

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Magnetic materials –

Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester

Matériaux magnétiques –

Partie 3: Méthodes de mesure des caractéristiques magnétiques des bandes et tôles magnétiques en acier à l'aide de l'essai sur tôle unique



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester

Matériaux magnétiques –

Partie 3: Méthodes de mesure des caractéristiques magnétiques des bandes et tôles magnétiques en acier à l'aide de l'essai sur tôle unique

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

CF

ICS 17.220.20; 29.030

ISBN 978-2-88910-186-3

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Object and field of application	5
2 Normative references	6
3 General principles	6
3.1 Principle of the method.....	6
3.2 Test apparatus	6
3.3 Air flux compensation	7
3.4 Test specimen	8
3.5 Power supply.....	8
4 Determination of the specific total loss	8
4.1 Principle of measurement	8
4.2 Apparatus.....	8
4.3 Measurement procedure of the specific total loss	9
5 Determination of magnetic field strength, excitation current and specific apparent power	11
5.1 Principle of measurement	12
5.2 Apparatus.....	12
5.3 Measuring procedure.....	13
5.4 Determination of characteristics	14
5.5 Reproducibility	16
Annex A (normative) Requirements concerning the manufacture of yokes	19
Annex B (informative) Calibration of the test apparatus with respect to the Epstein frame	20
Annex C (informative) Epstein to SST relationship for grain-oriented sheet steel	21
Annex D (informative) Digital sampling methods for the determination of the magnetic properties	24
Bibliography.....	27
Figure 1 – Diagram of the test apparatus	17
Figure 2 – Yoke dimensions.....	17
Figure 3 – Diagram of the connections of the five coils of the primary winding	17
Figure 4 – Circuit for the determination of the specific total loss	18
Figure 5 – Circuit for measuring the r.m.s. value of the excitation current	18
Figure 6 – Circuit for measuring the peak value of the magnetic field strength	18
Figure C.1 – Epstein-SST conversion factor δP for grain-oriented material versus magnetic polarization J	23
Figure C.2 – Epstein-SST conversion factor δHS for grain-oriented material versus magnetic polarization J	23
Table C.1 – Epstein-SST conversion factors δP and δHS for grain-oriented material in the polarization range 1,0 T to 1,8 T	22

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

**Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties
of electrical steel strip and sheet by means
of a single sheet tester**

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 itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 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 60404-3 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This consolidated version of IEC 60404-3 consists of the second edition (1992) [documents 68(CO)68+75 and 68(CO)77+79], its amendment 1 (2002) [documents 68/258/FDIS and 68/263/RVD], its amendment 2 (2009) [documents 68/389/CDV and 68/397/RVC] and its corrigendum of December 2009.

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

It bears the edition number 2.2.

A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendments 1 and 2.

Annex A forms an integral part of this standard.

Annex B, C and D are for information only.

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.

IMPORTANT – The “colour inside” logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this publication using a colour printer.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester

1 Object and field of application

The object of this part is to define the general principles and the technical details of the measurement of the magnetic properties of magnetic sheets by means of a single sheet tester.

This part of IEC 60404 is applicable at power frequencies to:

- a) grain oriented magnetic sheet and strip:
 - for the measurement between 1,0 T and 1,8 T of:
 - specific total loss;
 - specific apparent power;
 - r.m.s. value of the magnetic field strength;
 - for the measurement up to peak values of magnetic field strength of 1 000 A/m of:
 - peak value of the magnetic polarization;
 - peak value of the magnetic field strength.
- b) non-oriented magnetic sheet and strip:
 - for the measurement between 0,8 T and 1,5 T of:
 - specific total loss;
 - specific apparent power;
 - r.m.s. value of excitation current;
 - for the measurement up to peak values of magnetic field strength of 10 000 A/m of:
 - peak value of the magnetic polarization;
 - peak value of the magnetic field strength.

The single sheet tester is applicable to test specimens obtained from magnetic sheets and strips of any quality. The magnetic characteristics are determined for a sinusoidal induced voltage, for specified peak values of magnetic polarization and for a specified frequency.

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

NOTE Throughout this part the quantity "magnetic polarization" is used as defined in IEC 60050(901). In some standards of the IEC 60404 series, the quantity "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 – Part 221: Magnetic materials and components*

IEC 60404-2, *Magnetic materials – Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame*

3 General principles

3.1 Principle of the method

The test specimen comprises a sample of magnetic sheet and is placed inside two windings:

- an exterior primary winding (magnetizing winding);
- an interior secondary winding (voltage winding).

