

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
404-2**

Troisième édition
Third edition
1996-03

Matériaux magnétiques –

Partie 2:

**Méthodes de mesure des propriétés
magnétiques des tôles et bandes magnétiques
au moyen d'un cadre Epstein**

Magnetic materials –

Part 2:

**Methods of measurement of the magnetic
properties of electrical steel sheet and strip
by means of an Epstein frame**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 404-2: 1996

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

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

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity 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 relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV 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 publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, 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 end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
404-2**

Troisième édition
Third edition
1996-03

Matériaux magnétiques –

**Partie 2:
Méthodes de mesure des propriétés
magnétiques des tôles et bandes magnétiques
au moyen d'un cadre Epstein**

Magnetic materials –

**Part 2:
Methods of measurement of the magnetic
properties of electrical steel sheet and strip
by means of an Epstein frame**

© CEI 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright – all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

R

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application et objet	6
2 Références normatives	6
3 Principes généraux des mesures en courant alternatif	8
3.1 Principe de la méthode du cadre Epstein de 25 cm	8
3.2 Eprouvette	8
3.3 Cadre Epstein de 25 cm	10
3.4 Compensation du flux dans l'air	12
3.5 Source d'alimentation	12
3.6 Mesurage de la tension	14
3.7 Mesurage de la fréquence	14
3.8 Mesurage de la puissance	14
4 Mode opératoire pour la mesure des pertes totales spécifiques	14
4.1 Préparation du mesurage	14
4.2 Réglage de la source d'alimentation	16
4.3 Mesurage de la puissance	18
4.4 Détermination des pertes totales spécifiques	18
4.5 Reproductibilité du mesurage des pertes totales spécifiques	18
5 Mode opératoire pour la détermination de la valeur crête de la polarisation magnétique, de la valeur efficace de l'intensité du champ magnétique, de la valeur crête de l'intensité du champ magnétique et de la puissance apparente spécifique	20
5.1 Eprouvette	20
5.2 Principe de la mesure	20
5.3 Reproductibilité	24
6 Principes généraux des mesures en courant continu	24
6.1 Principe de la méthode du cadre Epstein de 25 cm	24
6.2 Eprouvette	24
6.3 Cadre Epstein de 25 cm	24
6.4 Compensation du flux dans l'air	24
6.5 Source d'alimentation	26
6.6 Précision de l'appareillage	26
7 Mode opératoire pour la mesure de la polarisation magnétique en courant continu	26
7.1 Préparation du mesurage	26
7.2 Détermination de la polarisation magnétique	26
7.3 Détermination du cycle d'hystérésis magnétique	28
7.4 Reproductibilité du mesurage de la polarisation magnétique	28
8 Rapport d'essai	28
Figures	30

CONTENTS

	Page
FOREWORD.....	5
Clause	
1 Scope and object	7
2 Normative references	7
3 General principles of a.c. measurements	9
3.1 Principle of the 25 cm Epstein frame method	9
3.2 Test specimen.....	9
3.3 The 25 cm Epstein frame.....	11
3.4 Air flux compensation	13
3.5 Power supply	13
3.6 Voltage measurement.....	15
3.7 Frequency measurement	15
3.8 Power measurement.....	15
4 Procedure for the measurement of the specific total loss	15
4.1 Preparation for measurement	15
4.2 Adjustment of power supply.....	17
4.3 Measurement of power	19
4.4 Determination of the specific total loss.....	19
4.5 Reproducibility of the specific total loss measurement.....	19
5 Procedure for the determination of the peak value of magnetic polarization, r.m.s. value of magnetic field strength, peak value of magnetic field strength and specific apparent power.....	21
5.1 Test specimen.....	21
5.2 Principle of measurement	21
5.3 Reproducibility	25
6 General principles of d.c. measurements	25
6.1 Principle of the 25 cm Epstein frame method	25
6.2 Test specimen.....	25
6.3 The 25 cm Epstein frame.....	25
6.4 Air flux compensation	25
6.5 Power supply	27
6.6 Apparatus accuracy.....	27
7 Procedure for the d.c. measurement of the magnetic polarization.....	27
7.1 Preparation for measurement	27
7.2 Determination of the magnetic polarization.....	27
7.3 Determination of the magnetic hysteresis loop	29
7.4 Reproducibility of the measurement of the magnetic polarization.....	29
8 Test report	29
Figures	31

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

**Partie 2: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Epstein**

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux, desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques, représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 404-2 a été établie par le comité d'études 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 1978 et constitue une révision technique.

La présente norme remplace les chapitres I, II, IV et V de la CEI 404-2: 1978.

La norme CEI 404-11 remplace le chapitre VIII de la CEI 404-2: 1978.

La norme CEI 404-13 remplace les chapitres VI, VII et IX de la CEI 404-2: 1978.

Le chapitre III de la CEI 404-2: 1978 est annulé.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
68/119/FDIS	68/135/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

**Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties
of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, express as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 404-2 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1978 and constitutes a technical revision.

This standard supersedes chapters I, II, IV and V of IEC 404-2: 1978.

The standard IEC 404-11 supersedes chapter VIII of IEC 404-2: 1978.

The standard IEC 404-13 supersedes chapters VI, VII and IX of IEC 404-2: 1978.

Chapter III of IEC 404-2: 1978 is cancelled.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
68/119/FDIS	68/135/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 2: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Epstein

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 404 s'applique aux tôles et bandes magnétiques à grains orientés et non orientés, pour le mesurage des propriétés magnétiques en courant alternatif jusqu'à la fréquence de 400 Hz, et pour les mesures magnétiques en courant continu.

Cette partie a pour objet de définir les principes généraux et les détails techniques du mesurage des propriétés magnétiques des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Epstein.

Le cadre Epstein est utilisable pour des éprouvettes de tôles et bandes magnétiques quelle qu'en soit la qualité. Les caractéristiques magnétiques en courant alternatif sont déterminées pour des tensions induites sinusoïdales, pour des valeurs crêtes particulières de la polarisation magnétique et pour une fréquence spécifiée.

Les mesurages sont à effectuer à une température ambiante de (23 ± 5) °C sur des éprouvettes préalablement désaimantées.

Les mesurages à plus hautes fréquences sont à effectuer conformément à la CEI 404-10.

NOTE – Dans cette norme le terme «polarisation magnétique» est utilisé conformément à sa définition de la CEI 50(221). Dans certaines normes des séries CEI 404, le terme «densité de flux magnétique» a été utilisé.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 404. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision, et les parties prenantes aux accords basés sur la présente partie de la CEI 404 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs mentionnés ci-dessous. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des normes internationales en vigueur.

CEI 50(221): 1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 221: Matériaux et composants magnétiques.*

CEI 404-4: 1995, *Matériaux magnétiques – Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques du fer et de l'acier*

CEI 404-8-2: 1985, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section Deux: Spécification des bandes magnétiques en acier allié, laminées à froid et livrées à l'état semi-fini*

MAGNETIC MATERIALS –

Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame

1 Scope and object

This part of IEC 404 is applicable to grain oriented and non-oriented electrical sheet and strip for a.c. measurements of magnetic properties at frequencies up to 400 Hz and for d.c. magnetic measurements.

