

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

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

Matériaux magnétiques –

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

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

Matériaux magnétiques –

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope and object.....	6
2 Normative references.....	6
3 General principles of a.c. measurements	7
3.1 Principle of the 25 cm Epstein frame method	7
3.2 Test specimen	7
3.3 The 25 cm Epstein frame.....	7
3.4 Air flux compensation	9
3.5 Power supply.....	9
3.6 Voltage measurement.....	9
3.7 Frequency measurement	10
3.8 Power measurement.....	10
4 Procedure for the measurement of the specific total loss.....	10
4.1 Preparation for measurement.....	10
4.2 Adjustment of power supply	10
4.3 <i>Measurement of power</i>	11
4.4 Determination of the specific total loss	11
4.5 Reproducibility of the specific total loss measurement.....	12
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	12
5.1 Test specimen	12
5.2 Principle of measurement	12
5.3 Reproducibility.....	14
6 General principles of d.c. measurements	14
6.1 Principle of the 25 cm Epstein frame method	14
6.2 Test specimen	14
6.3 The 25 cm Epstein frame.....	14
6.4 Air flux compensation	15
6.5 Power supply.....	15
6.6 Apparatus accuracy.....	15
7 Procedure for the d.c. measurement of the magnetic polarization	15
7.1 Preparation for measurement.....	15
7.2 Determination of the magnetic polarization.....	15
7.3 Determination of the magnetic hysteresis loop	16
7.4 Reproducibility of the measurement of the magnetic polarization	16
8 Test report.....	16
Annex A (informative) Digital sampling methods for the determination of the magnetic properties	21
Bibliography	24

Figure 1 – Double-lapped joints	17
Figure 2 – The 25 cm Epstein frame	17
Figure 3 – Circuit for the wattmeter method	18
Figure 4 – Circuit for measuring the r.m.s. value of the magnetizing current.....	18
Figure 5 – Circuit for measuring the peak value of the magnetic field strength using a peak voltmeter	19
Figure 6 – Circuit for measuring the peak value of magnetic field strength using a mutual inductor M_D	19
Figure 7 – Circuit for d.c. testing: to obtain discrete values of magnetic polarization	20
Figure 8 – Circuit for d.c. testing: continuous recording method	20

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1996+AMD1:2008 CSV

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of 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, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). 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. 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 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 IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60404-2 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This consolidated version of IEC 60404-2 consists of the third edition (2000) [documents 68/119/FDIS and 68/135/RVD] and its amendment 1 (2008) [documents 68/365/FDIS and 68/369/RVD].

The technical content is therefore identical to the base edition and its amendment and has been prepared for user convenience.

It bears the edition number 3.1.

A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendment 1.

This standard supersedes chapters I, II, IV and V of IEC 60404-2:1978.

The standard IEC 60404-11 supersedes chapter VIII of IEC 60404-2:1978.

The standard IEC 60404-13 supersedes chapters VI, VII and IX of IEC 60404-2:1978.

Chapter III of IEC 60404-2:1978 is cancelled.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

The contents of the corrigendum of March 2018 have been included in this copy.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1996+AMD1:2008 CSV

MAGNETIC MATERIALS –

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

1 Scope and object

This part of IEC 60404 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 $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ on test specimens which have first been demagnetized.

Measurements at higher frequencies are to be made in accordance with IEC 60404-10.

NOTE Throughout this standard the term "magnetic polarization" is used as defined in IEC 60050(221). In some standards of the IEC 60404 series, the term "magnetic flux density" was used.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-221, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 60404-4, *Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials*

IEC 60404-8-3, *Magnetic materials – Part 8-3: Specifications for individual materials – Cold-rolled electrical non-alloyed and alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state*

IEC 60404-8-4, *Magnetic materials – Part 8-4: Specifications for individual materials – Cold-rolled non-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully-processed state*

IEC 60404-8-7, *Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully-processed state*

IEC 60404-10, *Magnetic materials – Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of magnetic sheet and strip at medium frequencies*

IEC 60404-13, *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 60404-8 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.

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 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 mm², 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 mm² 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 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 ($l_m = 0,94$ 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.

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 .

NOTE For the application of digital sampling methods, see Annex A.

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.

NOTE For the application of digital sampling methods, see Annex A.

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.

NOTE For the application of digital sampling methods, see Annex A.

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

NOTE For the application of digital sampling methods, see Annex A.