The flux closure is made by a magnetic circuit consisting of two identical yokes, the cross-section of which is very large compared with that of the test specimen (see figure 1).

To minimize the effects of pressure on the test specimen, the upper yoke shall be provided with a means of suspension which allows part of its weight to be counterbalanced in accordance with 3.2.1.

Care shall be taken to ensure that temperature changes are kept below a level likely to produce stress in the test specimen due to thermal expansion or contraction.

3.2 Test apparatus

3.2.1 Yokes

Each yoke is in the form of a U made up of insulated sheets of grain oriented silicon steel or nickel iron alloy. It shall have a low reluctance and a specific total loss not greater than 1,0 W/kg at 1,5 T and 50 Hz. It shall be manufactured in accordance with the requirements of annex A.

In order to reduce the effect of eddy currents and give a more homogeneous distribution of the flux over the inside of the yokes, the latter shall be made of a pair of C-cores or a glued stack of laminations in which case the corners shall have staggered butt joints (see figure 1).

The yoke shall have pole faces having a width of $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

The two pole faces of each yoke shall be coplanar to within 0,5 mm and the gap between the opposite pole faces of the yokes shall not exceed 0,005 mm at any point. Also, the yokes shall be rigid in order to avoid creating mechanical stresses in the test specimen.

The height of each yoke shall be between 90 mm and 150 mm. Each yoke shall have a width of 500^{+5}_{-5} mm and an inside length of $450 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (see figure 2).

NOTE It is recognized that other yoke dimensions can be used provided that the comparability of the results can be demonstrated.

There shall be a non-conducting, non-magnetic support between the vertical limbs of the yokes on which the test specimen is placed. This support shall be centered and located in the same plane as the pole faces so that the test specimen is in direct contact with the pole faces without any gap.

The upper yoke shall be movable upwards to permit insertion of the test specimen. After insertion the upper yoke shall be realigned accurately with the bottom yoke. The suspension of the upper yoke shall allow part of its weight to be counterbalanced so as to give a force on the test specimen of between 100 N and 200 N.

NOTE The square shape of the yoke has been chosen in order to have only one test specimen for non-oriented material. By rotating the test specimen through 90° it is possible to determine the characteristics in the rolling direction and perpendicular to the rolling direction.

3.2.2 Windings

The primary and secondary windings shall be at least 440 mm in length and shall be wound on a non-conducting, non-magnetic, rectangular former. The dimensions of the former shall be as follows:

- length: $445 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$;
- internal width: $510 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$;
- internal height: 5^{+0}_{-2} mm ;
- height: $\leq 15 \text{ mm}$.

The primary winding can be made up of:

- either five or more coils having identical dimensions and the same number of turns connected in parallel and taking up the whole length (see figure 3). For example, with five coils, each coil can be made up of 400 turns of copper wire 1 mm in diameter, wound in five layers;
- or a single continuous and uniform winding taking up the whole length. For example this winding can be made up of 400 turns of copper wire 1 mm in diameter, wound in one or more layers.

The number of turns on the secondary winding will depend on the characteristics of the measuring instruments.

3.3 Air flux compensation

Compensation shall be made for the effect of air flux. This can be achieved, for example, by a mutual inductor. The primary winding of the mutual inductor is connected in series with the primary winding of the test apparatus, while the secondary winding of the mutual inductor is connected to the secondary winding of the test apparatus in series opposition.

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.

3.4 Test specimen

The length of the test specimen shall be not less than 500 mm. Although the part of the specimen situated outside the pole faces has no great influence on the measurement, this part shall not be longer than is necessary to facilitate insertion and removal of the test specimen.

The width of the test specimen shall be as large as possible and at its maximum equal to the width of the yokes.

For maximum accuracy, the minimum width shall be not less than 60 % of the width of the yokes.

The test specimen shall be cut without the formation of excessive burrs or mechanical distortion. The test specimen shall be plane. When a test specimen is cut, the edge of the parent strip is taken as the reference direction. The following tolerances are allowed for the angle between the direction of rolling and that of cutting:

±1° for grain oriented steel sheet;

±5° for non-oriented steel sheet.

For non-oriented steel sheet, two specimens shall be cut, one parallel to the direction of rolling and the other perpendicular unless the test specimen is square, in which case one test specimen only is necessary.