The object of this part is to define the general principles and the technical details of the measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame.

The Epstein frame is applicable to test specimens obtained from electrical steel sheets and strips of any grade. The a.c. magnetic characteristics are determined for sinusoidal induced voltages, for specified peak values of magnetic polarization and for a specified frequency.

The measurements are to be made at an ambient temperature of (23 ± 5) °C on test specimens which have first been demagnetized.

Measurements at higher frequencies are to be made in accordance with IEC 404-10.

NOTE – Throughout this standard the term "magnetic polarization" is used as defined in IEC 50(221). In some standards of the IEC 404 series, the term "magnetic flux density" was used.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 404. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 404 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents listed below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(221): 1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 404-4: 1995, *Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel*

IEC 404-8-2: 1985, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Two: Specification for cold-rolled magnetic alloyed steel strip delivered in the semi-processed state*

CEI 404-8-3: 1985, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section trois: Spécifications de bandes magnétiques en acier non allié, laminées à froid et livrées à l'état semi-fini*

CEI 404-8-4: 1986, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section quatre: Spécification des tôles magnétiques en acier à grains non orientés, laminées à froid*

CEI 404-8-7: 1988, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section sept: Spécification des tôles magnétiques en acier à grains orientés*

CEI 404-10: 1988, *Matériaux magnétiques – Dixième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques à fréquences moyennes des tôles et feuillards magnétiques en acier*

CEI 404-13: 1995, *Matériaux magnétiques – Partie 13: Méthodes de mesure de la masse volumique, de la résistivité et du facteur de foisonnement des tôles et bandes magnétiques*

3 Principes généraux des mesures en courant alternatif

3.1 Principe de la méthode du cadre Epstein de 25 cm

Le cadre Epstein de 25 cm qui comprend un enroulement primaire, un enroulement secondaire et l'éprouvette à tester formant le noyau constitue un transformateur à vide dont on mesure les caractéristiques par la méthode décrite dans les paragraphes qui suivent.

3.2 Eprouvette

Les bandes à mesurer sont assemblées en carré, avec des joints à double recouvrement (voir figure 1) formant ainsi quatre branches d'égales longueurs et d'égales sections.

Les bandes doivent être prélevées conformément aux prescriptions de la norme de produit appropriée de la série CEI 404-8.

Elles doivent être découpées par un procédé permettant d'obtenir une coupe particulièrement franche, exempte de bavures, et, si spécifié, traitées thermiquement conformément aux prescriptions de la norme de produit appropriée. Elles doivent avoir les dimensions suivantes:

- largeur $b = 30 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$;
- longueur $280 \text{ mm} \leq l \leq 320 \text{ mm}$.

Les longueurs des bandes doivent être toutes égales, avec une tolérance de $\pm 0,5 \text{ mm}$.

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

Les tolérances suivantes doivent s'appliquer à l'angle entre les directions de découpe visées et effectives:

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

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

IEC 404-8-3: 1985, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Three: Specification for cold-rolled magnetic non-alloyed steel strip delivered in the semi-processed state*

IEC 404-8-4: 1986, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Four: Specification for cold-rolled non-oriented magnetic steel sheet and strip*

IEC 404-8-7: 1988, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Seven: Specification for grain oriented magnetic steel sheet and strip*

IEC 404-10: 1988, *Magnetic materials – Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of magnetic steel sheet and strip at medium frequencies*

IEC 404-13: 1995, *Magnetic materials – Part 13: Methods of measurement of density, resistivity and stacking factor of electrical steel sheet and strip*

3 General principles of a.c. measurements

3.1 Principle of the 25 cm Epstein frame method

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

3.2 Test specimen

The strips to be tested are assembled in a square, having double-lapped joints (see figure 1), thus forming four branches of equal length and equal cross-sectional area.

The strips shall be sampled in accordance with the appropriate product standard in the IEC 404-8 series.

They shall be cut by a method which will produce substantially burr-free edges and, if so specified, heat treated in accordance with the corresponding product standard. They shall have the following dimensions:

- width $b = 30 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$;
- length $280 \text{ mm} \leq l \leq 320 \text{ mm}$.

The lengths of the strips shall be equal within a tolerance of $\pm 0,5 \text{ mm}$.

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

The following tolerances shall apply for the angle between the specified and actual direction of cutting:

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

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

Le nombre de bandes constituant l'éprouvette doit être un multiple de quatre et il est défini, dans la norme de produit correspondante. Toutefois, la masse active de l'éprouvette (voir équation (1)) doit être au moins égale à 240 g pour des bandes de 280 mm de longueur.

3.3 Cadre Epstein de 25 cm

Le cadre Epstein de 25 cm (appelé par la suite cadre Epstein) doit se composer de quatre solénoïdes dans lesquels sont introduites les bandes constituant l'éprouvette (voir figure 2).

Une inductance mutuelle pour la compensation du flux dans l'air complète le cadre Epstein.

Les mandrins des enroulements qui portent les solénoïdes sont fabriqués en matériau dur et isolant, par exemple en laminé phénolique. Ils possèdent une section rectangulaire avec une largeur intérieure de 32 mm. Une hauteur d'environ 10 mm est recommandée.

Les solénoïdes doivent être fixés sur un support isolant et non magnétique de façon à former un circuit carré (voir figure 2). La longueur des côtés du carré formé par les bords internes des bandes de l'éprouvette doit être de $220 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$ mm (voir figure 2).

Chacun des quatre solénoïdes doit comporter deux enroulements:

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

NOTE - Un écran électrostatique peut être prévu entre ces enroulements.

Les enroulements doivent être répartis uniformément sur une longueur d'au moins 190 mm, chaque solénoïde comportant le quart du nombre total de spires.

Les enroulements individuels primaires des quatre solénoïdes doivent être branchés en série, de même que les enroulements individuels secondaires. Le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire peut être adapté aux conditions particulières qu'imposent la source d'alimentation, l'appareillage de mesure et la fréquence.

NOTE - Un nombre total de 700 ou 1000 spires est généralement utilisé et recommandé.

Afin de réduire autant que possible l'effet des impédances des solénoïdes les conditions suivantes doivent être réunies:

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1,25 \cdot 10^{-6} \Omega \quad \frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{H} \quad \frac{L_2}{N_2^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{H}$$

où

R_1 et R_2 sont les résistances des enroulements primaire et secondaire, respectivement, en ohms;

L_1 et L_2 sont les inductances des enroulements primaire et secondaire, respectivement, en henrys;

N_1 et N_2 sont les nombres de spires totaux des enroulements primaire et secondaire, respectivement.

The number of strips comprising the test specimen shall be a multiple of four and is specified in the corresponding product standard. However, the active mass of the test specimen (see equation (1)) shall be at least 240 g for strips 280 mm long.

3.3 The 25 cm Epstein frame

The 25 cm Epstein frame (hereinafter referred to as the Epstein frame) shall consist of four coils into which the strips making up the test specimen are inserted (see figure 2).

