (1)	Open	P'
3	Open	Open	Q
4	Closed (2)	Open	Q'
5	Closed (2)	Closed	S
6	Closed (2)	Open	S'
7	Open	Open	T
8	Closed (1)	Open	T'
9	Closed (1)	Closed	P

Resistors R_1 and R_5 respectively are adjusted to obtain:

- resistor R_1 : values of magnetic field strength $+H$ or $-H$, that is point P or point S on the loop (Figure 2, page 52);
- resistor R_5 : values of magnetic field strength $+H'$ or $-H'$, that is points P' and T' or points Q' and S' on the loop (Figure 2).

It is desirable to make measurements on the complete hysteresis loop, to eliminate drift errors (fluxmeter and integrator). However since portion STUP of the loop is symmetrical with portion PQRS, measurements may be made for only one half of the hysteresis loop.

4.6 Determination of remanent flux density

For a given hysteresis loop, the remanent flux density of the material is the value of the magnetic flux density, in teslas, when the magnetic field strength is zero (point Q on the hysteresis loop or the symmetrical point T).

4.7 Determination of coercive field strength

For a given hysteresis loop, the coercive field strength of the material is the value of the magnetic field strength, in amperes per metre, when the magnetic flux density is zero (point R on the hysteresis loop or the symmetrical point U). This point is normally obtained by interpolation between $R'R''$ and $U'U''$.

CHAPITRE II: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU PERMÉAMÈTRE

5. Généralités

5.1 Objet

Ce chapitre a pour objet la définition de la méthode du perméamètre employée pour la détermination de la courbe d'aimantation normale et du cycle d'hystérésis.

5.2 Domaine d'application

Plusieurs perméamètres peuvent être utilisés, chacun ayant son propre domaine d'application. Les quatre perméamètres retenus dans cette norme sont respectivement employés pour les intensités de champ magnétique figurant au tableau II.

TABLEAU II
Perméamètres

Type de perméamètre	Intensité du champ magnétique
NPL	2 kA/m à 200 kA/m
Iliovici	2 kA/m à 40 kA/m
MH	2 kA/m à 24 kA/m
Sanford-Bennett pour champs élevés	8 kA/m à 400 kA/m

Note. – Pour les intensités de champs inférieures à ces limites, la courbe d'aimantation normale et le cycle d'hystérésis peuvent être déterminés, mais avec des niveaux de reproductibilité inférieurs à ceux indiqués à l'article 2.

6. Perméamètre type NPL*

6.1 Principe du perméamètre

Le principe de l'appareil est décrit à la figure 3, page 53. L'éprouvette est maintenue entre deux culasses massives feuilletées en acier qui produisent un circuit fermé du flux pour l'éprouvette. Les culasses peuvent être constituées soit par deux bandes enroulées de tôle magnétique à grains orientés à 3% de silicium, soit par deux empilements de feuilles de tôle magnétique au silicium à grains non orientés découpées à la presse, les feuilles étant reliées ou boulonnées entre elles d'une façon appropriée.

L'aimantation de l'éprouvette est obtenue à l'aide d'un enroulement fait sur un mandrin entourant l'éprouvette. Le bobinage d'aimantation est en trois parties: aux deux extrémités: un enroulement court de 700 spires et une partie centrale longue de 2 500 tours, enroulée sur un mandrin non magnétique et non conducteur avec, aux extrémités, des joues et de fines cales d'un matériau similaire entre les enroulements. Le fil doit être un fil de cuivre isolé d'un diamètre suffisant pour supporter le courant maximal d'aimantation pendant de courtes durées sans échauffement; un diamètre de 1,5 mm est considéré comme convenable. Les enroulements des extrémités sont connectés en série; le courant dans les parties extrêmes est variable indépendamment de celui dans la partie centrale afin de compenser les fuites de flux près de l'interface éprouvette-culasse.

* Ce type de perméamètre est également connu sous les dénominations Tinsley-Cambridge or Metropolitan Vickers.

CHAPTER II: DETERMINATION OF THE MAGNETIC PROPERTIES BY THE PERMEAMETER METHOD

5. General

5.1 Object

This chapter describes the permeameter method for determining the normal magnetization curve and the hysteresis loop.

5.2 Field of application

Several permeameters can be used, each having its field of application. The four permeameters described in this standard are used in the magnetic field strength ranges shown in Table II.

TABLE II
Permeameters

Type of permeameter	Magnetic field strength
NPL	2 kA/m to 200 kA/m
Iliovici	2 kA/m to 40 kA/m
MH	2 kA/m to 24 kA/m
Sanford-Bennett High H	8 kA/m to 400 kA/m

Note. - For field strengths below these ranges, normal magnetization curve and hysteresis loop data can be determined at lower levels of reproducibility than those indicated in Clause 2.

6. The NPL type permeameter*

6.1 Principle of the permeameter

The principle of the instrument is illustrated in Figure 3, page 53. The test specimen is clamped between two massive laminated steel yokes which produce a flux closure path for the specimen. The yokes may be formed either from two strip wound C cores of grain-oriented 3% silicon steel or from two stacks of laminations punched from non-oriented silicon steel, the laminations being suitably bonded or bolted together.

Magnetization of the test specimen is achieved by means of a winding formed on a bobbin surrounding the specimen. The magnetizing winding is in three parts, two short end-sections, each of 700 turns, and a long central section of 2 500 turns wound on a non-magnetic, non-conducting former with end cheeks and thin spacers of similar material between the windings. The wire shall be insulated copper of a diameter sufficient to carry the maximum magnetizing current for short periods without undue heating; a diameter of 1.5 mm is found to be convenient. The windings on the short end-sections are connected in series addition; the current in the end-sections is varied independently from that in the central section to compensate for flux leakages near the sample/yoke interface.

* This type of permeameter is also known as the Tinsley-Cambridge or Metropolitan-Vickers permeameter.

Pour l'essai effectué sur barres rondes ou carrées, des pièces polaires sont fabriquées à partir de deux paires de blocs d'acier, chaque paire étant usinée pour ajuster l'éprouvette de façon à assurer un contact aussi parfait que possible*. Les pièces polaires doivent avoir une perméabilité suffisamment élevée pour produire un circuit de basse réluctance pour l'induction magnétique passant entre l'éprouvette et les culasses.

6.2 *Eprouvette*

L'éprouvette doit être constituée par une barre d'au moins 250 mm de long et de section adéquate pour donner une sensibilité suffisante compatible avec la précision de mesure de l'induction magnétique. Lorsque cela est possible, les dimensions sont conformes aux dimensions suivantes:

- barres carrées: 10 mm × 10 mm (tolérance $\pm 0,1$ mm);
- barres rectangulaires: 30 mm × 10 mm (tolérance $\pm 0,1$ mm);
- barres rondes: 10 mm de diamètre (tolérance $\pm 0,02$ mm).

Les barres rondes doivent être préparées par tournage et les barres rectangulaires doivent être préparées soit par rabotage ou par usinage (à l'exception du fraisage). Une légère rectification** avec abondance de liquide de refroidissement pour éviter l'échauffement du matériau peut être employée comme finissage. Le cas échéant, les barres doivent subir un traitement thermique selon les recommandations du fabricant avant l'usinage final.

L'aire de la section de l'éprouvette doit être déterminée à partir d'un nombre de mesures de chaque dimension nécessaire, également réparties sur la longueur de l'éprouvette. Les dimensions transversales doivent être mesurées, à l'aide d'un micromètre, approximativement tous les 10 mm le long de toute la longueur. L'aire moyenne de la section doit être calculée comme la moyenne des aires déterminées à plusieurs endroits avec une précision de $\pm 0,5\%$. La différence entre la plus grande aire et la plus petite ne doit pas dépasser $\pm 0,5\%$ de la surface moyenne.

6.3 *Bobines de mesure*

Deux ou trois bobines de mesure sont nécessaires, selon la méthode utilisée, pour la détermination de l'intensité du champ magnétique. En premier lieu, une fine couche d'isolant est enroulée sur l'éprouvette dans la partie centrale. Un enroulement de détection du flux en fil de cuivre isolé d'un diamètre d'environ 0,1 mm est régulièrement enroulé dans la partie centrale; la longueur de cet enroulement correspond à la longueur du dispositif de détection employé pour la mesure de l'intensité du champ magnétique; elle est en général inférieure à 5 cm. Une autre solution consiste à enrouler ce bobinage sur le mandrin dans lequel l'éprouvette est insérée. Les dimensions transversales de cette bobine de mesure doivent être mesurées avec un micromètre et l'aire moyenne A_S de la section de ce bobinage est calculée.