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 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 60404-13, of the test material, in kilograms per cubic metre.

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 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 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 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.

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 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 60404-4.

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:

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

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 60404-4 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 60404-13);
- 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.

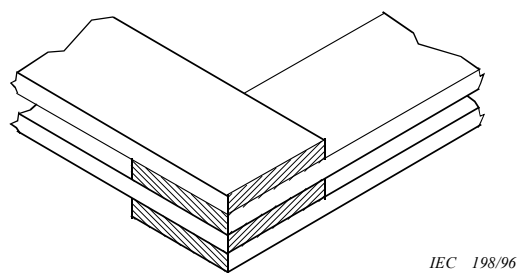


Figure 1 – Double-lapped joints

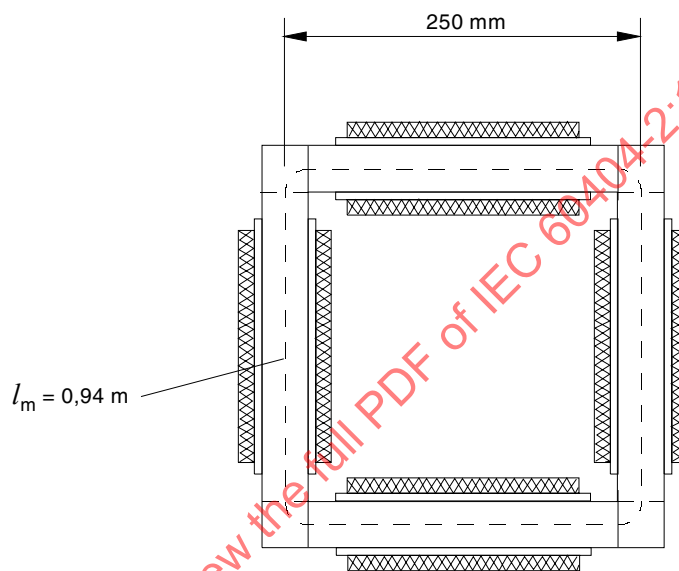
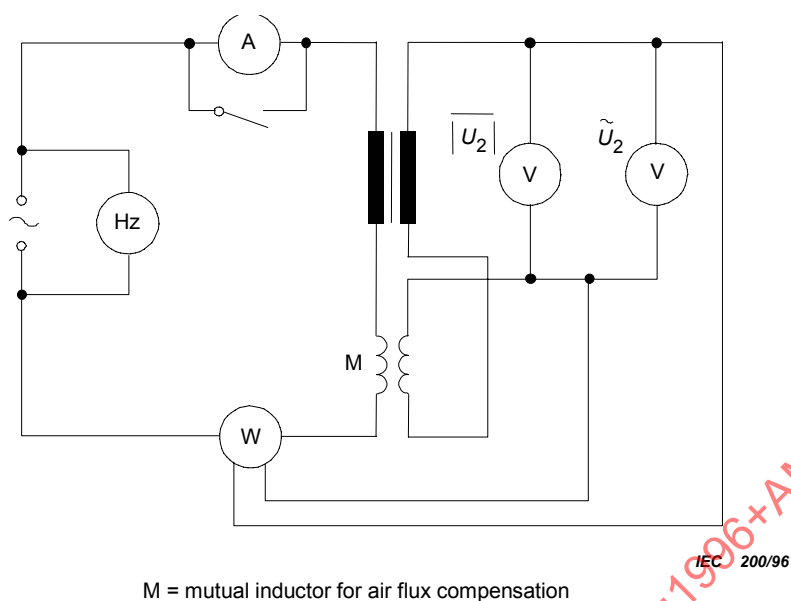
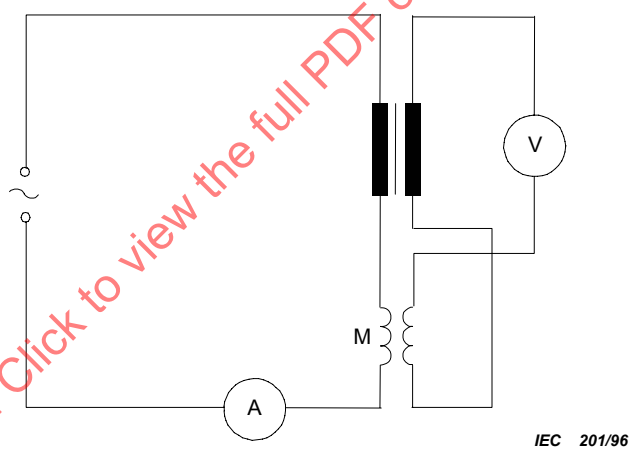