A mutual inductor for air flux compensation is included with the Epstein frame.

The winding formers supporting the coils are made of hard insulating material, such as phenolic paper. They have a rectangular cross-section with 32 mm inner width. A height of approximately 10 mm is recommended.

The coils shall be fixed to an insulating and non-magnetic base in such a way as to form a square (see figure 2). The length of the sides of the square formed by the internal edges of the strips of the test specimen shall be 220^{+1}_{-0} mm (see figure 2).

Each of the four coils shall have two windings:

- a primary winding, on the outside (magnetizing winding);
- a secondary winding, on the inside (voltage winding).

NOTE - An electrostatic screen may be provided between these windings.

The windings shall be distributed uniformly over a minimum length of 190 mm, each coil having one quarter of the total number of turns.

The individual primary windings of the four coils shall be connected in series, as shall be the secondary windings. The number of primary and secondary turns may be adapted to the particular conditions prevailing with regard to the power source, measuring equipment and frequency.

NOTE - The total number of turns generally used and recommended is 700 or 1 000.

In order to reduce the effect of the impedances of the windings as much as possible, the following requirements shall be met:

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1,25 \cdot 10^{-6} \Omega \quad \frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{H} \quad \frac{L_2}{N_2^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{H}$$

where

R_1 and R_2 are the resistances of the primary and secondary windings, respectively, in ohms;

L_1 and L_2 are the inductances of the primary and secondary windings, respectively, in henrys;

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

NOTE – Ces exigences sont satisfaites, par exemple, si on utilise des enroulements possédant les caractéristiques suivantes:

- nombre total de spires: $N_1 = 700$, $N_2 = 700$;
- enroulement primaire (extérieur): chaque solénoïde comporte 175 spires de deux fils de cuivre, d'environ $1,8 \text{ mm}^2$ de section nominale, bobinés côte à côte en trois couches et branchés en parallèle;
- enroulement secondaire: chaque solénoïde comporte 175 spires d'un fil de cuivre de $0,8 \text{ mm}^2$ de section nominale, bobiné en une couche.

La longueur effective, l_m , du circuit magnétique doit être conventionnellement fixée à $0,94 \text{ m}$. En conséquence, la masse active, m_a , c'est-à-dire la masse de l'éprouvette qui intervient magnétiquement, est donnée par la relation:

$$m_a = \frac{l_m}{4 l} m \quad (1)$$

où

l est la longueur d'une bande éprouvette, en mètres;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,94 \text{ m}$);

m est la masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes;

m_a est la masse active de l'éprouvette, en kilogrammes.

3.4 Compensation du flux dans l'air

L'inductance mutuelle pour la compensation du flux dans l'air doit être située au centre de l'espace délimité par les quatre solénoïdes, son axe étant perpendiculaire au plan des axes de ces solénoïdes. L'enroulement primaire de l'inductance mutuelle doit être branché en série avec l'enroulement primaire du cadre Epstein et l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle doit être branché en série opposition avec l'enroulement secondaire du cadre Epstein (voir figure 3).

La valeur de l'inductance mutuelle doit être réglée de façon que, en l'absence d'éprouvette dans le dispositif d'essai, lorsqu'on fait circuler un courant alternatif dans les enroulements primaires, la tension entre les extrémités non reliées entre elles des enroulements secondaires ne doit pas être supérieure à $0,1 \%$ de la tension qui apparaît aux extrémités de l'enroulement secondaire du dispositif seul.

Ainsi, la valeur moyenne de la tension redressée induite dans l'enroulement secondaire combiné est-elle proportionnelle à la valeur de crête de la polarisation magnétique dans l'éprouvette.

3.5 Source d'alimentation

La source d'alimentation doit avoir une faible impédance et une grande stabilité en tension et fréquence. Pendant les mesures, les variations de tension et de fréquence ne doivent pas dépasser $\pm 0,2 \%$ de leur valeur spécifiée.

Pour déterminer les pertes totales spécifiques, la puissance apparente spécifique et la valeur efficace du champ magnétique d'excitation, le facteur de forme de la tension secondaire doit être $1,111 \pm 1 \%$.

NOTE – Ce résultat peut être obtenu de plusieurs façons: par exemple en utilisant une alimentation asservie par électronique ou un amplificateur de puissance à contre-réaction. Le facteur de forme de la tension secondaire est le rapport de sa valeur efficace à sa valeur redressée moyenne.

NOTE – These requirements are satisfied, for example, if windings with the following characteristics are used:

- total number of turns: $N_1 = 700$, $N_2 = 700$;
- primary (outer) winding: each of the four coils carries 175 turns of two copper wires connected in parallel, each with a nominal cross-sectional area of approximately $1,8 \text{ mm}^2$, wound side by side in three layers;
- secondary winding: each of the four coils carries 175 turns of one copper wire with a nominal cross-sectional area of $0,8 \text{ mm}^2$ wound in one layer.

The effective magnetic path length, l_m , of the magnetic circuit shall be conventionally assumed to be equal to $0,94 \text{ m}$. Therefore, the active mass, m_a , that is the mass of the test specimen which is magnetically active, is given by:

$$m_a = \frac{l_m}{4 l} m \quad (1)$$

where

l is the length of a test specimen strip, in metres;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,94 \text{ m}$);

m is the total mass of the test specimen, in kilograms;

m_a is the active mass of the test specimen, in kilograms.

3.4 Air flux compensation

The mutual inductor for air flux compensation shall be located in the centre of the space enclosed by the four coils, its axis being directed normal to the plane of the axes of these coils. The primary winding of the mutual inductor shall be connected in series with the primary winding of the Epstein frame, and the secondary winding of the mutual inductor shall be connected to the secondary winding of the Epstein frame in series opposition (see figure 3).

The adjustment of the value of the mutual inductance shall be made so that, when passing an alternating current through the primary windings in the absence of the specimen in the apparatus, the voltage measured between the non-common terminals of the secondary windings shall be no more than $0,1 \%$ of the voltage appearing across the secondary winding of the test apparatus alone.

Thus the average value of the rectified voltage induced in the combined secondary windings is proportional to the peak value of the magnetic polarization in the test specimen.

3.5 Power supply

The power supply shall have a low impedance and a high stability of voltage and frequency. During measurements, the voltage and frequency variations shall not exceed $\pm 0,2 \%$ of the required value.

For the determination of the specific total loss, the specific apparent power and the r.m.s. value of the magnetic field strength, the form factor of the secondary voltage shall be $1,111 \pm 1 \%$.

NOTE – This is possible in several ways: for example by using an electronically controlled power supply or a negative feedback power amplifier. The form factor of the secondary voltage is the ratio of its r.m.s. value to its average rectified value.

Deux voltmètres, l'un mesurant les valeurs efficaces et l'autre mesurant les valeurs redressées moyennes doivent être utilisés pour déterminer le facteur de forme.

NOTE – Il est recommandé de contrôler la forme d'onde de la tension secondaire induite à l'aide d'un oscilloscope pour s'assurer que la composante fondamentale de l'onde est seule présente.