Ensuite, une bobine de mesure du flux en trois parties est enroulée au-dessus de la première bobine et est disposée comme à la figure 4b, page 54. Le nombre de spires aux deux parties extrêmes doit être exactement la moitié du nombre de spires de la partie centrale; l'enroulement doit être en fil de cuivre isolé de diamètre approximatif 0,1 mm. Les parties extrêmes doivent être connectées en série et en opposition avec la partie centrale.

* Voir figures 3c et 3d, page 53.

** En cas de rectification avec plateau magnétique, procéder à une désaimantation de l'éprouvette à partir d'un champ plus élevé.

For tests on round or square bars, pole pieces shall be fabricated from two pairs of steel blocks, each pair being machined to accommodate the test specimen to provide as close a fit as possible*. The pole pieces should have a permeability sufficiently high to produce a low reluctance path for the magnetic flux passing between the test specimen and yokes.

6.2 Test specimen

The test specimen shall consist of a bar at least 250 mm long and shall have a cross-sectional area adequate to give sufficient sensitivity compatible with the uncertainty of the measurement of magnetic flux density. Where possible the following dimensions should be adhered to:

- square bars: 10 mm × 10 mm (tolerance ± 0.1 mm);
- rectangular bars: 30 mm × 10 mm (tolerance ± 0.1 mm);
- round bars: 10 mm diameter (tolerance ± 0.02 mm).

Round bars shall be prepared by turning and rectangular bars shall be prepared either by planing or shaping (not milling). Light grinding** with plenty of coolant to prevent heating the material may be used for finishing. Where appropriate, bars shall be heat treated in accordance with the manufacturer's recommendations before final machining.

The cross-sectional area of the bar specimen shall be determined from a number of measurements of each necessary dimension, equally spaced over the test length. The transverse dimensions shall be measured by means of a micrometer at approximately every 10 mm along the test length. The mean cross-sectional area shall be computed as the mean of the areas determined at several places with an uncertainty of $\pm 0.5\%$. The difference between the greatest and least of the cross-sectional areas shall not exceed $\pm 0.5\%$ of the mean area.

6.3 Search coils

Two or three search coils are necessary depending on the method used for the determination of the magnetic field strength. Firstly a thin layer of insulation is wound on the test specimen over the central region. A flux sensing winding of insulated copper wire of diameter approximately 0.1 mm is evenly wound along the central region; the length of this winding corresponds to the length of the sensing device employed for the measurement of the magnetic field strength, and is generally less than 5 cm. Alternatively this search coil may be wound onto a former into which the test specimen is inserted. The transverse dimensions of this search coil shall be measured with a micrometer and the mean cross-sectional area A_S of the winding calculated.

Next, a three-part flux sensing search coil is wound over the first coil and arranged as shown in Figure 4b, page 54. The number of turns on each end-section shall be exactly one-half of the turns on the centre section; the winding shall be of insulated copper wire of diameter approximately 0.1 mm. The end-sections shall be connected in series opposition to the centre section.

* See Figures 3c and 3d, page 53.

** In the case of machining using a magnetic chuck it is necessary to demagnetize from a higher magnetic field strength.

Si l'intensité du champ magnétique doit être mesurée à l'aide d'une bobine de mesure et d'un intégrateur de flux, un troisième système de bobine est alors nécessaire, ce système comprenant habituellement deux bobines de mesure connectées en série et enroulées sur des mandrins non magnétiques et non conducteurs (par exemple du verre), chacune étant disposée de chaque côté opposé de l'éprouvette avec leur axe parallèle à celui de l'éprouvette. La grandeur: «surface $\times$ nombre de spires» de cette bobine de mesure doit être déterminée avec une précision de $\pm 0,5\%$ par l'une des méthodes suivantes:

- a) calcul à partir du nombre de spires et des mesures des dimensions moyennes de l'enroulement;
- b) comparaison avec une bobine standard utilisant la méthode donnée à l'annexe A;
- c) la bobine de mesure peut être étalonnée par un laboratoire spécialiste agréé.

Note – Le nombre de spires des bobines de mesure dépendra de la sensibilité de l'intégrateur de flux utilisé et aussi du domaine des valeurs de l'induction et du champ magnétique à mesurer.

6.4 Mesure du champ magnétique

Mesurer le champ magnétique par l'une des méthodes suivantes:

- a) une bobine de mesure (identique à celle décrite ci-dessus) connectée à un intégrateur de flux (galvanomètre balistique, fluxmètre ou intégrateur de charge électronique) qui doit être étalonné selon l'une des procédures définies à l'annexe A;
- b) un système à effet Hall ou d'autres moyens passifs de détection directe du champ magnétique. Pour les champs d'intensité inférieure à 150 kA/m, ces systèmes peuvent être étalonnés soit dans un long solénoïde adéquat de champ connu par rapport à un courant, soit à l'aide d'un magnétomètre à résonance protonique. Pour les champs supérieurs à 150 kA/m, ces systèmes peuvent être étalonnés à l'aide d'une éprouvette à résonance magnétique nucléaire (NMR);
- c) par calcul à partir du courant d'aimantation et du nombre de spires par mètre dans le bobinage central d'aimantation après application de forces magnétomotrices auxiliaires pour assurer un haut degré d'uniformité le long de l'éprouvette.

6.5 Mesure de l'induction magnétique

Connecter la première bobine de détection de flux (bobine B) à un intégrateur de flux. L'étalonnage de cet intégrateur de flux doit être conforme au point a) du paragraphe 6.4, sauf que la bobine H est remplacée par la bobine B.

Il est nécessaire de corriger l'induction calculée pour tenir compte du flux dans l'air, cette correction étant faite selon la formule 8.

6.6 Mesure de l'uniformité de l'induction magnétique dans l'éprouvette

Connecter la deuxième bobine détectrice de flux en trois parties à un intégrateur de flux non étalonné de haute sensibilité. Le courant d'aimantation dans les sections extrêmes du bobinage d'aimantation doit être ajusté à chaque point de mesure jusqu'à ce qu'il y ait une déviation nulle de l'intégrateur de flux quand le courant d'aimantation dans les parties extrêmes et centrale du bobinage est inversé simultanément.

If the magnetic field strength is to be measured by means of search coils and a flux integrator, then a third coil system is required usually comprising two search coils connected in series addition wound on non-magnetic non-conducting formers (e.g. glass) and mounted one coil on each of two opposite sides of the test specimen with the axis parallel to that of the specimen. The effective area turns product of the search coil shall be determined with an uncertainty of $\pm 0.5\%$ by one of the following methods:

- a) calculation from the number of turns and the measured mean dimensions of the winding;
- b) comparison with a standard search coil using the method given in Appendix A;
- c) the search coil can be submitted to a mutually approved standards laboratory for calibration.

Note - The number of turns on the search coils will depend upon the sensitivity of the flux integrators used and also upon the range of magnetic flux density and field strength to be measured.

6.4 *Measurement of magnetic field strength*

The magnetic field strength shall be measured by one of the following methods:

- a) a search coil (as described above) connected to a flux integrator (ballistic galvanometer, fluxmeter or electronic charge integrator) which shall be calibrated in accordance with one of the methods given in Appendix A;
- b) a Hall effect device or other passive means of directly sensing a magnetic field. At magnetic field strengths below 150 kA/m these devices may be calibrated either in a suitable long solenoid of known field to current ratio or against a proton resonance magnetometer. For field strengths above 150 kA/m these devices may be calibrated against a nuclear magnetic resonance (NMR) probe;
- c) by calculation from the magnetizing current and the number of turns per metre in the centre magnetizing winding after the application of auxiliary magnetomotive forces to provide a high degree of uniformity along the test length.

6.5 *Measurement of magnetic flux density*

The first flux sensing search coil (B coil) shall be connected to a flux integrator. The calibration of the flux integrator shall be established by the method given in Item a) of Sub-clause 6.4 except that the H coil is replaced by the B coil.

A correction shall be applied for the air flux included in the secondary winding in accordance with equation 8.

6.6 *Measurement of the uniformity of the magnetic flux in the test specimen*

The second three-part flux-sensing coil shall be connected to an uncalibrated high sensitivity flux integrator. The magnetizing current in the end-sections of the magnetizing winding shall be adjusted at each point of measurement until there is zero deflection on this flux integrator when the magnetizing current in both the end and centre windings are reversed simultaneously.

6.7 Connexion des appareils

Les appareils sont connectés comme indiqué à la figure 5, page 55.