3.5 Power supply

The power supply shall be of low internal impedance and shall be highly stable in terms of voltage and frequency. During the measurement, the voltage and the frequency shall be maintained constant within ±0,2 %.

In addition, the waveform of the secondary induced voltage shall be maintained as sinusoidal as possible. It is preferable to maintain the form factor of the secondary voltage to within ±1 % of 1,111. This can be achieved by various means, for example by using an electronic feedback amplifier.

4 Determination of the specific total loss

4.1 Principle of measurement

The single sheet tester with the test specimen represents an unloaded transformer the total loss of which is measured by the circuit shown in figure 4.

4.2 Apparatus

4.2.1 Voltage measurement

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

4.2.1.1 Average type voltmeter

The secondary rectified voltage of the test apparatus shall be measured by an average type voltmeter. The preferred instrument is a digital voltmeter having an accuracy of ±0,2 %.

NOTE Instruments of this type are usually graduated in average rectified value multiplied by 1,111.

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

4.2.1.2 R.M.S. voltmeter

A voltmeter responsive to r.m.s. values shall be used. The preferred instrument is a digital voltmeter having an accuracy of $\pm 0,2$ %.

4.2.2 Frequency measurement

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

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

4.2.3 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 D.

The resistance of the voltage circuit of the wattmeter shall be at least 100 Ω/V for all ranges. If necessary, the losses in the secondary circuit shall be subtracted from the indicated loss value.

The ohmic resistance of the wattmeter voltage circuit 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 is adjusted and the losses are measured.

4.3 Measurement procedure of the specific total loss

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

4.3.1 Preparation of measurement

The length of the test specimen shall be measured with an accuracy of $\pm 0,1$ % and its mass determined within $\pm 0,1$ %. The test specimen shall be loaded and centred on the longitudinal and transverse axes of the test coil, and the partly counterbalanced upper yoke shall be lowered.

Before the measurement, the test specimen shall be demagnetized by slowly decreasing an alternating magnetic field starting from well above the value to be measured.

4.3.2 Source setting

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

$$\overline{U_2} = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} A \hat{J} \quad (1)$$

where

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

f is the frequency, in hertz;

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

R_t is the series resistance of the secondary windings of the test apparatus and mutual inductor, in ohms;

N_2 is the number of turns of the secondary winding;

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

$\hat{J}$ is the peak value of magnetic polarization, in tesla.

The cross-sectional area A is given by the equation:

$$A = \frac{m}{l \rho_m} \quad (2)$$

where

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

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

ρ_m is the density of the test material, in kilograms per cubic metre.

4.3.3 Measurements

4.3.3.1 The ammeter, if any, in the primary circuit shall be observed to ensure that the current circuit of the wattmeter is not overloaded. The ammeter shall then be short-circuited and the secondary voltage readjusted.

After checking the waveform of the secondary voltage, the wattmeter shall be read. The value of the specific total power loss shall then be calculated from the equation:

$$P_s = \left[P \frac{N_1}{N_2} - \frac{(1,111 \overline{U_2})^2}{R_i} \right] \frac{l}{m l_m} \quad (3)$$

where

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

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

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

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

l_m is the conventional magnetic path length, in metres ($l_m = 0,45$ m);

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

N_1 is the number of turns of the primary winding;

N_2 is the number of turns of the secondary winding;

R_i is the combined resistance of instruments in the secondary circuit, in ohms.

NOTE 1 Studies* have shown that the inside length of the yokes is an appropriate mean value for the effective magnetic path length l_m for different materials and polarization values.

NOTE 2 A long established practice in a few countries is to calibrate the test apparatus by determination of the effective magnetic path length based on specific total power loss measurements made in an Epstein frame. The details of the calibration procedure are described in annex B. This practice is permitted only for the evaluation of magnetic sheet and strip intended for consumption in those countries.

4.3.3.2 In the case of non-oriented material, for values of the specific total loss specified in the product standards for magnetic materials, the reported value of the specific total loss shall be calculated as the average of the two measurements made for the directions parallel and perpendicular to the direction of rolling. For other purposes the values of the specific total loss parallel and perpendicular to the direction of rolling shall be reported separately.

4.3.4 Reproducibility

The reproducibility of this method using the test apparatus defined above is characterized by a relative standard deviation of 1 % for grain oriented steel sheet and 2 % for non-oriented steel sheet.