3.6 *Mesurage de la tension*

La tension secondaire du cadre Epstein doit être mesurée à l'aide de voltmètres appropriés, ayant une impédance d'entrée supérieure ou égale à 1 000 Ω/V .

3.6.1 *Voltmètre de valeur redressée moyenne*

Un voltmètre donnant la valeur redressée moyenne et ayant une précision de $\pm 0,2$ % ou meilleure doit être utilisé.

NOTE – On choisira de préférence un voltmètre numérique.

3.6.2 *Voltmètre de valeur efficace*

Un voltmètre donnant la valeur efficace de la tension et ayant une précision de $\pm 0,2$ % ou meilleure doit être utilisé.

NOTE – On choisira de préférence un voltmètre numérique.

3.6.3 *Voltmètre de crête*

Un voltmètre donnant la valeur crête de la tension et ayant une précision de $\pm 0,5$ % ou meilleure doit être utilisé.

3.7 *Mesurage de la fréquence*

Un fréquencemètre ayant une précision de $\pm 0,1$ % ou meilleure doit être utilisé.

3.8 *Mesurage de la puissance*

La puissance doit être mesurée au moyen d'un wattmètre ayant une précision de $\pm 0,5$ % ou meilleure pour le facteur de puissance et le facteur de crête utilisés.

La résistance du circuit tension du wattmètre doit être au moins égale à 5000 fois sa réactance, à moins que le wattmètre ne soit compensé pour sa réactance.

Si un dispositif de mesure du courant est inclus dans le circuit, il doit être court-circuité pendant qu'on procède à la mesure des pertes, après avoir ajusté la tension secondaire.

4 **Mode opératoire pour la mesure des pertes totales spécifiques**

4.1 *Préparation du mesurage*

Le cadre Epstein et l'équipement de mesure doivent être branchés comme indiqué à la figure 3.

L'éprouvette doit être pesée et sa masse déterminée à mieux que $\pm 0,1$ %. Après pesage, les bandes doivent être empilées dans les solénoïdes du cadre Epstein en formant dans les coins des joints à double recouvrement, chacune des branches du cadre contenant le même nombre de bandes de telle sorte que la longueur du côté du carré intérieur ainsi formé soit de 220^{+1}_{-0} mm. Dans le cas de bandes découpées moitié dans la direction parallèle et moitié dans

Two voltmeters, one responsive to r.m.s. values and the other responsive to average rectified values shall be used to determine the form factor.

NOTE – The waveform of the secondary induced voltage should be checked with an oscilloscope to ensure that only the fundamental component is present.

3.6 Voltage measurement

The secondary voltage of the Epstein frame shall be measured by means of appropriate voltmeters having an input impedance greater than or equal to 1 000 Ω/V .

3.6.1 Average type voltmeter

A voltmeter responsive to average rectified values having an accuracy of $\pm 0,2\%$ or better shall be used.

NOTE – The preferred instrument is a digital voltmeter.

3.6.2 RMS voltmeter

A voltmeter responsive to r.m.s. values having an accuracy of $\pm 0,2\%$ or better shall be used.

NOTE – The preferred instrument is a digital voltmeter.

3.6.3 Peak voltmeter

A voltmeter responsive to peak values having an accuracy of $\pm 0,5\%$ or better shall be used.

3.7 Frequency measurement

A frequency meter having an accuracy of $\pm 0,1\%$ or better shall be used.

3.8 Power measurement

The power shall be measured by a wattmeter having an accuracy of $\pm 0,5\%$ or better at the actual power factor and crest factor.

The resistance of the voltage circuit of the wattmeter shall be at least 5 000 times its reactance, unless the wattmeter is compensated for its reactance.

If a current measuring device is included in the circuit it shall be short-circuited when the secondary voltage has been adjusted and the loss is being measured.

4 Procedure for the measurement of the specific total loss

4.1 Preparation for measurement

The Epstein frame and measuring equipment shall be connected as shown in figure 3.

The test specimen shall be weighed and its mass determined to within $\pm 0,1\%$. After weighing, the strips shall be stacked into the coils of the Epstein frame with double lapped joints at the corners and with the same number of strips in each branch of the frame such that the length of the internal side of the square so formed is 220^{+1}_{-0} mm. Where strips are cut half parallel and half perpendicular to the direction of rolling, the strips cut in the direction of rolling shall be

la direction perpendiculaire à la direction de laminage, on doit veiller à ce que les bandes découpées parallèlement à la direction de laminage soient toutes insérées dans deux branches opposées du cadre, et celles découpées perpendiculairement à la direction de laminage soient toutes insérées dans les deux autres branches. Dans les parties en recouvrement, toutes les précautions doivent être prises pour que l'entrefer entre les bandes soit aussi réduit que possible. L'application d'une force d'environ 1 N à chaque coin, normale au plan des bandes en recouvrement, est autorisée.

L'éprouvette doit ensuite être désaimantée par application d'un champ magnétique alternatif régulièrement décroissant, d'amplitude initiale supérieure à celle du champ appliqué dans les mesures antérieures.

4.2 Réglage de la source d'alimentation

Le niveau de sortie de la source d'alimentation doit être augmenté lentement, tout en observant l'ampèremètre dans le circuit primaire pour s'assurer que le circuit courant du wattmètre n'est pas surchargé, jusqu'à ce que la valeur redressée moyenne de la tension secondaire du cadre Epstein $\overline{|U_2|}$ atteigne la valeur requise. Celle-ci est calculée à partir de la valeur de la polarisation magnétique souhaitée, en utilisant la formule:

$$\overline{|U_2|} = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} A \hat{J} \quad (2)$$

où

$\overline{|U_2|}$ est la valeur moyenne de la tension redressée, induite dans l'enroulement secondaire, en volts;

A est l'aire de la section droite de l'éprouvette, en mètres carrés;

f est la fréquence, en hertz;

\hat{J} est la valeur crête de la polarisation magnétique, en teslas;

N_2 est le nombre total de spires de l'enroulement secondaire;

R_i est la résistance totale des instruments du circuit secondaire, en ohms;

R_t est la somme des résistances des enroulements secondaires du cadre et de l'inductance mutuelle, en ohms.

L'aire de la section droite de l'éprouvette est donnée par l'équation:

$$A = \frac{m}{4 l \rho_m} \quad (3)$$

où

A est l'aire de la section droite de l'éprouvette, en mètres carrés;

m est la masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes;

l est la longueur d'une bande de l'éprouvette, en mètres;

ρ_m est la masse volumique conventionnelle du matériau en essai, ou la valeur déterminée conformément à la CEI 404-13, en kilogrammes par mètre cube.

inserted in two opposite branches of the frame and those cut perpendicular to the direction of rolling inserted in the other two branches. Care shall be taken to ensure that the air gap between the strips in the overlapping portions is as small as possible. It is permissible to apply a force of about 1 N to each corner, normal to the plane of the overlapping strips.

The test specimen shall then be demagnetized in a decreasing alternating magnetic field of an initial level higher than used in previous measurements.