Connecter une source de courant continu (batterie ou source de courant continu stabilisé) à travers l'ampèremètre A, l'inverseur S_1 et le commutateur S_4 à la bobine d'aimantation centrale N_1 . Avec l'interrupteur S_5 fermé, le courant du circuit d'aimantation est réglé à l'aide de la résistance R_1 . C'est le dispositif du circuit d'aimantation pour la détermination de la courbe d'aimantation normale et pour la détermination des extrémités du cycle d'hystérésis. L'interrupteur S_5 ainsi que la résistance R_5 sont utilisés pour la détermination du cycle d'hystérésis complet.

Réaliser la compensation pour les fuites de flux près de l'interface éprouvette-culasse par le passage d'un courant déterminé par la résistance R_2 à travers les bobines extrêmes du bobinage d'aimantation N_2 . Ce courant peut être inversé par l'inverseur S_2 . L'inverseur S_6 ainsi que la résistance R_6 sont employés pour la détermination du cycle d'hystérésis complet.

Le circuit secondaire comprend la bobine de mesure N_3 (bobine B) enroulée autour de l'éprouvette et connectée à travers la résistance R_3 , le commutateur S_3 à l'intégrateur de flux F_2 . La résistance R_3 est prévue pour régler la sensibilité de l'intégrateur et la résistance R_7 est un shunt nécessaire avec certains types d'intégrateurs (galvanomètres balistiques).

De la même façon, connecter la paire de bobines H (N_4) à travers la résistance R_4 et le commutateur S_3 à l'intégrateur de flux F_2 ; un étalonnage séparé est établi conformément au paragraphe 6.4 pour la mesure du champ magnétique. Les bobines H peuvent aussi être connectées à un intégrateur de flux séparé pour permettre des mesures simultanées de B et H .

Connecter la bobine de détermination de l'uniformité du flux N_5 en trois parties à l'intégrateur de flux à haute sensibilité F_1 .

6.8 Détermination de la courbe d'aimantation normale

Désaimanter l'éprouvette conformément au paragraphe 4.4.

Avec l'inverseur S_1 fermé et les commutateurs S_3 et S_4 fermés en position 1, l'intégrateur de flux est étalonné conformément à l'annexe A si le champ magnétique est mesuré à l'aide d'une bobine de mesure. La procédure est répétée avec le commutateur S_3 fermé en position 2 pour l'étalonnage en termes d'induction magnétique.

Le commutateur S_4 est alors fermé en position 2 et un petit courant est établi à travers la bobine centrale d'aimantation N_1 . Les interrupteurs S_5 et S_6 sont fermés et la résistance R_2 est réglée à sa valeur maximale. Les inverseurs S_1 et S_2 sont inversés simultanément et R_2 est réglée jusqu'à ce qu'il n'y ait aucune déviation de l'intégrateur de flux F_1 . Le courant d'aimantation est ensuite inversé environ 10 fois par l'action simultanée des inverseurs S_1 et S_2 pour maintenir le matériau dans un état cyclique régulier. Avec le commutateur S_3 d'abord en position 1 puis en position 2, l'intensité du champ magnétique et l'induction magnétique sont mesurées par l'intégrateur de flux F_2 pendant deux inversions successives du courant d'aimantation. Par ailleurs, le champ magnétique est mesuré selon la méthode donnée aux points b) ou c) du paragraphe 6.4.

En augmentant successivement le courant d'aimantation et en répétant cette procédure, les valeurs correspondantes du champ magnétique et de l'induction magnétique peuvent être obtenues, et à partir desquelles une courbe d'aimantation normale peut être tracée.

Note. - Le courant d'aimantation ne devrait jamais décroître pendant les mesures sinon l'éprouvette doit être désaimantée avant de reprendre les mesures.

6.7 Connection of apparatus

The apparatus is connected as shown in Figure 5, page 55.

A source of direct current (battery or stabilized d.c. supply) is connected through ammeter A, reversing switch S_1 and changeover switch S_4 to the centre magnetizing winding N_1 . With switch S_5 closed, the current in the magnetizing circuit is controlled by resistor R_1 . This is the arrangement of the magnetizing circuit for the determination of the normal magnetization curve and for the measurement of the tip points of hysteresis loops. Switch S_5 together with resistor R_5 are used in the determination of the complete hysteresis loop.

Compensation for the flux leakage near the specimen/yoke interface is achieved by passing a current determined by resistor R_2 through the end coils of the magnetizing winding N_2 . This current may be reversed by switch S_2 . Switch S_6 together with resistor R_6 is used in the determination of the complete hysteresis loop.

The secondary circuit comprises the search coil N_3 (B coil) wound around the test specimen and connected via a resistor R_3 , and changeover switch S_3 to the flux integrator F_2 . Resistor R_3 is to adjust the sensitivity of the integrator and resistor R_7 is a shunt required with some types of integrator (ballistic galvanometers).

Similarly the pair of H coils (N_4) are connected through resistor R_4 and changeover switch S_3 to the flux integrator F_2 and a separate calibration is established in accordance with Sub-clause 6.4 for the measurement of magnetic field strength. Alternatively the H coils could be connected to a separate flux integrator to enable the simultaneous measurement of B and H .

The three-part flux uniformity sensing coil N_5 is connected to the high sensitivity flux integrator F_1 .

6.8 Determination of the normal magnetization curve

The test specimen shall be demagnetized in accordance with Sub-clause 4.4

With switch S_1 closed, changeover switches S_3 and S_4 closed in position 1, the flux integrator shall be calibrated in accordance with Appendix A if the magnetic field strength is measured by means of a search coil. The procedure is repeated with changeover switch S_3 closed in position 2 for the calibration in terms of magnetic flux density.

Changeover switch S_4 is now closed in position 2 and a small current is passed through the centre magnetizing winding N_1 . Switches S_5 and S_6 are closed and resistor R_2 is adjusted to its maximum value. Switches S_1 and S_2 are reversed simultaneously and R_2 adjusted until there is zero deflection on flux integrator F_1 . The magnetizing current is then reversed about 10 times by operating switches S_1 and S_2 simultaneously to bring the material into a steady cyclic state. With changeover switch S_3 firstly in position 1 then position 2 the magnetic field strength and flux density are measured by flux integrator F_2 during successive reversals of the magnetizing current. Alternatively the magnetic field strength is measured by the method given in Item *b*) or *c*) of Sub-clause 6.4.

By successively increasing the magnetizing current and repeating this procedure, corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density may be obtained from which a normal magnetization curve may be plotted.

Note. - The magnetizing current should never be decreased during the measurement otherwise the test specimen must be demagnetized before resuming measurements.

6.9 Détermination du cycle d'hystérésis complet

Désaimanter l'éprouvette conformément au paragraphe 4.4 et déterminer les extrémités du cycle d'hystérésis par mesure des valeurs correspondantes du champ magnétique et de l'induction conformément au paragraphe 6.8.

Déterminer ensuite la portion PQ du cycle d'hystérésis (voir figure 2, page 52) conformément au paragraphe 4.5, sauf que pour chaque point de la courbe, l'uniformité du flux doit être vérifiée et maintenue en réglant la résistance R_6 avec l'interrupteur S_6 ouvert. Les inverseurs S_1 et S_2 sont simultanément ouverts à partir de la position 1 pour mesurer les valeurs du champ magnétique et de l'induction magnétique.

Pour l'établissement du cycle d'hystérésis complet, la séquence des commutations doit être conforme à la procédure définie au tableau III pour maintenir l'éprouvette dans un état cyclique régulier.

TABLEAU III

Séquence des commutations nécessaires au maintien de l'éprouvette dans un état cyclique régulier

	Circuit principal		Circuit de compensation		Lieu
	Inverseur S_1	Interrupteur S_5	Inverseur S_2	Interrupteur S_6	
1 ^{er} temps	Fermé (1)	Fermé	Fermé (1)	Fermé	P
2 ^e temps	Fermé (1)	Ouvert	Fermé (1)	Ouvert	P'
3 ^e temps	Fermé (2)	Ouvert	Fermé (2)	Ouvert	Q'
4 ^e temps	Fermé (2)	Fermé	Fermé (2)	Fermé	S
5 ^e temps	Fermé (2)	Ouvert	Fermé (2)	Ouvert	S'
6 ^e temps	Fermé (1)	Ouvert	Fermé (1)	Ouvert	T'
7 ^e temps	Fermé (1)	Fermé	Fermé (1)	Fermé	P

Les résistances R_1 et R_2 sont réglées pour avoir les valeurs du champ magnétique $+H$, ou $-H$, c'est-à-dire les points P ou S.

Les résistances R_5 et R_6 sont réglées pour avoir les valeurs du champ magnétique $+H'$ ou $-H'$, c'est-à-dire les points P' et T' ou les points Q' et S'.