Figure 2 – The 25 cm Epstein frame



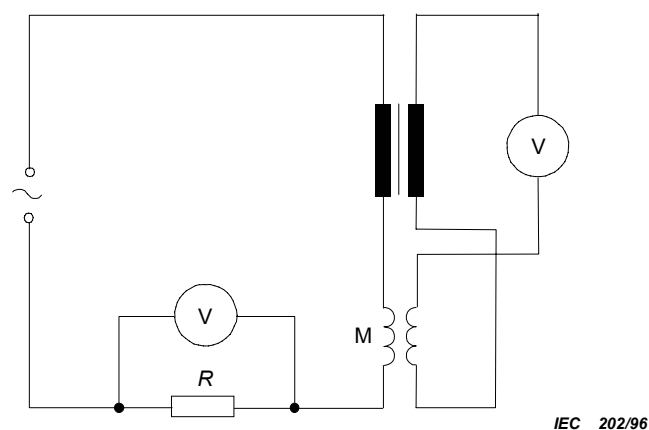
M = mutual inductor for air flux compensation

Figure 3 – Circuit for the wattmeter method



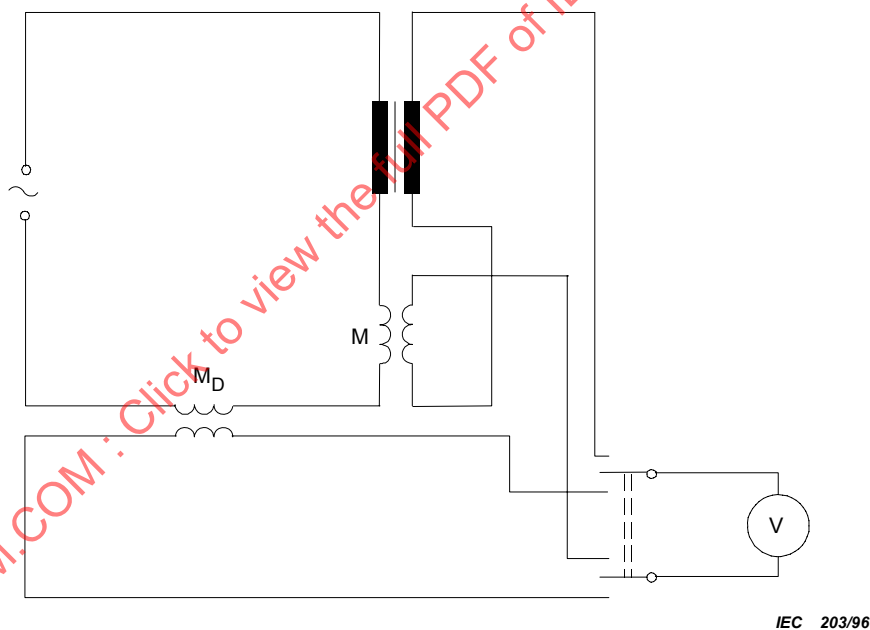
M = mutual inductor for air flux compensation

Figure 4 – Circuit for measuring the r.m.s. value of the magnetizing current



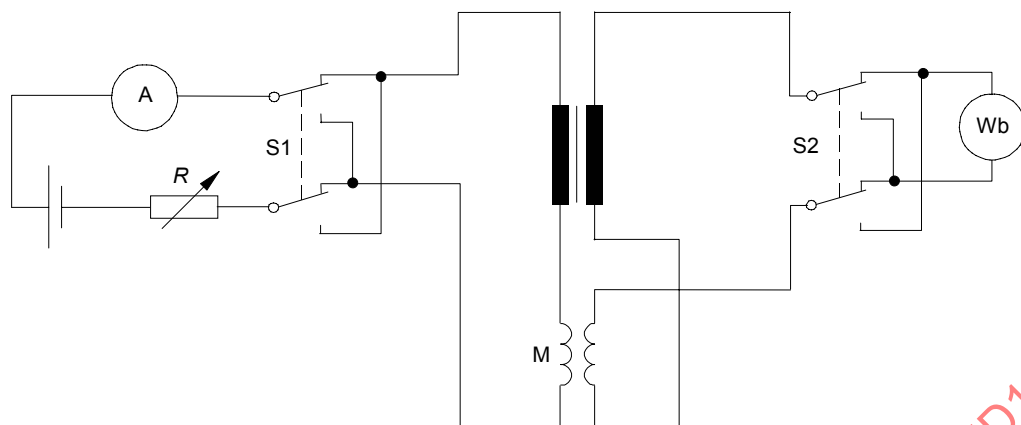
M = mutual inductor for air flux compensation