4.2 Adjustment of power supply

The power supply output shall be slowly increased, whilst observing the ammeter in the primary circuit to ensure that the wattmeter current circuit is not overloaded, until the average rectified value of the secondary voltage $\overline{U_2}$ of the Epstein frame has reached the required value. This is calculated from the desired value of magnetic polarization by means of:

$$\overline{U_2} = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} A \hat{J} \quad (2)$$

where

$\overline{U_2}$ is the average value of the rectified voltage induced in the secondary winding, in volts;

A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;

f is the frequency, in hertz;

\hat{J} is the peak value of magnetic polarization, in teslas;

N_2 is the total number of turns of the secondary winding;

R_i is the total resistance of the instruments in the secondary circuit, in ohms;

R_t is the series resistance of the secondary windings and mutual inductor, in ohms.

The cross-sectional area of the test specimen is given by the equation:

$$A = \frac{m}{4 l \rho_m} \quad (3)$$

where

A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;

m is the total mass of the test specimen, in kilograms;

l is the length of a test specimen strip, in metres;

ρ_m is the conventional density, or the value determined in accordance with IEC 404-13, of the test material, in kilograms per cubic metre.

4.3 Mesurage de la puissance

L'ampèremètre du circuit primaire doit être court-circuité et la tension secondaire réajustée si cela est nécessaire. Le facteur de forme de la tension secondaire doit être déterminé conformément à 3.5, et on doit procéder alors à la lecture du wattmètre.

4.4 Détermination des pertes totales spécifiques

La puissance P_m , mesurée par le wattmètre inclut la puissance consommée par les appareils du circuit secondaire. Les pertes totales, P_c , de l'éprouvette doivent donc être calculées conformément à l'équation:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{\left(1,111 \overline{U_2}\right)^2}{R_i} \quad (4)$$

où

P_c sont les pertes totales calculées de l'éprouvette, en watts;

N_1 est le nombre total de spires de l'enroulement primaire;

N_2 est le nombre total de spires de l'enroulement secondaire;

P_m est la puissance mesurée par le wattmètre, en watts;

R_i est la résistance totale des instruments du circuit secondaire, en ohms;

$\overline{U_2}$ est la valeur moyenne de la tension redressée induite dans l'enroulement secondaire en volts.

Les pertes totales spécifiques mesurées, P_s , sont obtenues en divisant P_c par la masse active m_a de l'éprouvette.

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c 4 l}{m l_m} \quad (5)$$

où

P_s sont les pertes totales spécifiques de l'éprouvette, en watts par kilogramme;

l est la longueur d'une bande éprouvette, en mètres;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,94$ m);

m est la masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes;

m_a est la masse active de l'éprouvette, en kilogrammes;

P_c sont les pertes totales calculées de l'éprouvette, en watts.

4.5 Reproductibilité du mesurage des pertes totales spécifiques

La reproductibilité des résultats obtenus en suivant les modes opératoires décrits dans ce paragraphe est caractérisée par un écart type relatif de 1,5 % dans les mesures de matériaux à grains orientés, pour des valeurs de la polarisation magnétique allant jusqu'à 1,7 T, et de matériaux non orientés pour des valeurs de la polarisation magnétique allant jusqu'à 1,5 T.

Dans le cas de mesure pour des valeurs de la polarisation magnétique plus élevées, il est admis que l'écart type sera majoré.

4.3 Measurement of power

The ammeter in the primary circuit shall be short circuited and the secondary voltage readjusted if necessary. The form factor of the secondary voltage shall be determined in accordance with 3.5 and then the wattmeter reading shall be recorded.

4.4 Determination of the specific total loss

The power, P_m , measured by the wattmeter includes the power consumed by the instruments in the secondary circuit. The total loss, P_c , of the test specimen shall therefore be calculated using the equation:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{\left(1,111 \overline{U_2}\right)^2}{R_i} \quad (4)$$

where

P_c is the calculated total loss of the test specimen, in watts;

N_1 is the total number of turns of the primary winding;

N_2 is the total number of turns of the secondary winding;

P_m is the power measured by the wattmeter, in watts;

R_i is the total resistance of the instruments in the secondary circuit, in ohms;

$\overline{U_2}$ is the average value of the rectified voltage induced in the secondary winding, in volts.

The measured specific total loss, P_s , is obtained by dividing P_c by the active mass m_a of the test specimen.

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c 4 l}{m l_m} \quad (5)$$

where

P_s is the specific total loss of the test specimen, in watts per kilogram;

l is the length of a test specimen strip, in metres;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,94$ m);

m is the total mass of the test specimen, in kilograms;

m_a is the active mass of the test specimen, in kilograms;

P_c is the calculated total loss of the test specimen, in watts.

4.5 Reproducibility of the specific total loss measurement

The reproducibility of the results obtained from the procedures described in this subclause is characterized by a relative standard deviation of 1,5 % for measurements on grain oriented material at magnetic polarizations up to 1,7 T and for measurements on non-oriented material up to 1,5 T.

For measurements at higher magnetic polarizations, it is expected that the relative standard deviation will be increased.

5 Mode opératoire pour la détermination de la valeur crête de la polarisation magnétique, de la valeur efficace de l'intensité du champ magnétique, de la valeur crête de l'intensité du champ magnétique et de la puissance apparente spécifique

Cet article décrit les méthodes de mesure utilisées pour la détermination des caractéristiques suivantes:

- la valeur crête de la polarisation magnétique \hat{J} ;
- la valeur efficace de l'intensité du champ magnétique \bar{H} ;
- la valeur crête de l'intensité du champ magnétique \hat{H} ;
- la puissance apparente spécifique S_S .

5.1 Epreuve

L'épreuve doit satisfaire aux conditions de 3.2.

5.2 Principe de mesure

5.2.1 Valeur crête de la polarisation magnétique \hat{J}

La valeur crête de la polarisation magnétique doit être déterminée à partir de la valeur moyenne de la tension secondaire redressée mesurée conformément à l'article 4 et calculée en utilisant l'équation 2.

5.2.2 Valeur efficace de l'intensité du champ magnétique

La valeur efficace de l'intensité du champ magnétique doit être calculée à partir de la valeur efficace du courant qu'on mesure avec un ampèremètre de valeur efficace disposé comme indiqué à la figure 4. De façon équivalente, on peut remplacer l'ampèremètre par une résistance de précision de valeur typique 0,1 Ω à 1 Ω , connue avec une précision de 0,1 %. La tension aux bornes de cette résistance doit être mesurée en utilisant un voltmètre de valeur efficace satisfaisant aux conditions de 3.6. La fréquence doit être réglée à la valeur désirée. La valeur crête de la polarisation magnétique doit être réglée ensuite en ajustant la tension secondaire du cadre Epstein à la valeur requise qu'on calcule en utilisant l'équation 2. La valeur efficace du courant doit être alors déterminée et enregistrée. La valeur efficace de l'intensité du champ magnétique doit être calculée en utilisant l'équation:

$$\bar{H} = \frac{N_1}{l_m} \bar{I}_1 \quad (6)$$

où

\bar{H} est la valeur efficace de l'intensité du champ magnétique, en ampères par mètre;

\bar{I}_1 est la valeur efficace du courant d'excitation, en ampères;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,94$ m);

N_1 est le nombre total de spires de l'enroulement primaire.