Il est souhaitable de faire des mesures sur le cycle d'hystérésis complet, ce qui permet d'éliminer les erreurs de dérive (fluxmètre et intégrateur). Cependant comme la partie STUP du cycle est symétrique de la partie PQRS, les mesures peuvent éventuellement n'être faites que sur la moitié du cycle d'hystérésis.

6.10 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif

L'induction rémanente et le champ coercitif doivent être déterminés respectivement selon les paragraphes 4.6 et 4.7.

6.9 Determination of the complete hysteresis loop

The test specimen shall be demagnetized in accordance with Sub-clause 4.4 and the tip points of the hysteresis loop shall be determined by measuring the corresponding values of magnetic field strength and flux density in accordance with Sub-clause 6.8.

Portion PQ of the hysteresis loop (see Figure 2, page 52) shall then be determined in accordance with Sub-clause 4.5 except that at each point on the curve the flux uniformity shall be checked and maintained by adjusting resistor R_6 with switch S_6 open. Switches S_1 and S_2 are opened from position 1 simultaneously to measure the values of magnetic field strength and flux density.

To obtain the complete hysteresis loop, the switching sequence shall be in accordance with the arrangement given in Table III to maintain the test specimen in a steady cyclic state.

TABLE III

Switching sequence to maintain the test specimen in a steady cyclic state

	Main circuit		Compensating circuit		Point on loop
	Switch S_1	Switch S_5	Switch S_2	Switch S_6	
1	Closed (1)	Closed	Closed (1)	Closed	P
2	Closed (1)	Open	Closed (1)	Open	P'
3	Closed (2)	Open	Closed (2)	Open	Q'
4	Closed (2)	Closed	Closed (2)	Closed	S
5	Closed (2)	Open	Closed (2)	Open	S'
6	Closed (1)	Open	Closed (1)	Open	T'
7	Closed (1)	Closed	Closed (1)	Closed	P

Resistors R_1 and R_2 are adjusted to obtain values of magnetic field strength $+H$, or $-H$, that is point P or point S.

Resistors R_5 and R_6 are adjusted to obtain values of magnetic field strength $+H'$ or $-H'$, that is points P' and T' or points Q' and S'.

It is desirable to make measurements on the complete hysteresis loop, to eliminate drift errors (fluxmeter and integrator). However, as the portion STUP of the hysteresis loop is symmetrical with the portion PQRS, measurements may eventually be made for only half of the hysteresis loop.

6.10 Determination of remanent flux density and coercive field strength

The remanent flux density and coercive field strength shall be determined in accordance with Sub-clauses 4.6 and 4.7 respectively.

7. Perméamètre Iliovici

7.1 Principe du perméamètre

Le principe de l'appareil est illustré à la figure 7, page 56. L'éprouvette est placée dans un enroulement d'aimantation b et bloquée entre deux culasses en tôles d'acier. L'une des culasses d_1 comporte un deuxième enroulement d'aimantation b_1 , c'est elle qui assure le retour du flux magnétique passant dans l'éprouvette.

Un «voltmètre magnétique» constitué d'un enroulement b_2 sur la culasse d_2 et relié à un intégrateur de flux magnétique est utilisé pour détecter une compensation correcte. La différence de potentiel magnétique est nulle lorsque, en inversant simultanément les courants dans les bobines b et b_1 , l'intégrateur de flux ne dévie pas. Dans ces conditions, la bobine b contribue au passage du flux magnétique dans l'éprouvette. La bobine b_1 , pour sa part, contribue à faire passer le flux dans la culasse d_1 et dans l'interface éprouvette culasse.

7.2 Eprouvette

L'éprouvette est constituée par un barreau de longueur égale ou supérieure à 200 mm et de section carrée de 10 mm × 10 mm (tolérance de ±0,1 mm).

La préparation de l'éprouvette et la mesure de ses dimensions doivent être effectuées conformément au paragraphe 6.2.

7.3 Bobine de mesure

Une bobine de mesure en fil fin enroulé sur un support autour de l'éprouvette est reliée à un intégrateur de flux pour la mesure de l'induction magnétique.

La bobine de mesure comprend 100 spires, avec possibilité d'utilisation de 25 spires pour permettre le réglage de sensibilité.

7.4 Mesure de l'intensité de champ magnétique

Lorsque la compensation est correcte, l'intensité de champ magnétique est calculée à partir du nombre de spires par mètre (N/L) de l'enroulement d'aimantation b , vis-à-vis de l'éprouvette seule.

La valeur du champ magnétique est donnée par la relation suivante:

$$H = \frac{NI}{L} \quad (6)$$

où:

H = intensité de champ magnétique, en ampères par mètre

N = nombre de spires d'aimantation

I = courant d'aimantation, en ampères

L = distance entre pôles des culasses, en mètres

N/L = est une constante propre de l'appareil

Note. - Les ampèremètres sont en général gradués en champ magnétique.

7.5 Mesure de l'induction magnétique

La partie appropriée de la bobine de mesure b_3 (25 spires ou 100 spires selon la sensibilité requise) doit être reliée à un intégrateur de flux étalonné.

Le courant d'aimantation doit être inversé et la modification du flux magnétique est notée. L'induction magnétique est calculée selon la relation:

$$B = \frac{\Delta\phi}{2 N' A} \quad (7)$$

7. The Illovici permeameter

7.1 Principle of the permeameter

The principle of the instrument is illustrated in Figure 7, page 56. The test specimen is placed inside a magnetizing winding b and is clamped between two massive steel laminated yokes. One yoke d_1 carries a second magnetizing winding b_1 , it is this which provides the return path for the magnetic flux passing through the test specimen.

A "magnetic potentiometer" made up of winding b_2 on yoke d_2 and connected to a magnetic flux integrator is used to detect the correct compensation. The difference in magnetic potential is zero when, on simultaneously reversing the currents in coils b and b_1 , there is no deflection on the magnetic flux integrator. Under these conditions winding b contributes to the flow of flux in the test specimen. Winding b_1 , in turn, contributes to the flow of flux in the yoke d_1 and in the interface between the yoke and the test specimen.

7.2 Test specimen

The test specimen consists of a bar of length equal to or greater than 200 mm, having a square cross-section 10 mm × 10 mm (tolerance ±0.1 mm).

The test specimen shall be prepared and its dimensions determined in accordance with Sub-clause 6.2.

7.3 Search coil

A search coil of fine wire wound on a former around the test specimen is connected to a magnetic flux integrator for the measurement of the magnetic flux density.

The search coil comprises 100 turns, tapped at 25 turns to allow for sensitivity adjustment.

7.4 Measurement of magnetic field strength

When the compensation is correct, the magnetic field strength shall be calculated from the number of turns per metre (N/L) of the magnetizing winding b , with respect to the test specimen alone.

The value of the magnetic field strength is given by the following relationship:

$$H = \frac{NI}{L} \quad (6)$$

where:

H = magnetic field strength, in amperes per metre

N = number of magnetizing turns

I = magnetizing current, in amperes

L = distance between the pole faces, in metres

N/L = is a constant of the apparatus

Note. - The ammeters are normally graduated in magnetic field strength.

7.5 Measurement of magnetic flux density

The appropriate part of search coil b_3 (25 turns or 100 turns depending on the sensitivity required) shall be connected to a calibrated magnetic flux integrator.

The magnetizing current shall be reversed and the magnetic flux change recorded. The magnetic flux density shall be calculated from the following relationship:

$$B = \frac{\Delta\phi}{2 N' A} \quad (7)$$

où:

B = induction magnétique, en teslas

$\Delta\varphi$ = variation du flux magnétique, en webers

N' = nombre de spires de la bobine de mesure b_3

A = aire de la section de l'éprouvette, en mètres carrés

Selon le niveau de l'intensité de champ magnétique et des surfaces relatives des sections de l'éprouvette et de la bobine de mesure, il peut être nécessaire d'effectuer une correction de l'induction pour le flux passant dans l'air autour de l'éprouvette et dans la bobine d'essai.

La valeur corrigée de l'induction magnétique est donnée par la relation suivante:

$$B_{\text{corrigé}} = B - \mu_0 H \frac{A' - A}{A} \quad (8)$$

où:

B = valeur mesurée de l'induction magnétique, en teslas

μ_0 = constante magnétique ($= 4 \pi 10^{-7}$ henry par mètre)

H = intensité de champ magnétique, en ampères par mètre

A' = aire de la section de la bobine d'essai, en mètres carrés (constante propre de l'appareil)

A = aire de la section de l'éprouvette, en mètres carrés

7.6 Connexion des appareils

Les appareils sont connectés comme indiqué à la figure 8, page 57.