Figure 5 – Circuit for measuring the peak value of the magnetic field strength using a peak voltmeter



M = mutual inductor for air flux compensation

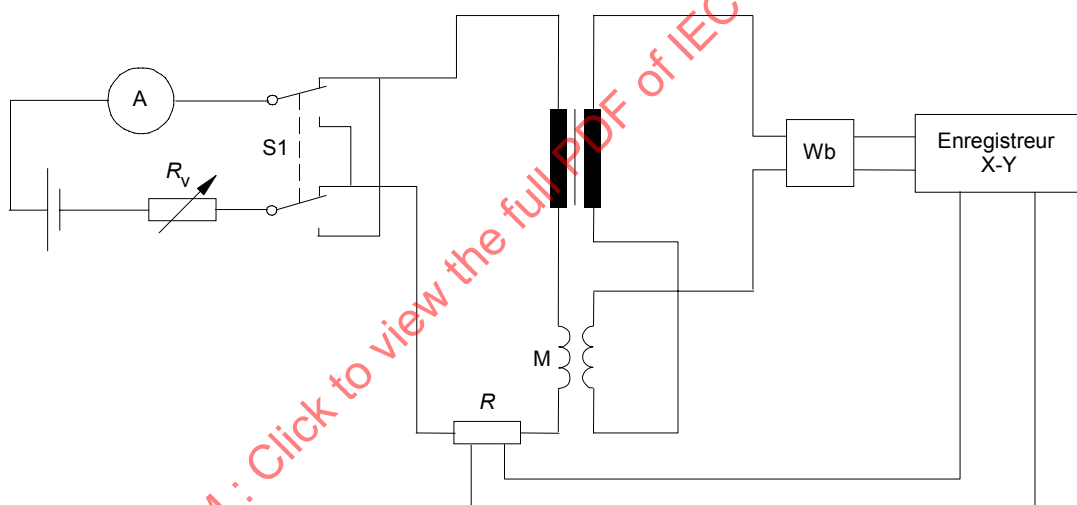
Figure 6 – Circuit for measuring the peak value of magnetic field strength using a mutual inductor M_D



M = mutual inductor for air flux compensation

IEC 204/96

Figure 7 – Circuit for d.c. testing: to obtain discrete values of magnetic polarization



M = mutual inductor for air flux compensation

IEC 205/96

Figure 8 – Circuit for d.c. testing: continuous recording method

Annex A (informative)

Digital sampling methods for the determination of the magnetic properties

A.1 General

The digital sampling method is an advanced technique that is becoming almost exclusively applied to the electrical part of the measurement procedure of this standard. It is characterized by the digitalization of the secondary voltage, $U_2(t)$, and the voltage drop across the non-inductive precision resistor in series with the primary winding (see Figure 5), $U_1(t)$, and the evaluation of the data for the determination of the magnetic properties of the test specimen. For this purpose, instantaneous values of these voltages having index j , u_{2j} and u_{1j} respectively, are sampled and held simultaneously from the time-dependent voltage functions during a narrow and equidistant time period each by sample-and-hold circuits. They are then immediately converted to digital values by analog-to-digital converters (ADC). The data pairs sampled over one or more periods together with the specimen and the set-up parameters provide complete information for one measurement. This data set enables computer processing for the determination of all magnetic properties required in this standard.

The digital sampling method may be applied to the measurement procedures which are described in the main part of this standard. The block diagram in Figure 3 applies equally to the analogue and the digital sampling method. The digital sampling method allows all functions of the measurement equipments in Figure 3 to be realized by a combined system of data acquisition equipment and software. The control of the sinusoidal waveform of the secondary voltage can also be realized by a digital method. However, the purpose and procedure of that technique are different from those of this annex and are not treated here. More information can be found in [1]¹ and [2].