5 Procedure for the determination of the peak value of magnetic polarization, r.m.s. value of magnetic field strength, peak value of magnetic field strength and specific apparent power

This clause describes measuring methods for the determination of the following characteristics:

- peak value of magnetic polarization \hat{J} ;
- r.m.s. value of magnetic field strength \tilde{H} ;
- peak value of magnetic field strength \hat{H} ;
- specific apparent power S_s .

5.1 Test specimen

The test specimen shall comply with 3.2.

5.2 Principle of measurement

5.2.1 Peak value of magnetic polarization \hat{J}

The peak value of magnetic polarization shall be determined from the average value of the secondary rectified voltage measured as described in clause 4 and calculated from equation 2.

5.2.2 RMS value of magnetic field strength

The r.m.s. value of the magnetic field strength shall be calculated from the r.m.s. value of the current, measured by an r.m.s. ammeter in the circuit shown in figure 4. Alternatively a precision resistor, of value typically in the range 0,1 Ω to 1 Ω of an accuracy of 0,1 %, shall be connected in place of the ammeter and the voltage developed across this resistor shall be measured using a voltmeter responsive to r.m.s. values conforming to the requirements of 3.6. The frequency shall be set to the desired value. The peak value of the magnetic polarization shall be set by adjusting the secondary voltage of the Epstein frame to the required value calculated from equation 2. The r.m.s. value of the current shall then be determined and recorded. The r.m.s. value of the magnetic field strength shall be calculated from the equation:

$$\tilde{H} = \frac{N_1}{l_m} \tilde{I}_1 \quad (6)$$

where

\tilde{H} is the r.m.s. value of magnetic field strength, in amperes per metre;

\tilde{I}_1 is the r.m.s. value of magnetizing current, in amperes;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,94$ m);

N_1 is the total number of turns of the primary winding.

5.2.3 Valeur crête de l'intensité du champ magnétique

La valeur crête de l'intensité du champ magnétique doit être obtenue à partir de la valeur crête du courant d'excitation \hat{I}_1 laquelle s'obtient en mesurant la chute de tension aux bornes d'une résistance de précision de valeur connue avec une précision de 0,1 %, R , à l'aide d'un voltmètre de crête comme indiqué à la figure 5. Pour cette mesure le facteur de forme de la tension secondaire peut excéder la valeur spécifiée (voir 3.5).

La valeur crête de l'intensité du champ magnétique doit être calculée en appliquant la relation:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{l_m} \hat{I}_1 \quad (7)$$

où

\hat{H} est la valeur crête de l'intensité du champ magnétique, en ampères par mètre;

\hat{I}_1 est la valeur crête du courant d'excitation $\left(\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}}{R}\right)$ en ampères;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique ($l_m = 0,94$ m);

N_1 est le nombre total de spires de l'enroulement primaire.

De façon équivalente, la valeur crête du courant d'excitation \hat{I}_1 peut être déterminée en mesurant la tension redressée moyenne qui apparaît aux bornes de l'enroulement secondaire d'une inductance mutuelle M_D connue avec une précision de 0,5 %, dont l'enroulement primaire est branché en série avec l'enroulement primaire du cadre Epstein. Lorsque cette méthode est utilisée, il faut s'assurer (par exemple en observant la forme d'onde sur un oscilloscope) que la tension mesurée aux bornes de l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle ne passe pas par une valeur nulle plus de deux fois par cycle. Le circuit est représenté à la figure 6. Le voltmètre peut être le même appareil que celui utilisé pour mesurer la tension secondaire du cadre Epstein. Avec cette méthode, la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique doit être calculée en appliquant la relation:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{4 f M_D l_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m \quad (7a)$$

où

M_D est l'inductance mutuelle dans le circuit de la figure 6, page 34, en henrys;

R_m est la résistance du solénoïde secondaire de M_D , en ohms;

R_v est la résistance interne du voltmètre de valeur redressée, en ohms;

\bar{U}_m est la valeur redressée de la tension induite dans l'enroulement secondaire de M_D , en volts.

5.2.4 Détermination de la puissance apparente spécifique

Pour une valeur donnée de la polarisation magnétique et de la fréquence, on doit mesurer les valeurs efficaces correspondantes du courant d'excitation (voir 5.2.2) et de la tension secondaire du cadre Epstein. La valeur efficace de la tension doit être mesurée en branchant un voltmètre qui satisfait aux conditions énoncées en 3.6 aux bornes de l'enroulement secondaire du cadre Epstein.

5.2.3 Peak value of magnetic field strength

The peak value of the magnetic field strength shall be derived from the peak value of the magnetizing current \hat{I}_1 which is obtained by measuring the voltage drop across a known precision resistor R of an accuracy of 0,1 %, using a peak voltmeter as shown in figure 5. For this measurement, the form factor of the secondary voltage is allowed to exceed the specified value (see 3.5).

The peak magnetic field strength shall be calculated from the equation:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{l_m} \hat{I}_1 \quad (7)$$

where

\hat{H} is the peak value of magnetic field strength, in amperes per metre;

\hat{I}_1 is the peak value of magnetizing current $\left(\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}}{R} \right)$ in amperes;

l_m is the conventional effective magnetic path length of test specimen ($l_m = 0,94$ m);

N_1 is the total number of turns of the primary winding of the Epstein frame.

Alternatively, the peak value of the magnetizing current \hat{I}_1 can be determined by measuring the average rectified value of the voltage appearing across the secondary winding of a mutual inductor M_D of an accuracy of 0,5 %, the primary winding of which is connected in series with the primary winding of the Epstein frame. With this method it is necessary to ensure (e.g. by observing the waveform on an oscilloscope) that there are no more than two zero crossings per cycle of the voltage waveform of the secondary winding of the mutual inductor. The circuit is given in figure 6. The voltmeter can be the same instrument as is used for measuring the secondary voltage of the Epstein frame. With this method, the peak value of the magnetic field strength shall be calculated from the equation:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{4 f M_D l_m} \cdot \frac{R_v + R_m}{R_v} \cdot \bar{U}_m \quad (7a)$$

where

M_D is the mutual inductance in the circuit given in figure 6, page 35, in henrys;

R_m is the resistance of the secondary winding of M_D , in ohms;

R_v is the internal resistance of the average type voltmeter, in ohms;

\bar{U}_m is the average rectified value of the voltage induced in the secondary winding of M_D , in volts.

5.2.4 Determination of the specific apparent power

For a given value of magnetic polarization and frequency, the corresponding r.m.s. values of the magnetizing current (see 5.2.2) and the r.m.s. value of the secondary voltage of the Epstein frame shall be measured. The r.m.s. value of the voltage shall be measured by connecting a voltmeter complying with the requirements of 3.6 across the secondary winding of the Epstein frame.