Une source de courant continu (batterie ou alimentation stabilisée de courant continu) est reliée à l'enroulement d'aimantation b à travers l'ampèremètre A_1 et l'inverseur S_1 . Avec l'interrupteur S_5 fermé, le courant dans l'enroulement d'aimantation est contrôlé par le rhéostat RH_1 . C'est le dispositif du circuit d'aimantation pour la détermination des extrémités du cycle d'hystérésis. Après ouverture de l'interrupteur S_5 , l'inverseur S_1 et le rhéostat RH_2 sont employés pour la détermination de la courbe d'aimantation normale ou du cycle d'hystérésis complet.

La compensation magnétique (retour du flux magnétique à travers la culasse) est réalisée en faisant circuler un courant, déterminé par le rhéostat RC_1 dans l'enroulement b_1 enroulé sur la culasse d_1 . Ce courant peut être inversé par l'inverseur S_2 . L'interrupteur S_6 et le rhéostat RC_2 sont employés pour la détermination du cycle d'hystérésis complet ou pour le tracé de la courbe d'aimantation normale (S_6 ouvert).

Le circuit secondaire comprend une bobine de mesure b_3 reliée à un intégrateur de flux étalonné par l'intermédiaire du commutateur S_3 . La bobine b_2 du «voltmètre magnétique» enroulée autour de la culasse d_2 est également reliée à l'intégrateur de flux par l'intermédiaire du commutateur S_3 .

7.7 Détermination de la courbe d'aimantation normale

L'éprouvette est placée dans le perméamètre puis désaimantée conformément au paragraphe 4.4.

L'intégrateur doit être étalonné selon l'une des méthodes données à l'annexe A.

Avec les inverseurs S_1 et S_2 fermés en position 1 et les interrupteurs S_5 et S_6 ouverts, le courant est lentement augmenté par diminution de la résistance du rhéostat RH_2 , pour obtenir une déviation mesurable à l'ampèremètre A_1 (enroulement b).

Le commutateur S_3 doit être manœuvré pour relier une partie ou l'ensemble de l'enroulement b_2 du «voltmètre magnétique» à l'intégrateur de flux. Les inverseurs S_1 et S_2 sont simultanément inversés, le rhéostat RC_2 est réglé pour faire varier le courant de compensation circulant dans l'enroulement b_1 . Cette opération est répétée jusqu'à ce que l'intégrateur de flux

where:

- B = magnetic flux density, in teslas
 $\Delta\phi$ = magnetic flux change, in webers
 N' = number of turns of search coil b_3
 A = cross-sectional area of the test specimen, in square metres

Depending on the level of the magnetic field strength and the relative cross-sectional areas of the test specimen and search coil, it may be necessary to make a correction to the magnetic flux density for the air flux enclosed by the search coil.

The corrected value of the magnetic flux density is given by the following relationship:

$$B_{\text{corrected}} = B - \mu_0 H \frac{A' - A}{A} \quad (8)$$

where:

- B = measured value of magnetic flux density, in teslas
 μ_0 = magnetic constant ($= 4\pi \cdot 10^{-7}$ henry per metre)
 H = magnetic field strength, in amperes per metre
 A' = cross-sectional area of search coil, in square metres (a constant of the apparatus)
 A = cross-sectional area of test specimen, in square metres

7.6 Connection of apparatus

The apparatus is connected as shown in Figure 8, page 57.

A source of direct current (battery or stabilized d.c. supply) is connected through ammeter A_1 and reversing switch S_1 to the magnetizing winding b . With switch S_5 closed, the current in the magnetizing winding is controlled by resistor RH_1 . This is the arrangement of the magnetizing circuit for the determination of the tip points of the hysteresis loops. After opening switch S_5 , switch S_1 together with resistor RH_2 are used in the determination of the normal magnetization curve and the complete hysteresis loop.

The magnetic compensation (return of the magnetic flux through the yoke) is achieved by passing a current, determined by resistor RC_1 , through winding b_1 wound on yoke d_1 . This current may be reversed by switch S_2 . Switch S_6 together with resistor RC_2 are used in the determination of the complete hysteresis loop, or for the normal magnetization curve (S_6 open).

The secondary circuit comprises a search coil b_3 connected to a calibrated magnetic flux integrator via selector changeover switch S_3 . The winding b_2 of the "magnetic potentiometer" wound on yoke d_2 is also connected to flux integrator via selector changeover switch S_3 .

7.7 Determination of the normal magnetization curve

The test specimen is assembled into the permeameter and then demagnetized in accordance with Sub-clause 4.4.

The flux integrator shall be calibrated in accordance with one of the methods in Appendix A.

With switches S_1 and S_2 closed in position 1 and switches S_5 and S_6 open, the supply shall be slowly increased by the reduction of the resistance of rheostat RH_2 , to obtain a measurable reading on ammeter A_1 (winding b).

Selector switch S_3 shall be operated to connect all or part of the "magnetic potentiometer", b_2 , to the flux integrator. Switches S_1 and S_2 shall be reversed simultaneously and resistor RC_2 adjusted, to vary the compensating current flowing in winding b_1 . The process is repeated until the flux integrator indicates zero. Selector switch S_3 shall then be operated to connect the

indique aucune déviation. Le commutateur S_3 est ensuite manœuvré pour relier la partie appropriée de la bobine de mesure à l'intégrateur de flux. Avec les inverseurs S_1 et S_2 fermés en position 1, la valeur du champ magnétique (ou courant d'aimantation) est déterminée à l'aide de l'ampèremètre A_1 . Les inverseurs S_1 et S_2 sont ensuite inversés et la variation du flux magnétique est notée. La valeur de l'induction magnétique est ensuite calculée conformément au paragraphe 7.5. Plusieurs cycles doivent être réalisés avant chaque mesure.

En augmentant successivement le courant d'aimantation et en répétant cette procédure, des valeurs correspondantes de l'intensité de champ magnétique et de l'induction magnétique sont obtenues et à partir desquelles une courbe d'aimantation normale est tracée.

7.8 Détermination du cycle d'hystérésis complet

L'éprouvette est placée dans le perméamètre puis désaimantée conformément au paragraphe 4.4.

Les extrémités du cycle d'hystérésis doivent être déterminées en mesurant les valeurs correspondantes de l'intensité de champ magnétique et de l'induction magnétique conformément au paragraphe 7.7. Les rhéostats RH_1 et RC_1 ne doivent pas être modifiés durant la détermination subséquente du cycle d'hystérésis complet.

Les points intermédiaires du cycle d'hystérésis doivent être déterminés en réglant le rhéostat RH_2 et en suivant la séquence des opérations données au paragraphe 6.9. Le courant de compensation est à régler à chaque point en fermant ou en ouvrant simultanément les interrupteurs S_5 et S_6 et en variant la résistance du rhéostat RC_2 jusqu'à ce qu'aucune déviation ne soit observée sur l'intégrateur de flux lorsque celui-ci est relié à la partie appropriée de l'enroulement b_1 .

La valeur du champ magnétique (ou le courant d'aimantation) doit être déterminée à l'aide de l'ampèremètre A_2 pour tous les points intermédiaires. Plusieurs cycles doivent être réalisés avant chaque mesure.

La variation de l'induction magnétique, produite par une ouverture ou une fermeture simultanée des interrupteurs S_5 et S_6 , selon le cas, est donnée par la relation suivante:

$$\Delta B = \frac{\Delta \phi}{N'A} \quad (9)$$

où:

ΔB = variation de l'induction magnétique, en teslas

$\Delta \phi$ = variation du flux magnétique, en webers

N' = nombre de spires de la bobine de mesure

A = aire de la section de l'éprouvette, en mètres carrés

Un cycle d'hystérésis complet est tracé à partir des valeurs correspondantes de l'intensité de champ magnétique et de l'induction magnétique.

8. Perméamètre MH*

8.1 Principe du perméamètre

Ce perméamètre est décrit à la figure 9, page 57. L'éprouvette est maintenue entre deux culasses massives en acier en forme de U qui forment un circuit fermé de flux pour l'éprouvette. Les culasses sont constituées par un empilement de tôles d'acier au silicium pour transformateur et ont une section de 40 mm × 50 mm. La longueur hors tout de la culasse est de 280 mm.

* «The NBS MH Permeameter», *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Research Paper RP 2109, volume 45, juillet 1950. MH signifie Medium H (champ moyen).

appropriate part of the search coil to the flux integrator. With switches S_1 and S_2 closed in position 1 the magnetic field strength (or magnetizing current) shall be measured by ammeter A_1 . Switches S_1 and S_2 shall then be reversed and the magnetic flux change recorded. The value of magnetic flux density shall then be calculated in accordance with Sub-clause 7.5. Several cycles shall be carried out before each measurement.