5 Determination of magnetic field strength, excitation current and specific apparent power

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

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

* J. D. Sievert, Determination of AC Magnetic Power Loss of Electrical Steel Sheet: Present Status and Trends, IEEE Trans. Mag. Vol. 20, No. 5 (1984) 1702-1707.

5.1 Principle of measurement

5.1.1 Peak value of magnetic polarization

The peak value of magnetic polarization shall be derived from the average value of the rectified secondary voltage measured as described in 4.2.1.

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

The r.m.s. value of the excitation current shall be measured by an r.m.s. ammeter in the circuit shown in figure 5.

5.1.3 Peak value of the magnetic field strength

The peak value of the magnetic field strength shall be obtained from the peak value $\hat{I}$ of the primary current. This shall be determined by measuring the voltage drop across a known precision resistor R_n using a peak voltmeter as shown in figure 6.

5.2 Apparatus

5.2.1 Average type voltmeter

The secondary rectified voltage of the test apparatus shall be measured by an average type voltmeter. The preferred instrument is a digital voltmeter having an accuracy of $\pm 0,2$ %.

NOTE Instruments of this type are usually graduated in average rectified value multiplied by 1,111.

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

5.2.2 Current measurement

The r.m.s. value of the primary current shall be measured either by means of an r.m.s. ammeter of low impedance of class 0,5 or better (see figure 5), or by using a precision resistor and r.m.s. electronic voltmeter (see figure 6).

5.2.3 Peak current measurement

The measurement of the peak voltage across resistor R_n (see figure 6) shall be achieved either by means of an electronic voltmeter of high sensitivity indicating the peak value, or by means of a calibrated oscilloscope.

The full scale error of the device used shall be ± 3 % or better.

5.2.4 Power supply

The power supply shall be in accordance with 3.5.

5.2.5 Resistor R_n

The method shown in figure 6 requires a precision non-inductive resistor of a value known to within $\pm 0,5 \%$.

The resistance value to be chosen depends upon the sensitivity of the peak voltmeter. It shall not exceed 1Ω in order to minimize the distortion of the induced voltage waveform.

5.3 Measuring procedure

5.3.1 Preparation for measurement

The length of the test specimen shall be measured with an accuracy of $\pm 0,1 \%$ and its mass determined within $\pm 0,1 \%$. The test specimen shall be loaded and centered on the longitudinal and transverse axes of the test coil, and the partly counterbalanced upper yoke shall be lowered.

Before the measurement, the test specimen shall be demagnetized by slowly decreasing an alternating magnetic field starting from well above the value to be measured.

5.3.2 Measurement

In practice, single values or groups of values of magnetic polarization $\hat{J}$ and magnetic field strength ($\hat{H}$ or $\tilde{H}$) are determined.

If the magnetic field strength is specified and the magnetic polarization is to be determined, the primary current shall be set to give the relevant magnetic field strength (see below). Then the secondary voltage of the single sheet tester shall be read on the average type voltmeter (see 4.3.2).

Again, if the magnetic polarization is specified and the magnetic field strength is to be determined, the secondary voltage shall be set to its specified value as described in 4.3.2.

For the determination of $\tilde{H}$, the r.m.s. value of the primary current shall be read on the ammeter according to the circuit of figure 5 or on the voltmeter according to the circuit of figure 6.

For the determination of $\hat{H}$, the peak value of the voltage drop across resistor R_n shall be read on the peak voltmeter.

5.3.3 Non-oriented material

In the case of non-oriented material, for the peak value of the magnetic polarization $\hat{J}$ specified in the product standards for magnetic materials, the reported value of $\hat{J}$ shall be calculated as the average of the two measurements made for the directions parallel and perpendicular to the direction of rolling. For values of $\hat{J}$ for other purposes and for the measurement of specific apparent power and the r.m.s. value of excitation current, the values parallel and perpendicular to the direction of rolling shall be reported separately.

5.4 Determination of characteristics

5.4.1 Determination of $\hat{J}$

The peak value of the magnetic polarization is given by the equation:

$$\hat{J} = \frac{1}{4 f N_2 A} \overline{U_2} \quad (4)$$

To obtain $\overline{U_2}$, the voltmeter reading shall be corrected by the factor:

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

where

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

f is the frequency, in hertz;

N_2 is the number of turns of the secondary winding;

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

R_v is the voltmeter internal resistance, in ohms;

R_2 is the resistance of the secondary winding, in ohms;

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

5.4.2 Determination of $\tilde{H}$

The r.m.s. value of the magnetic field strength shall be calculated from the r.m.s. value of primary current indicated by the ammeter according to the circuit of figure 5 or by the voltmeter according to the circuit of figure 6:

$$\tilde{H} = \frac{N_1}{l_m} \tilde{I}_1; \quad (5)$$

where

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

N_1 is the number of turns of the primary winding;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,45$ m);

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

After several groups of corresponding values of $\hat{J}$ and $\tilde{H}$ have been determined, the magnetization curve of $\hat{J}$ against $\tilde{H}$ can be drawn.