La puissance apparente spécifique est donnée par la relation suivante:

$$S_s = \tilde{I}_1 \tilde{U}_2 \frac{N_1}{m_a N_2} = \tilde{I}_1 \tilde{U}_2 \frac{N_1 4 l}{m l_m N_2} \quad (8)$$

où

S_s est la puissance apparente spécifique, en voltampères par kilogramme;

\tilde{I}_1 est la valeur efficace du courant d'excitation, en ampères;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,94$ m);

l est la longueur d'une bande éprouvette, en mètres;

m est la masse totale de l'éprouvette, en kilogrammes;

m_a est la masse active de l'éprouvette, en kilogrammes;

N_1 est le nombre total de spires de l'enroulement primaire du cadre Epstein;

N_2 est le nombre total de spires de l'enroulement secondaire du cadre Epstein;

\tilde{U}_2 est la valeur efficace de la tension induite dans l'enroulement secondaire, en volts.

5.3 Reproductibilité

La reproductibilité des résultats obtenus à partir des modes opératoires décrits dans cet article dépend essentiellement de la précision de l'appareillage utilisé pour les mesures et des soins apportés dans la réalisation physique du banc d'essais. Quand on utilise des instruments ayant une précision de $\pm 0,5$ % ou meilleure, la reproductibilité des mesures est caractérisée par un écart type voisin de 2 % sauf en ce qui concerne la puissance apparente spécifique pour laquelle la reproductibilité est caractérisée par un écart type pouvant aller de 2 % (dans le cas de valeurs de la polarisation magnétique inférieures au coude de la courbe d'aimantation) à 7 % (pour des valeurs de la polarisation magnétique approchant la saturation).

6 Principes généraux des mesures en courant continu

6.1 Principe de la méthode du cadre Epstein de 25 cm

Le cadre Epstein de 25 cm qui comprend un enroulement primaire, un enroulement secondaire et l'éprouvette à mesurer comme noyau constitue un transformateur en circuit ouvert dont les caractéristiques en courant continu sont mesurées en appliquant la méthode décrite dans les paragraphes suivants:

6.2 Éprouvette

L'éprouvette doit être préparée conformément à 3.2.

6.3 Cadre Epstein de 25 cm

Le cadre Epstein de 25 cm doit être construit conformément à 3.3.

6.4 Compensation du flux dans l'air

L'effet du flux dans l'air doit être compensé au moyen d'une inductance mutuelle conformément à 3.4.

The specific apparent power is given by the following relationship:

$$S_s = \tilde{I}_1 \tilde{U}_2 \frac{N_1}{m_a N_2} = \tilde{I}_1 \tilde{U}_2 \frac{N_1 4 l}{m l_m N_2} \quad (8)$$

where

S_s is the specific apparent power, in voltamperes per kilogram;

\tilde{I}_1 is the r.m.s. value of the magnetizing current in amperes;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,94m$);

l is the length of a test specimen strip, in metres;

m is the total mass of the test specimen, in kilograms;

m_a is the active mass of the test specimen, in kilograms;

N_1 is the total number of turns of the primary winding of the Epstein frame;

N_2 is the total number of turns of the secondary winding of the Epstein frame;

\tilde{U}_2 is the r.m.s. value of the voltage induced in the secondary winding, in volts.

5.3 Reproducibility

The reproducibility of the results obtained from the procedures described in this clause depends essentially upon the accuracy of the instruments used for the measurement and careful attention to the physical details of the test equipment. When using instruments having an accuracy of $\pm 0,5$ % or better, the reproducibility of the measurements is characterized by a standard deviation of the order of 2 % except for the specific apparent power where the reproducibility is characterized by a standard deviation of between 2 % (for values of magnetic polarization below the knee of the magnetization curve) to 7 % (for values of magnetic polarization approaching saturation).

6 General principles of d.c. measurements

6.1 Principle of the 25 cm Epstein frame method

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

6.2 Test specimen

The test specimen shall comply with 3.2.

6.3 The 25 cm Epstein frame

The 25 cm Epstein frame shall be constructed in accordance with 3.3.

6.4 Air flux compensation

The effect of the air flux shall be compensated by means of a mutual inductor as described in 3.4.

6.5 Source d'alimentation

La source d'alimentation doit pouvoir délivrer un courant suffisant pour produire l'intensité maximale exigée du champ magnétique. Le taux d'ondulation résiduelle doit être inférieur à 1 % et la stabilité en courant doit être telle que les variations relatives du flux d'induction magnétique ne dépassent pas 0,2 %.

6.6 Précision de l'appareillage

La précision de l'appareillage de mesure doit satisfaire aux conditions suivantes:

6.6.1 Intégrateur de flux

Un intégrateur de flux de précision $\pm 0,3$ % ou meilleure doit être utilisé.

NOTE – L'intégrateur de flux peut être étalonné par une des méthodes décrites dans l'annexe B de la CEI 404-4.

6.6.2 Ampèremètre

Un ampèremètre de précision $\pm 0,2$ % ou meilleure doit être utilisé.

7 Mode opératoire pour la mesure de la polarisation magnétique en courant continu

7.1 Préparation du mesurage

Le cadre Epstein et l'appareillage de mesure doivent être branchés comme indiqué à la figure 7.

L'éprouvette doit être pesée et assemblée dans le cadre Epstein conformément à 4.1.

L'éprouvette doit être ensuite désaimantée soit dans un champ magnétique alternatif décroissant, soit par une succession de courants continus alternativement positifs et négatifs d'amplitude graduellement décroissante, circulant dans l'enroulement primaire du cadre Epstein, la fréquence des renversements étant d'environ deux par seconde. La valeur initiale de l'intensité du champ magnétique que produit le courant de désaimantation doit être supérieure à toutes les valeurs utilisées au cours des mesures précédentes.

L'aire de la section droite de l'éprouvette A, doit être calculée conformément à l'équation 3.

7.2 Détermination de la polarisation magnétique

Des valeurs discrètes de la polarisation magnétique peuvent être déterminées pour des valeurs correspondantes de l'intensité du champ magnétique en utilisant le montage représenté à la figure 7, ou une courbe normale d'aimantation peut être déterminée à partir d'une série de valeurs discrètes. Une méthode d'enregistrement continu peut également être utilisée. Une résistance étalonnée à quatre bornes est pour cela branchée en série avec l'enroulement d'excitation du cadre Epstein. Les bornes de potentiel de cette résistance sont branchées à l'entrée X d'un enregistreur X-Y et la sortie de l'intégrateur de flux est branchée à l'entrée Y de l'enregistreur X-Y comme indiqué à la figure 8. Un enregistreur point par point ou une interface d'ordinateur peuvent remplacer l'enregistreur X-Y.

L'intensité du champ magnétique doit être déterminée en mesurant le courant d'excitation dans l'enroulement primaire du cadre Epstein en appliquant la relation suivante:

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \quad (9)$$

6.5 Power supply

The power supply shall have a current rating sufficient to produce the maximum magnetic field strength required. The ripple content shall be less than 1 % and the current stability shall be such that the resultant relative magnetic flux variations are not more than 0,2 %.

6.6 Apparatus accuracy

The accuracy of the measuring apparatus shall be as follows:

6.6.1 Magnetic flux integrator

A magnetic flux integrator having an accuracy of $\pm 0,3$ % or better shall be used.