By successively increasing the magnetizing current and repeating this procedure, corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density shall be obtained from which a normal magnetization curve shall be plotted.

7.8 *Determination of the complete hysteresis loop*

The test specimen is assembled into the permeameter and then demagnetized in accordance with Sub-clause 4.4.

The tip points of the hysteresis loop shall be determined by measuring the corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density in accordance with Sub-clause 7.7. Rheostats RH_1 and RC_1 shall not be altered during the subsequent determination of the complete hysteresis loop.

The intermediate points on the hysteresis loop shall be determined by adjusting rheostat RH_2 and following the switching sequence given in Sub-clause 6.9. The compensating current shall be adjusted at each point by closing or opening switches S_5 and S_6 simultaneously and varying rheostat RC_2 until zero deflection is observed on the flux integrator when connected to the appropriate part of winding b_1 .

The magnetic field strength (or magnetizing current) shall be measured using ammeter A_2 for all the intermediate points. Several cycles shall be carried out before each measurement.

The change in magnetic flux density produced by simultaneously opening or closing switches S_5 and S_6 , as appropriate, is given by:

$$\Delta B = \frac{\Delta \phi}{N'A} \quad (9)$$

where:

ΔB = change in magnetic flux density, in teslas

$\Delta \phi$ = change in magnetic flux, in webers

N' = number of turns on search coil

A = cross-sectional area of test specimen, in square metres

From corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density a complete hysteresis loop shall be plotted.

8. **The MH permeameter***

8.1 *Principle of the permeameter*

The instrument is illustrated in Figure 9, page 57. The test specimen is clamped between two massive U-shaped steel yokes which produce a flux closure path for the specimen. The yokes are made up of a stack of silicon steel transformer sheets and have a cross-section of 40 mm × 50 mm. The overall length of the yoke is 280 mm.

* "The NBS MH Permeameter", *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Research Paper RP 2109, Volume 45, July 1950. MH signifies Medium H (medium field).

L'aimantation de l'éprouvette est obtenue à l'aide d'un enroulement formant une bobine entourant l'éprouvette. Cette bobine principale d'aimantation a une longueur de 138 mm et est obtenue par enroulement sur une forme en matériau isolant ayant un diamètre intérieur de 70 mm. Elle comprend 1540 spires de fil isolé de 1 mm de diamètre, enroulé uniformément en douze couches. Cette bobine principale d'aimantation est complétée de quatre bobines auxiliaires disposées aux extrémités des culasses. Ces quatre bobines compensatrices ont 58 mm de long et comprennent chacune 430 spires de fil isolé de 1 mm de diamètre, enroulé en huit couches. L'avantage de ces bobines auxiliaires est de créer ainsi une distribution longitudinale uniforme de flux dans l'éprouvette. Ces bobines auxiliaires sont reliées en série à la bobine centrale d'aimantation.

8.2 Eprouvette

L'éprouvette est constituée par une barre d'au moins 280 mm de long et de section maximale égale à 30 mm × 10 mm. Des éprouvettes d'au moins 240 mm de long peuvent également être utilisées si nécessaire.

L'aire de la section de l'éprouvette est normalement déterminée à partir de la masse, de la longueur et de la masse volumique selon la formule:

$$A = \frac{m}{l \rho} \quad (10)$$

où:

A = section de l'éprouvette, en mètres carrés

m = masse de l'éprouvette, en kilogrammes

l = longueur de l'éprouvette, en mètres

ρ = masse volumique, en kilogrammes par mètre cube

L'aire peut également être déterminée selon la procédure décrite au paragraphe 6.2.

8.3 Bobines de mesure

Les bobines de mesure sont disposées sur un dispositif maintenu à l'intérieur de la bobine principale d'aimantation par des bagues en matériau isolant et constitue une tablette diamétrale sur laquelle repose l'éprouvette.

8.4 Mesure du champ magnétique

L'intensité linéique du champ magnétique est déterminée à l'aide d'un ensemble de deux bobines superposées (H) et disposées sur un plateau tournant permettant une rotation de 180° de l'ensemble. La bobine supérieure se trouve contre l'éprouvette. Chaque bobine a approximativement 29 mm de long, 44,4 mm de large et 11,1 mm d'épaisseur. Les axes des deux bobines parallèles à l'éprouvette sont distants de 11,1 mm et l'axe de la bobine supérieure se trouve à 8,7 mm de la surface de l'éprouvette. Ces bobines sont constituées en fil isolé de 0,16 mm de diamètre enroulé sur des formes en matériau isolant. La bobine supérieure a une surface utile d'environ 0,825 m²-tours. La grandeur «surface × nombre de spires» de la bobine inférieure est légèrement supérieure. Elle est shuntée avec une résistance afin que sa surface soit égale à celle de la bobine supérieure.

Ces deux bobines tournantes sont situées dans la partie médiane de l'éprouvette. Lorsqu'elles sont connectées opposées et en série et qu'elles sont tournées de 180° la déviation du galvanomètre est proportionnelle au gradient du champ. De plus, l'identité des valeurs observées du champ magnétisant pour les deux directions constitue un bon critère d'appréciation de la démagnétisation.

The specimen is magnetized by means of a winding forming a coil around the test specimen. This main magnetizing coil has a length of 138 mm, and is obtained by winding on a former of insulating material having an inner diameter of 70 mm. It comprises 1540 turns of insulated 1 mm diameter wire uniformly wound in twelve layers. This main magnetizing winding is completed by four auxiliary coils arranged at the ends of the yokes. These four compensating coils are 58 mm in length and each comprises 430 turns of insulated wire of 1 mm diameter in eight layers. The purpose of these auxiliary coils is to produce a uniform longitudinal flux in the test specimen. These auxiliary coils are connected in series with the central magnetizing coil.

8.2 Test specimen

The test specimen consists of a bar at least 280 mm long having a maximum cross-section of 30 mm × 10 mm. Test specimens of at least 240 mm long may also be used if necessary.

The cross-sectional area of the test specimen is usually calculated from the mass, length and density using the equation:

$$A = \frac{m}{l \rho} \quad (10)$$

where:

A = cross-sectional area of test specimen, in square metres

m = mass of test specimen, in kilograms

l = length of test specimen, in metres

ρ = density, in kilograms per cubic metre

The area may also be determined in accordance with Sub-clause 6.2.

8.3 Search coils

The search coils are arranged on an assembly held within the main magnetizing coil by rings of insulating material forming a diametrical table on which the test specimen is placed.

8.4 Measurement of the magnetic field strength

The magnetic field strength is determined by means of an assembly of two superposed coils (H), arranged on a rotating table allowing the assembly to be rotated through 180°. The upper coil is adjacent to the test specimen. Each coil is approximately 29 mm long, 44.4 mm wide and of thickness 11.1 mm. The axes of the two coils are parallel to the test specimen spaced 11.1 mm apart and the axis of the upper coil is 8.7 mm from the surface of the test specimen. These coils are constructed of insulated wire of diameter 0.16 mm wound on formers of insulating material. The upper coil has an effective area of approximately 0.825 m²-turns. The lower coil has a slightly higher effective area turns product. It is shunted with a resistance so as to make its area equal to that of the upper coil.

These two rotating coils are situated in the middle region of the test specimen. When they are connected in series opposition and rotated through 180°, the galvanometer deflection is proportional to the field gradient. In addition, identity in the observed values of magnetic field strength of the two directions constitutes a good estimation of the demagnetization.

Si un étalonnage de l'intégrateur de flux (galvanomètre balistique, fluxmètre ou intégrateur de charge électronique) est nécessaire, celui-ci doit être effectué selon l'une des méthodes données à l'annexe A.

8.5 *Mesure de l'induction magnétique*

L'induction magnétique est déterminée à l'aide d'une bobine de mesure B enroulant l'éprouvette. Cette bobine de longueur identique à celle de la bobine H est constituée par 100 spires de fil isolé de 0,224 mm de diamètre, enroulé sur une forme en matériau isolant comprenant un passage suffisant pour l'éprouvette de 30 mm × 10 mm de section.

Une bobine auxiliaire de surface utile identique à la bobine B, placée en dessous de cette dernière, est connectée en opposition. Ainsi les variations du galvanomètre donnent une mesure directe de l'induction intrinsèque B_i . Cette disposition évite la nécessité d'établir la correction du flux dans l'air dans le cas d'emploi d'éprouvettes de sections différentes. L'étalonnage de l'intégrateur de flux doit être effectué de la même façon que pour la bobine H.