This annex is helpful in understanding the impact of the digital sampling method on the precision achievable by the methods of this standard. This is particularly important because ADC circuits, transient recorders and supporting software are easily available, thus encouraging one to build one's own wattmeter. The digital sampling method can offer low uncertainty, but it leads to large errors if improperly used.

A.2 Technical details and requirements

The principle of the digital sampling method is the discretization of voltage and time, i.e. the replacement of the infinitesimal time interval dt by the finite time interval Δt :

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{fn} = \frac{1}{f_s} \quad (\text{A.1})$$

where

- Δt is the time interval between the sampling points, in seconds;
- T is the length of the magnetizing period, in seconds;
- n is the number of instantaneous values sampled over one period;
- f is the magnetizing frequency, in hertz;
- f_s is the sampling frequency, in points per seconds.

¹ The figures in brackets refer to the Bibliography.

In order to achieve lower uncertainties, the length of the magnetizing period divided by the time interval between the sampling points, i.e. the ratio f_s/f , should be an integer (Nyquist condition [5]) and the sampling frequency, f_s , should be greater than twice the input signal bandwidth.

According to an average-sensing voltmeter, the peak value of the flux density can be calculated by the sum of the u_{2j} values sampled over one period as follows:

$$\hat{J} = \frac{1}{4fN_2A} \frac{1}{T} \int_{t=0}^T |U_2(t)| dt \cong \frac{1}{4f_s N_2 A} \sum_{j=0}^{n-1} |u_{2j}| \quad (\text{A.2})$$

The calculation of the specific total loss is carried out by point-by-point multiplication of the u_{2j} and u_{1j} values and summation over one period as follows ²:

$$P_s = \frac{1}{l_m A \rho_m} \left(\frac{N_1}{RN_2} \frac{1}{T} \int_{t=0}^T U_1(t) U_2(t) dt - \frac{\tilde{U}_2^2}{R_1} \right) \cong \frac{1}{l_m A \rho_m} \left(\frac{N_1}{RN_2} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{1j} u_{2j} - \frac{1}{R_1} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{2j}^2 \right) \quad (\text{A.3})$$

where

- $\hat{J}$ is the peak value of the magnetic polarization, in teslas;
- P_s is the specific total loss of the specimen, in watts per kilogram;
- T is the length of the magnetization period, in seconds;
- N is the number of instantaneous values sampled over one period;
- f is the magnetizing frequency, in hertz;
- f_s is the sampling frequency, in points per second;
- N_1 is the number of turns of the primary winding;
- N_2 is the number of turns of the secondary winding;
- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- R is the resistance of the non-inductive precision resistor R in series with the primary winding (see Figure 5), in ohms;
- R_1 is the combined equivalent resistance of the instruments in the secondary circuit, in ohms;
- u_1 is the voltage drop across the non-inductive precision resistor R , in volts;
- u_2 is the secondary voltage, in volts;
- $\tilde{U}_2$ is the r.m.s. value of the voltage induced in the secondary winding, in volts.
- j is the running number of instantaneous values;
- l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,94$ m);
- ρ_m is the conventional density of the test material, in kilograms per cubic metre.

The pairs of values, u_{2j} and u_{1j} , can then be processed by a computer or, for real time processing, by a digital signal processor (DSP) using a sufficiently fast digital multiplier and adder without intermediate storage being required. Keeping the Nyquist condition is possible only where the sampling frequency f_s and the magnetizing frequency f are derived from a

² The peak value of the magnetic field strength and the apparent power can be calculated correspondingly by using

$$\hat{H} = \frac{N_1}{R l_m} \hat{U}_1 \quad \text{and} \quad S_s \cong \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^n u_{1j}^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^n u_{2j}^2}$$

common high frequency clock and thus have an integer ratio f_s/f . In that case, magnetization waveforms may be scanned using 128 samples per period with sufficient accuracy. This figure is, according to the Shannon theorem, determined by the highest relevant frequency in the $H(t)$ signal, which is normally not higher than that of the 41st harmonic [3]. However, some commercial data acquisition equipment cannot be synchronized with the magnetizing frequency and, as a consequence, the ratio f_s/f is not an integer, i.e. the Nyquist condition is not met. In that case, the sampling frequency should be considerably higher (500 samples per period or more) in order to keep the deviation of the true period length from the nearest time of sampled point small. Keeping the Nyquist condition becomes a decisive advantage in the case of higher frequency applications (for instance at 400 Hz which is within the scope of this standard). The use of a low-pass anti-aliasing filter [5] is recommended in order to eliminate irrelevant higher frequency components which would otherwise interact with the digital sampling process producing aliasing noise.