NOTE – The magnetic flux integrator may be calibrated by one of the methods described in annex B of IEC 404-4.

6.6.2 Ammeter

An ammeter having an accuracy of $\pm 0,2$ % or better shall be used.

7 Procedure for the d.c. measurement of the magnetic polarization

7.1 Preparation for measurement

The Epstein frame and measuring equipment shall be connected as shown in figure 7.

The test specimen shall be weighed and assembled into the Epstein frame as described in 4.1.

The test specimen shall then be demagnetized either in a decreasing alternating magnetic field or by a series of reversals of a gradually reducing direct current flowing in the primary winding of the Epstein frame, the frequency of the reversals being about two per second. The initial value of the magnetic field strength produced by the demagnetizing current shall be of a level higher than that used in previous measurements.

The cross-sectional area A of the test specimen shall be calculated from equation 3.

7.2 Determination of the magnetic polarization

Discrete values of magnetic polarization can be determined for corresponding values of magnetic field strength using a circuit as shown in figure 7, or a normal magnetization curve can be obtained from a series of discrete values. Alternatively, a continuous recording method may be used. A calibrated four terminal resistor is connected in series with the magnetizing winding of the Epstein frame. The potential terminals are connected to the X input of an X-Y recorder and the output of the flux integrator is connected to the Y input of the X-Y recorder as shown in figure 8. A plotter or computer interface can be used in place of the X-Y recorder.

The magnetic field strength shall be determined by measuring the magnetizing current in the primary winding of the Epstein frame using the following equation:

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \quad (9)$$

où

H est l'intensité du champ magnétique, en ampères par mètre;

I est le courant d'excitation, en ampères;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,94$ m);

N_1 est le nombre total de spires de l'enroulement primaire du cadre Epstein.

Pour obtenir des valeurs discrètes de la polarisation magnétique, l'intégrateur de flux doit être remis à zéro, et ensuite le courant dans l'enroulement primaire doit être augmenté jusqu'à obtenir la valeur désirée de l'intensité du champ magnétique.

Le courant d'excitation et la variation d'indication du fluxmètre doivent être notés. La valeur de la polarisation magnétique doit être calculée à partir de la variation d'indication du fluxmètre et de la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux, conformément à l'équation suivante:

$$\Delta J = \frac{K_j \alpha_j}{N_2 A} \quad (10)$$

où

ΔJ est la variation mesurée de la polarisation magnétique, en teslas;

A est l'aire de la section droite de l'éprouvette, en mètres carrés;

α_j est la lecture de l'intégrateur de flux;

K_j est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux, en volt secondes;

N_2 est le nombre total de spires de l'enroulement secondaire du cadre Epstein.

7.3 Détermination du cycle d'hystérésis magnétique

Si nécessaire, le cycle d'hystérésis magnétique doit être déterminé en accord avec la CEI 404-4, sauf que le cadre Epstein et l'éprouvette remplacent alors le tore.

7.4 Reproductibilité du mesurage de la polarisation magnétique

La reproductibilité des résultats obtenus en suivant le mode opératoire décrit dans cet article est caractérisée par un écart type de 1,0 %.

8 Rapport d'essai

S'il y a lieu, le rapport d'essai doit mentionner les informations suivantes:

- a) le type et l'identité de l'éprouvette;
- b) la masse spécifique du matériau (conventionnelle ou mesurée selon la CEI 404-13);
- c) la longueur des bandes formant l'éprouvette;
- d) le nombre de bandes;
- e) la température ambiante au cours des mesures;
- f) la fréquence de mesure;
- g) les valeurs de la polarisation magnétique;
- h) les résultats des mesures.

where

H is the magnetic field strength, in amperes per metre;

I is the magnetizing current, in amperes;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,94$ m);

N_1 is the total number of turns of the primary winding of the Epstein frame.

To obtain discrete values of magnetic polarization, the magnetic flux integrator shall be zeroed and the current through the primary winding shall be increased until the desired value of magnetic field strength is reached.

The magnetizing current and the change in fluxmeter reading shall be recorded. The value of the magnetic polarization shall be calculated from the change in fluxmeter reading and the calibration constant of the flux integrator using the following equation:

$$\Delta J = \frac{K_j \alpha_j}{N_2 A} \quad (10)$$

where

ΔJ is the measured change of magnetic polarization, in tesla;

A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;

α_j is the reading of the flux integrator;

K_j is the calibration constant of the flux integrator, in volt seconds;

N_2 is the total number of turns of the secondary winding of the Epstein frame.

7.3 Determination of the magnetic hysteresis loop

If required, the magnetic hysteresis loop shall be determined in accordance with IEC 404-4 except that the ring shall be replaced by the Epstein frame and test specimen.

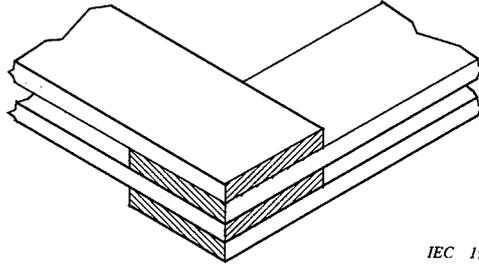
7.4 Reproducibility of the measurement of the magnetic polarization

The reproducibility of the results obtained from the procedure described in this clause is characterized by a relative standard deviation of 1,0 %.

8 Test report

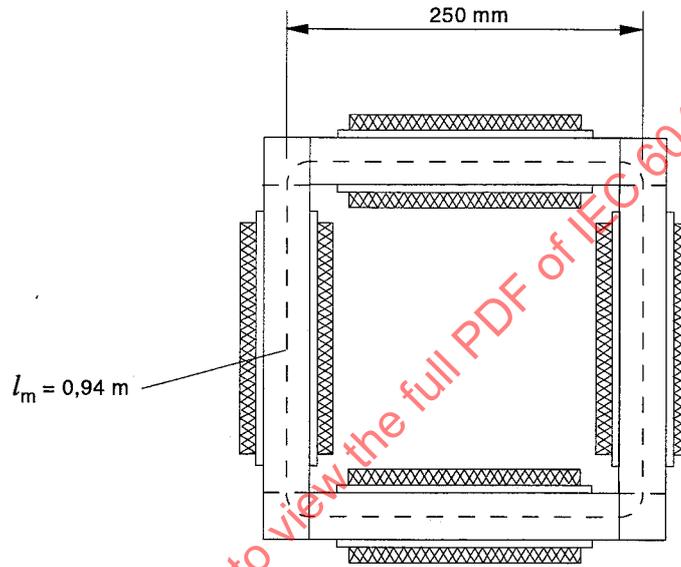
The test report shall include the following, as applicable:

- a) type and identity of test specimen;
- b) density of material (conventional, or as measured in accordance with IEC 404-13);
- c) length of test specimen strips;
- d) number of strips;
- e) ambient temperature during the measurements;
- f) measurement frequency;
- g) values of the magnetic polarization;
- h) results of the measurements.



IEC 198/96

Figure 1 – Joints à double recouvrement



IEC 199/96

Figure 2 – Cadre Epstein de 25 cm