8.6 *Connexion des appareils*

Les appareils sont connectés selon la figure 5, page 55. Les seules modifications sont que, d'une part les bobines extrêmes du bobinage d'aimantation N_5 sont constituées par les bobines auxiliaires situées aux extrémités des culasses et que, d'autre part, la bobine N_5 est supprimée.

8.7 *Détermination de la courbe d'aimantation normale*

Cette détermination doit être effectuée selon les modalités définies au paragraphe 6.8.

8.8 *Détermination du cycle d'hystérésis complet*

Cette détermination doit être effectuée conformément au paragraphe 6.9.

8.9 *Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif*

L'induction rémanente et le champ coercitif doivent être déterminés selon les paragraphes 4.6 et 4.7, respectivement.

9. **Perméamètre de Sanford-Bennett pour champs élevés***

9.1 *Principe du perméamètre*

Ce perméamètre est décrit à la figure 10, page 58. L'éprouvette est tenue dans des pièces polaires situées entre deux culasses en forme de U qui forment ainsi un circuit fermé de flux pour l'éprouvette. Les culasses sont constituées par un empilement de tôles d'acier au silicium de 1,6 mm d'épaisseur et ont une section de 50 mm × 80 mm. Les dimensions hors tout de la culasse sont les suivantes: longueur 500 mm, largeur 400 mm.

Les pièces polaires ont une section de 80 mm × 100 mm et une longueur de 250 mm. Comme le montre la figure 11, page 58, chaque pièce polaire comporte une cannelure longitudinale de 40 mm de côté dans laquelle vient s'emboîter une clavette de 30 mm d'épaisseur.

* *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Research Paper RP 1242, volume 23, septembre 1939.

If a calibration of the flux integrator (ballistic galvanometer, fluxmeter or electronic charge integrator) is necessary, it shall be established in accordance with the methods given in Appendix A.

8.5 *Measurement of the magnetic flux density*

The magnetic flux density is determined by means of a B measuring coil wound around the test specimen. The length of this coil is identical to that of the H coil and it is constructed of 100 turns of insulated wire of diameter 0.224 mm wound on a former of insulating material with sufficient clearance for a test specimen of 30 mm × 10 mm section.

An auxiliary coil of effective area identical to the B coil, placed below the latter, is connected in opposition. In this way the galvanometer deflections give a direct measure of the intrinsic induction B_i . This arrangement overcomes the necessity to establish the air flux correction when using test specimens of different cross-sections. The calibration of the flux integrator shall be established in the same way as for the H coil.

8.6 *Connection of apparatus*

The apparatus is connected as shown in Figure 5, page 55. The only modifications are firstly that the end coils of the magnetizing winding N_2 are made up of the auxiliary coils situated at the ends of the yokes and secondly, coil N_5 is omitted.

8.7 *Determination of the normal magnetization curve*

The determination of the normal magnetization curve shall be carried out in accordance with the method described in Sub-clause 6.8.

8.8 *Determination of the complete hysteresis loop*

The determination of the complete hysteresis loop shall be made in accordance with Sub-clause 6.9.

8.9 *Determination of the remanent flux density and coercive field strength*

The remanent flux density and coercive field strength shall be determined in accordance with Sub-clauses 4.6 and 4.7 respectively.

9. **The Sanford-Bennett High H permeameter***

9.1 *Principle of the permeameter*

The permeameter is illustrated in Figure 10, page 58. The test specimen is held in pole pieces located between two U shaped yokes which form a flux closure circuit for the test specimen. The yokes are constructed of a stack of silicon steel laminations of thickness 1.6 mm and have a cross-section of 50 mm × 80 mm. The overall dimensions of the yokes are as follows: length 500 mm, width 400 mm.

The pole pieces have a cross-section of 80 mm × 100 mm and a length of 250 mm. As shown in Figure 11, page 58, each pole piece is made up of a longitudinal channel of side 40 mm in which is embedded a filler piece of thickness 30 mm. The test specimen is placed in the space

* *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Research Paper RP 1242, Volume 23, September 1939.

L'éprouvette est placée dans l'espace entre le fond de la cannelure et la face inférieure de la clavette. L'extrémité interne de la clavette comporte des échelles pour faciliter le centrage de l'éprouvette. L'écart entre les deux masses polaires est également réglable et peut atteindre 100 mm. Des échelles sont également prévues pour le réglage de cet écart.

L'aimantation de l'éprouvette est obtenue à l'aide de deux bobines principales d'aimantation placées sur les pièces polaires (une par pièce polaire) et de deux bobines auxiliaires situées sur les culasses (une par culasse).

Chaque bobine principale a une longueur de 150 mm avec un diamètre intérieur de 114 mm. Elle comprend 2 690 spires de fil isolé de 1,60 mm de diamètre enroulé uniformément en 30 couches.

Chaque bobine auxiliaire a une longueur de 380 mm. Elle comprend 1 600 spires de fil isolé de 1,60 mm de diamètre enroulé uniformément en sept couches.

Des précautions doivent être prises en ce qui concerne l'isolation et l'espacement des spires afin d'éviter une rupture de l'isolement, ce en raison des hautes tensions induites lors du renversement du courant d'aimantation. Comme précaution vis-à-vis de la formation d'arc aux commutateurs, l'appareil est shunté avec une résistance de 500 Ω .

9.2 *Eprouvette*

L'éprouvette est constituée par un barreau de section rectangulaire de dimensions maximales 38 mm $\times$ 19 mm et de longueur minimale de 25 mm.

L'aire de la section de l'éprouvette est normalement déterminée à partir de la masse, de la longueur et de la masse volumique selon la formule 10. Elle peut être également déterminée à partir de mesures de chaque dimension nécessaire comme cela est indiqué au paragraphe 8.2.

9.3 *Mesure du champ magnétique*

L'intensité linéique du champ magnétique est déterminée à l'aide d'un ensemble de deux bobines superposées (H) dont les axes sont parallèles à celui de l'éprouvette. Ces bobines sont placées sur un support vertical qui tourne de 180° par l'action d'un moteur. Le dispositif est orientable dans les trois directions par l'action de vis. Ces bobines ont 7 mm de long, une largeur hors tout de 11 mm et une épaisseur hors tout de 2,5 mm. Chaque bobine comprend 1 200 spires de fil de 0,05 mm de diamètre et la surface utile des spires de la bobine est de 0,014 m².

L'étalonnage de l'intégrateur de flux (galvanomètre balistique, fluxmètre ou intégrateur de charge électronique) doit être effectué conformément à l'annexe A.

9.4 *Mesure de l'induction magnétique*

L'induction magnétique est déterminée à l'aide de petites bobines individuelles B de 5 mm de long et comprenant 25 spires enroulées sur une forme de cuivre convenable à chaque type d'éprouvette. L'utilisation de telles petites bobines individuelles permet de réduire la correction du flux dans l'air. L'étalonnage doit être effectué de la même façon que pour la bobine H.

9.5 *Connexion des appareils*

Connecter les appareils conformément aux indications du paragraphe 8.6.

9.6 *Détermination de la courbe d'aimantation normale*

Cette détermination doit être effectuée selon les modalités définies au paragraphe 6.8.

between the bottom of the channel and the lower face of the filler. The inner ends of the filler carry scales to facilitate centring the test specimen. The distance between the two massive pole pieces is also adjustable up to 100 mm. Scales are also provided for the adjustment of this distance.

The magnetization of the test specimen is achieved by means of two main magnetizing coils mounted on the pole pieces (one on each pole piece) and two auxiliary coils located on the yokes (one on each yoke).

Each main coil has a length of 150 mm with an internal diameter of 114 mm. It is made up of 2 690 turns of insulated wire of diameter 1.60 mm wound uniformly in 30 layers.

Each auxiliary winding has a length of 380 mm. It is made up of 1 600 turns of insulated wire of diameter 1.60 mm wound uniformly in seven layers.

Precautions must be taken in relation to the insulation and spacing of the turns in order to avoid the breakdown of the insulation in view of the high induced voltages arising from the reversal of the magnetizing current. As a precaution against arcing of the switch contacts, the apparatus is shunted with a resistance of 500 Ω .

9.2 *Test specimen*

The test specimen is in the form of a bar of rectangular cross-section of maximum dimensions 38 mm $\times$ 19 mm and of minimum length 25 mm.

The cross-sectional area of the test specimen is normally determined from the mass, length and density in accordance with equation 10. It may also be determined from the measurement of each necessary dimension as indicated in Sub-clause 8.2.