5.4.3 Determination of $\hat{H}$

The peak value of the magnetic field strength shall be calculated from the reading $\hat{U}_m$ of the peak voltmeter:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{R_n l_m} \hat{U}_m \quad (6)$$

where

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

R_n is the resistance value of the precision resistor in figure 6, in ohms;

$\hat{U}_m$ is the peak voltage drop across R_n , in volts.

NOTE The amplitude permeability is expressed as:

$$\mu_a = \frac{\hat{J}}{\mu_0 \hat{H}} + 1$$

5.4.4 Determination of S_s

The apparent power is given by:

$$S = \tilde{I}_1 \cdot \tilde{U}_2 \frac{N_1}{N_2} = \tilde{I}_1 \cdot 1,111 \cdot \overline{|U_2|} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

where

S is the apparent power, in voltamperes;

$\tilde{U}_2$ is the r.m.s. value of secondary voltage of the single sheet tester, in volts.

NOTE The relation $\tilde{U}_2 = 1,111 \overline{|U_2|}$ is valid only for sinusoidal voltage.

Division of this quantity by the effective mass $m_a = \frac{l_m}{l} m$ gives the specific apparent power:

$$S_s = \frac{S}{m_a} = \frac{\tilde{I}_1 \cdot 1,111 \cdot \overline{|U_2|} l N_1}{m l_m N_2} \quad (8)$$

where

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

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

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

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

N_1 is the number of turns of the primary winding;

N_2 is the number of turns of the secondary winding;

l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,45$ m);

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

5.5 Reproducibility

The reproducibility of this method using the test apparatus defined above is characterized by a relative standard deviation of 3 % or less.