Regarding the amplitude resolution, studies [3,4] have shown that below a 12 bit resolution the digitalization error can be considerable, particularly for non-oriented material with high silicon content. Thus, at least a 12 bit resolution of the given amplitude is recommended. Moreover, the two voltage channels should transfer the signals without a significant phase shift. The phase shift should be small enough so that the power measurement uncertainty specified in this standard, namely 0,5 %, is not exceeded. The consideration of the phase shift is more relevant the lower the power factor $\cos(\varphi)$ becomes (φ being the phase shift between the fundamental components of the two voltage signals). For this reason the concept of a single channel with multiplexer leading to different sampling times for the instantaneous values of the two voltages is not to be recommended

Signal conditioning amplifiers are preferably d.c. coupled to avoid any low frequency phase shift. However, d.c. offsets in the signal conditioning amplifiers can lead to significant errors in the numerically calculated values. Numerical correction cancelling can be applied to remove such d.c. offsets.

A.3 Calibration aspects

The verification of the repeatability and reproducibility requirements of this standard make careful calibration of the measurement equipment necessary. The two voltage channels including preamplifiers and ADC can be calibrated using a calibrated reference a.c. voltage source [6]. In addition, the phase performance of the two channels and its dependence on the frequency should be verified and possibly be taken into account with the evaluation processing in the computer. In any case, it would not be sufficient to calibrate the set-up using reference samples because that calibration would only be effective for that combination of material and measurement condition. .

Bibliography

- [1] FIORILLO, F., *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism. Academic Press (2004), ISBN: 0-12-257251-3.
- [2] Annex B: “*Sinusoidal waveform control by digital means*” from IEC 60404-6:2003, *Magnetic materials – Part 6:Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens*
- [3] AHLERS, H. and SIEVERT, J., *Uncertainties of Magnetic Loss Measurements, particularly in Digital Procedures*. PTB-Mitt. 94 (1984) p. 99-107.
- [4] De WULF, M. and MELKEBEEK, J., *On the advantage and drawbacks of using digital acquisition systems for the determination of magnetic properties of electrical steel sheet and strip*. J. Magn. Magn. Mater., 196-197 (1999) p.940-942.
- [5] STEARNS, S.D., *Digital signal analysis*. 5th Edition, Hayden Book (1991), ISBN: 0-8104-5828-4.
- [6] AHLERS, H., *Precision calibration procedure for magnetic loss testers using a digital two-channel function generator*. SMM11 Venice 1993, J. Magn. Magn. Mater., 133 (1994) p.437-439.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1996+A1:2008 CSV

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1996+AMD1:2008 CSV

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	28
1 Domaine d'application et objet	30
2 Références normatives	30
3 Principes généraux des mesures en courant alternatif	31
3.1 Principe de la méthode du cadre Epstein de 25 cm	31
3.2 Eprouvette	31
3.3 Cadre Epstein de 25 cm	31
3.4 Compensation du flux dans l'air	33
3.5 Source d'alimentation	33
3.6 Mesurage de la tension	33
3.7 Mesurage de la fréquence	34
3.8 Mesurage de la puissance	34
4 Mode opératoire pour la mesure des pertes totales spécifiques	34
4.1 Préparation du mesurage	34
4.2 Réglage de la source d'alimentation	35
4.3 Mesurage de la puissance	35
4.4 Détermination des pertes totales spécifiques	36
4.5 Reproductibilité du mesurage des pertes totales spécifiques	36
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	37
5.1 Eprouvette	37
5.2 Principe de mesure	37
5.3 Reproductibilité	39
6 Principes généraux des mesures en courant continu	39
6.1 Principe de la méthode du cadre Epstein de 25 cm	39
6.2 Eprouvette	39
6.3 Cadre Epstein de 25 cm	39
6.4 Compensation du flux dans l'air	39
6.5 Source d'alimentation	40
6.6 Précision de l'appareillage	40
7 Mode opératoire pour la mesure de la polarisation magnétique en courant continu	40
7.1 Préparation du mesurage	40
7.2 Détermination de la polarisation magnétique	40
7.3 Détermination du cycle d'hystérésis magnétique	41
7.4 Reproductibilité du mesurage de la polarisation magnétique	41
8 Rapport d'essai	41
Annexe A (informative) Méthodes d'échantillonnage numérique pour la détermination des propriétés magnétiques	46
Bibliographie	49