9.3 *Measurement of the magnetic field strength*

The magnetic field strength is determined by means of an assembly of two superposed coils (H) having their axes parallel to that of the test specimen. These coils are mounted on a vertical support which is turned through 180° by a motor. The position is adjustable in three directions by means of screws. The coils have a length of 7 mm, an overall width of 11 mm and an overall thickness of 2.5 mm. Each coil is constructed of 1 200 turns of wire of diameter 0.05 mm and the effective area of the coil is 0.014 m² $\times$ turns.

The calibration of the flux integrator (ballistic galvanometer, fluxmeter or electronic charge integrator) shall be established in accordance with Appendix A.

9.4 *Measurement of the magnetic flux density*

The magnetic flux density is determined by means of individual small B coils of length 5 mm and made up of 25 turns wound on a brass former to fit each size of test specimen. The use of such individual small coils minimizes the air flux correction. The calibration shall be established in the same way as for the H coil.

9.5 *Connection of apparatus*

The apparatus shall be connected as indicated in Sub-clause 8.6.

9.6 *Determination of the normal magnetization curve*

The normal curve shall be determined in accordance with the method described in Sub-clause 6.8.

9.7 Détermination du cycle d'hystérésis complet

Cette détermination doit être effectuée conformément au paragraphe 6.9.

9.8 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif

L'induction rémanente et le champ coercitif doivent être déterminés selon les paragraphes 4.6 et 4.7, respectivement.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-4:1982

9.7 *Determination of the complete hysteresis loop*

The complete hysteresis loop shall be determined in accordance with Sub-clause 6.9.

9.8 *Determination of the remanent flux density and coercive field strength*

The remanent flux density and coercive field strength shall be determined in accordance with Sub-clauses 4.6 and 4.7 respectively.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-4:1982

ANNEXE A

MODES D'ÉTALONNAGE DE L'INTÉGRATEUR DE FLUX

Les deux modes suivants d'étalonnage de l'intégrateur de flux sont normalement employés:

- utilisation d'une inductance mutuelle de valeur connue;
- par décharge de condensateur étalon.

A1. Méthode de l'inductance mutuelle

L'inductance mutuelle de valeur connue est connectée à la place de l'éprouvette. L'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est connecté en série avec:

- la bobine B dans le cas de la mesure de l'induction magnétique;
- la bobine H dans le cas de la mesure du champ magnétique.

Pour étalonner, une valeur appropriée du courant est envoyée dans l'enroulement primaire de l'inductance mutuelle et l'indication de l'intégrateur du flux est notée.

Dans le cas de la mesure de l'induction magnétique, cette valeur correspond à la variation de l'induction magnétique selon la formule:

$$\Delta B = \frac{M \Delta I}{NA}$$

où:

- N = nombre de spires de la bobine d'essai connectée à l'intégrateur de flux
- M = inductance mutuelle, en henrys
- A = aire de la section moyenne de l'échantillon, en mètres carrés
- ΔI = variation du courant primaire, en ampères

Dans le cas de la mesure de l'intensité du champ magnétique, l'indication de l'intégrateur de flux correspond à la variation d'intensité du champ magnétique selon la formule:

$$\Delta H = \frac{M \Delta I}{\mu_0 NA_s}$$

où:

NA_s = surface $\times$ nombre de spires de la bobine H

Pour les mesure ultérieures de l'induction magnétique ou du champ magnétique, l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est court-circuité et la résistance en série avec l'intégrateur est ajustée en conséquence.

A2. Méthode par décharge de condensateur étalon

L'intégrateur de flux que l'on veut étalonner est connecté selon le circuit de la figure 12, page 59, comprenant:

- un potentiomètre ou voltmètre numérique de forte impédance d'entrée de grande précision PV;
- le condensateur étalon de valeur C ;
- résistance shunt de valeur S ;
- résistance de réglage de valeur r ;

APPENDIX A

METHODS OF CALIBRATING THE FLUX INTEGRATOR

The following two methods of calibrating the flux integrator are normally used:

- using a mutual inductor of known value;
- discharging a calibrated capacitor.

A1. Mutual inductance method

A mutual inductor of known value is connected in place of the test specimen. The secondary winding of the mutual inductor is connected in series with:

- the B coil in the case of measuring the magnetic flux density;
- the H coil in the case of measuring the magnetic field strength.

To calibrate, a suitable value of current is passed through the primary winding of the mutual inductor and the flux integrator reading is recorded.

In the case of the measurement of the magnetic flux density, this reading corresponds to the value of magnetic flux density given by the equation:

$$\Delta B = \frac{M \Delta I}{NA}$$

where:

- N = number of turns on the search coil connected to the flux integrator
- M = mutual inductance, in henrys
- A = mean cross-sectional area of the test specimen, in square metres
- ΔI = change in primary current, in amperes

In the case of the measurement of the magnetic field strength, the flux integrator reading corresponds to the change in magnetic field strength given by the equation:

$$\Delta H = \frac{M \Delta I}{\mu_0 NA_s}$$

where:

- NA_s = effective area turns product of H coil

For the subsequent measurement of the magnetic flux density or the magnetic field strength, the secondary winding of the mutual inductor shall be short-circuited and the resistance in series with the integrator adjusted accordingly.

A2. Capacitor discharge method

The flux integrator to be calibrated is connected in accordance with the circuit of Figure 12, page 59, comprising:

- a potentiometer or digital voltmeter having a high input impedance and high precision PV;
- calibrated capacitor of value C ;
- shunt resistor of value S ;
- control resistor of value r ;

- bobine de mesure de résistance R;
- clé inverseur à deux positions (a = charge; b = décharge);
- une pile E.

L'étalonnage de l'intégrateur de flux est effectué comme suit:

- 1) Mesure précise du potentiel V sous lequel est chargé le condensateur étalon C à l'aide d'un potentiomètre étalon ou d'un voltmètre de grande précision à haute impédance, la clé étant dans la position a.
- 2) La clé est basculée de a en b, ce qui provoque la décharge du condensateur. Une quantité d'électricité $Q = CV$ parcourt globalement le circuit. Seule une quantité

$$q = Q \frac{S}{R + r + S}$$

traverse l'intégrateur de flux, conduisant à une déviation α .

- 3) La sensibilité en coulombs est donnée par:

$$\sigma_q = \frac{q}{\alpha} = \frac{Q}{\alpha} \frac{S}{R + r + S}$$

- 4) Une variation de flux magnétique dans la bobine induit la circulation d'une charge:

$$\Delta q = \frac{\Delta \varphi}{\text{résistance du circuit}} = \frac{\Delta \varphi}{R + r + S}$$

Cette remarque permet d'en déduire la relation entre les sensibilités en flux magnétique et en coulombs

$$\sigma_\varphi = \sigma_q (R + r + S)$$

- 5) La sensibilité en flux magnétique

$$\sigma_\varphi = \frac{Q}{\alpha} \frac{S (R + r + S)}{(R + r + S)} = \frac{Q S}{\alpha} = \frac{C V S}{\alpha}$$

où:

C = capacité de précision, en farads
 V = potentiel de charge, en volts
 S = résistance mesurée, en ohms
 α = valeur de la déviation

- search coil of resistance R ;
- two position changeover switch (a = charge; b = discharge);
- battery E .

The calibration of the flux integrator is carried out as follows:

- 1) Measure the voltage V to which the calibrated capacitor C is charged by means of a calibrated potentiometer or high-precision high-impedance digital voltmeter, the switch being in position a .
- 2) The switch is changed to position b , which causes the capacitor to discharge. A quantity of electricity $Q = CV$ flows through the entire circuit. Only the quantity

$$q = Q \frac{S}{R + r + S}$$

flows through the flux integrator, producing a deflection α .

- 3) The coulomb sensitivity is given by:

$$\sigma_q = \frac{q}{\alpha} = \frac{Q}{\alpha} \frac{S}{R + r + S}$$

- 4) A variation of magnetic flux in the search coil causes the circulation of a charge:

$$\Delta q = \frac{\Delta \phi}{\text{resistance of circuit}} = \frac{\Delta \phi}{R + r + S}$$

From this statement the relationship between the magnetic flux sensitivity and the coulomb sensitivity may be deduced as:

$$\sigma_\phi = \sigma_q (R + r + S)$$

- 5) The magnetic flux sensitivity

$$\sigma_\phi = \frac{Q}{\alpha} \frac{S (R + r + S)}{(R + r + S)} = \frac{Q S}{\alpha} = \frac{C V S}{\alpha}$$

where:

C = capacitance, in farads
 V = charge potential, in volts
 S = shunt resistance, in ohms
 α = deflection