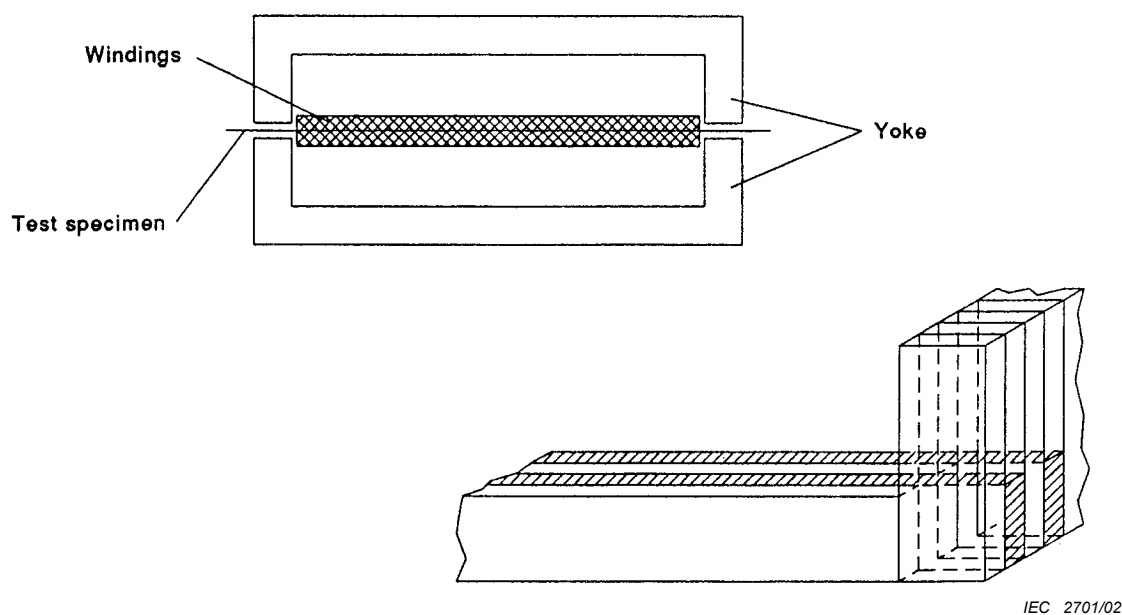


Figure 1 – Diagram of the test apparatus

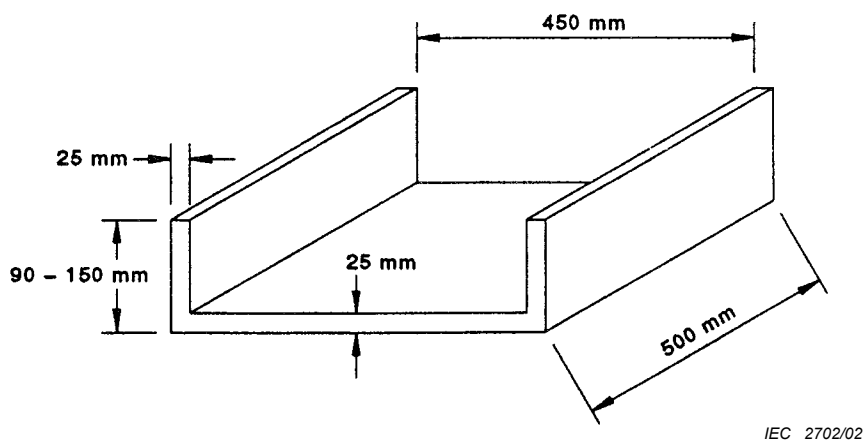


Figure 2 – Yoke dimensions

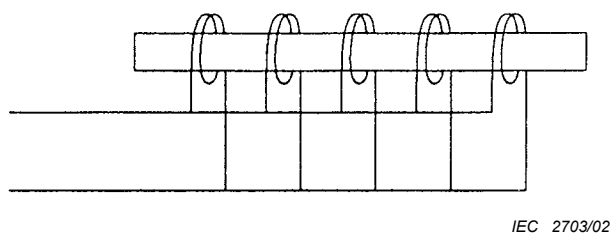
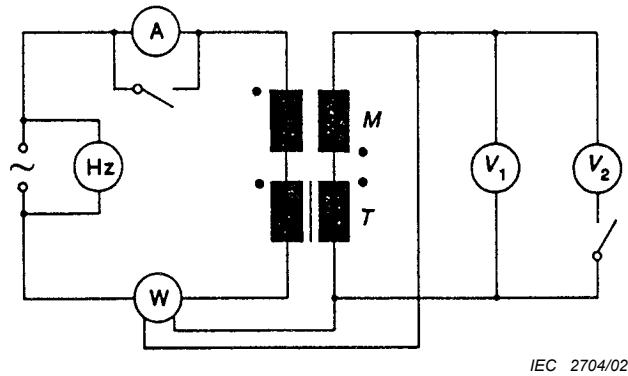


Figure 3 – Diagram of the connections of the five coils of the primary winding



- V_1 measures average rectified voltage
- V_2 measures r.m.s. voltage
- M is the mutual inductor
- T is the test frame

Figure 4 – Circuit for the determination of the specific total loss

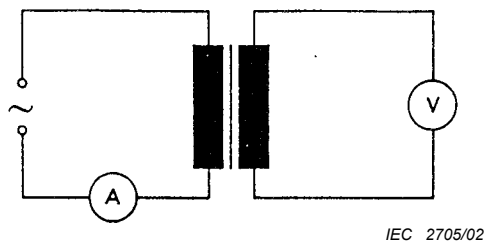


Figure 5 – Circuit for measuring the r.m.s. value of the excitation current

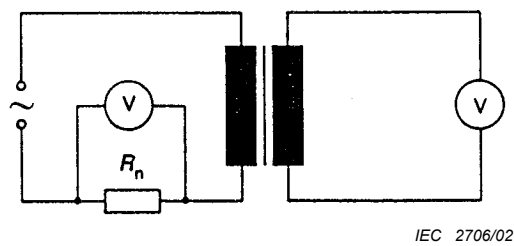


Figure 6 – Circuit for measuring the peak value of the magnetic field strength

Annex A

(normative)

Requirements concerning the manufacture of yokes

It is important to ensure that the loss in the yokes is low and constant. A loss of 1 mW/kg at a magnetic flux density of 40 mT is typical, measured at a frequency of 50 Hz. One of the ways in which losses can become high is due to short circuits between laminations in the yoke. For the measurement of the power loss in the yokes a primary and a secondary winding wound on the yokes may be used; 25 turns are sufficient for each of these windings.

It is necessary to test the interlaminar resistance between parts of the yoke by use of an ohmmeter and probes.