Figure 1 – Joints à double recouvrement.....	42
Figure 2 – Cadre Epstein de 25 cm	42
Figure 3 – Circuit pour la méthode du wattmètre	43
Figure 4 – Circuit pour la mesure de la valeur efficace du courant d'excitation.....	43
Figure 5 – Circuit pour la mesure de la valeur crête de l'intensité du champ magnétique utilisant un voltmètre de crête	44
Figure 6 – Circuit pour la mesure de la valeur crête de l'intensité du champ magnétique utilisant une inductance mutuelle M_D	44
Figure 7 – Circuit pour les essais en courant continu: obtention de valeurs discrètes de la polarisation magnétique	45
Figure 8 – Circuit pour les essais en courant continu: méthode d'enregistrement en continu	45

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1996+AMD1:2008 CSY

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

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

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). 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 de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI 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 60404-2 a été établie par le comité d'études 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette version consolidée de la CEI 60404-2 comprend la troisième édition (1996) [documents 68/119/FDIS et 68/135/RVD] et son amendement 1 (2008) [documents 68/365/FDIS et 68/369/RVD].

Le contenu technique de cette version consolidée est donc identique à celui de l'édition de base et à son amendement; cette version a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

Elle porte le numéro d'édition 3.1.

Une ligne verticale dans la marge indique où la publication de base a été modifiée par l'amendement 1.

La présente norme remplace les chapitres I, II, IV et V de la CEI 60404-2:1978.

La norme CEI 60404-11 remplace le chapitre VIII de la CEI 60404-2:1978.

La norme CEI 60404-13 remplace les chapitres VI, VII et IX de la CEI 60404-2:1978.

Le chapitre III de la CEI 60404-2:1978 est annulé.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de ses amendements ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

Le contenu du corrigendum de mars 2018 a été pris en considération dans cet exemplaire.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-2:1996+AMD1:2008 (EN)

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

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

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 60404 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 $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sur des éprouvettes préalablement désaimantées.

Les mesurages à plus hautes fréquences sont à effectuer conformément à la CEI 60404-10.

NOTE Dans cette norme le terme «polarisation magnétique» est utilisé conformément à sa définition de la CEI 60050(221). Dans certaines normes des séries CEI 60404, le terme «densité de flux magnétique» a été utilisé.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050-221, *Vocabulaire Electrotechnique International – Chapitre 221: Matériaux et composants magnétiques*

CEI 60404-4, *Matériaux magnétiques – Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux*

CEI 60404-8-3, *Matériaux magnétiques – Partie 8-3: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles et bandes magnétiques en acier non allié et en acier allié, laminées à froid, livrées à l'état semi-fini*

CEI 60404-8-4, *Matériaux magnétiques – Partie 8-4: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles magnétiques en acier à grains non orientés, laminées à froid et livrées à l'état fini*

CEI 60404-8-7, *Matériaux magnétiques – Partie 8-7: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles magnétiques en acier à grains orientés, laminées à froid et livrées à l'état fini*

CEI 60404-10, *Matériaux magnétiques – Partie 10: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques à fréquences moyennes des tôles et feuillards magnétiques en acier*

CEI 60404-13, *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 60404-8.

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.

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^{+1}_{-0} 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.

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 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 ($l_m = 0,94$ 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.

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 .

NOTE Pour l'application de méthodes d'échantillonnage numérique, voir l'Annexe A.

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

NOTE Pour l'application de méthodes d'échantillonnage numérique, voir l'Annexe A.

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.

NOTE Pour l'application de méthodes d'échantillonnage numérique, voir l'Annexe A.

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

NOTE Pour l'application de méthodes d'échantillonnage numérique, voir l'Annexe A.

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 mm. Dans le cas de bandes découpées moitié dans la direction parallèle et moitié dans 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 60404-13, en kilogrammes par mètre cube.

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.

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 $\tilde{H}$;
- 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:

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

où

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

$\tilde{I}_1$ 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);

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

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 ($l_m = 0,94 \text{ m}$);

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.

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 ($l_m = 0,94 \text{ m}$);

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 Eprouvette

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.

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 60404-4.

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:

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

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 60404-4, 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 60404-13);
- 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.