During the manufacture of the yokes, a stress relief annealing of the cut strips is required. After bonding the material to build the yokes (which shall be done without application of high pressure), the pole faces shall be machined. Parallelism shall be proven with an appropriate gauge, and the uniformity of the air gap checked using engineers blue. Further grinding in stages using carborundum and diamond paste will probably be necessary until a uniform distribution of the engineers blue indicates a sufficiently homogeneous air gap. The grinding can be carried out by putting the upper yoke in the normal position of use on top of the bottom yoke and moving it to and fro through a small distance.

The process of grinding causes the metal to flow between laminations and produces short circuits. It is important to remove this flowed metal by a careful acid etching process using a non-oxidizing acid (e.g. hydrochloric acid). This consists in rubbing the pole faces with an acid-soaked cloth until the flowed layer is removed. It is important to carefully wash and neutralize the steel.

It is helpful to measure the yoke losses before and after grinding and etching to verify that the loss has been reduced by this treatment.

A final check on interlaminar insulation shall be made after pole face etching and cleaning.

Before use, the yokes shall be carefully demagnetized from a magnetic flux density well above the highest magnetic flux density which would occur in the yokes during use

Annex B (informative)

Calibration of the test apparatus with respect to the Epstein frame

NOTE This annex does not form part of the requirements of the standard. It is included for information for those who wish to obtain the correlation between measurements taken by this method and the Epstein frame method (see note 2, page 19).

The calibration of the test apparatus consists in the determination of the effective length of its magnetic circuit from the measurement of the specific total loss in the Epstein frame.

This determination of the effective length of the magnetic circuit is made for each grade of material and each magnetic flux density for which the specific total power losses are to be determined.

Firstly the specific total power losses are measured by means of an Epstein frame in accordance with IEC 60404-2 (except that, in the case of non-oriented material, all the strips loaded in the Epstein frame shall be of the same orientation).

Then, at least 12 strips which have already been measured in the Epstein frame shall be placed side by side in the test apparatus. The losses are measured again by the apparatus for a magnetic flux density identical to that used in the determination of the specific total power loss in the Epstein frame.

The effective length l_m of the magnetic circuit is then calculated in accordance with the equation:

$$l_m = \frac{Pl}{mP_{sE}} \quad (B.1)$$

where

P is the power measured by the wattmeter connected with the test apparatus, in watts;

l is the length of the Epstein strips, in metres;

m is the total mass of Epstein strips placed in the test apparatus, in kilograms;

P_{sE} is the specific total power loss determined by the Epstein frame, in watts per kilogram.

NOTE In the case of non-oriented materials, there will be two effective path lengths: one for each direction of sampling.

Annex C (informative)

Epstein to SST relationship for grain-oriented sheet steel

NOTE This annex does not form part of the requirements of the standard. It is included for information for those who wish to convert SST values into Epstein values and vice versa. There are two significant differences from the procedure in annex B as follows:

- annex B prescribes the procedure of the calibration of an SST by means of long Epstein strips. It yields an exact value for the Epstein/SST calibration factor for the individual sample under consideration;
- by cutting the sheets into strips, the procedure of annex B yields an Epstein/SST calibration factor which refers to a stress-free sheet sample which is formed from the annealed Epstein strips. When using this calibration procedure, specific total loss values determined for sheet specimens will agree more closely with those determined using corresponding Epstein specimens if the sheet specimens are stress free, and will differ more from Epstein values if the sheets are not stress free.

Annex C, on the other hand, describes the conversion of SST to Epstein values and vice versa in general, i.e. where only one of the two methods of measurements has been performed. Annex C is restricted to grain-oriented material. Of course, the general validity of the presented relationships is subject to the larger uncertainty of the conversion, because the statistical scatter due to the internal stress, etc. of the individual sheet sample is considerable. This amounts to about $\pm 2\%$ (for the whole range of J) for the specific total loss, P , from about $\pm 3\%$ (at $J = 1,3$ T) to $\pm 10\%$ (at $1,7$ T) for the field strength quantities, H , and from about $\pm 5\%$ (at $1,3$ T) to $\pm 20\%$ (at $1,7$ T) for the specific apparent power, S [1] and [2]¹.

The relationships were achieved on the basis of Epstein and SST measurements on about 750 samples of the most significant grain-oriented grades, supplied by eight different manufacturers and taken from different production runs. For further details see [1] and [2]. This study did not include domain-refined materials. However, it is the decision of the user of this standard whether or not to apply annex C to domain refined materials.

The relationship between Epstein and SST results can be described by a factor δP (for the specific total loss, P) and δHS (for the magnetic field strength, H and the specific apparent power, S). The conversion of Epstein results, $P_{s,EPs}$, H_{EPs} and $S_{s,EPs}$, to SST results, $P_{s,SST}$, H_{SST} and $S_{s,SST}$, can be carried out as follows:

$$P_{s,SST} = P_{s,EPs} \times (1 + \delta P / 100) \quad (C.1a)$$

$$H_{SST} = H_{EPs} \times (1 + \delta HS / 100) \quad (C.1b)$$

$$S_{s,SST} = S_{s,EPs} \times (1 + \delta HS / 100) \quad (C.1c)$$

Correspondingly, the conversion in the reverse direction can be carried out as follows:

$$P_{s,EPs} = P_{s,SST} / (1 + \delta P / 100) \quad (C.2a)$$

$$H_{EPs} = H_{SST} / (1 + \delta HS / 100) \quad (C.2b)$$

$$S_{s,EPs} = S_{s,SST} / (1 + \delta HS / 100) \quad (C.2c)$$

¹ References in square brackets refer to the bibliography.

The conversion factors as determined from the experiments (see reference [1] and [2]) are shown as rhombus symbols in the diagrams of figure C.1 for δP and figure C.2 for δHS . The values for $J = 1,0$ T to $1,2$ T were obtained by extrapolation from the experimental data. The two diagrams also comprise the curve fits to the experimental data (continuous lines). The relationships representing the curve fits are as follows:

$$\delta P = 1,46 + 0,242 J^5 \quad (C.3a)$$

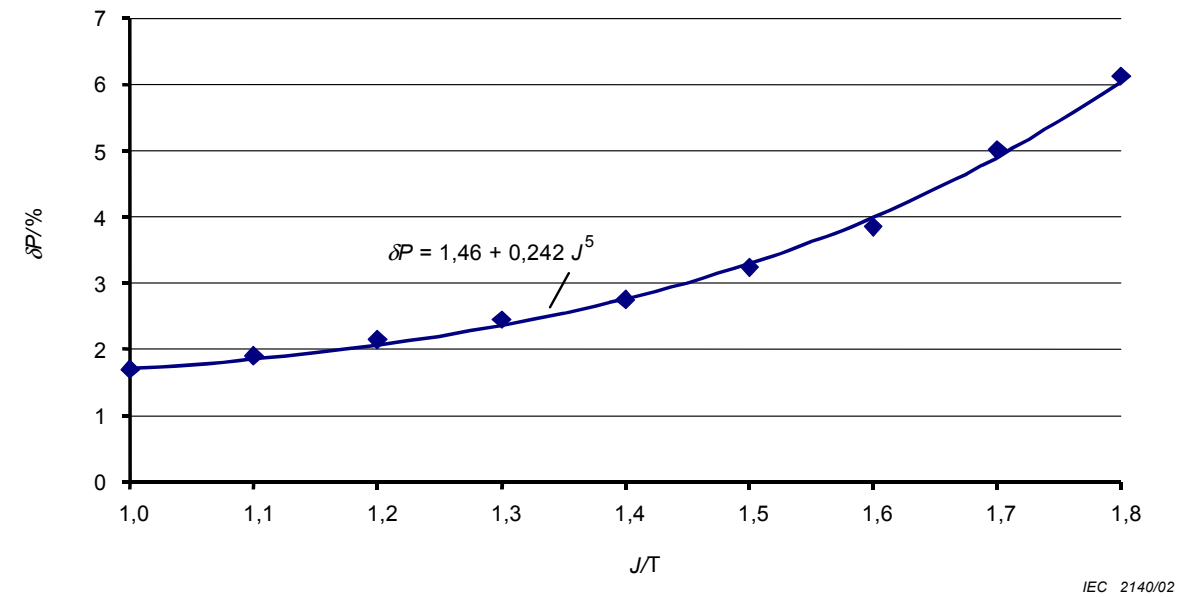
$$\delta HS = 6,0 + 0,103 J^{10} \quad (C.3b)$$

When J exceeds $1,8$ T, equations (C.2a-c) and (C.3a,b) or a graphical extrapolation may be applied.

The conversion factors as obtained from equation (C.3a) and (C.3b) are presented in table C.1.

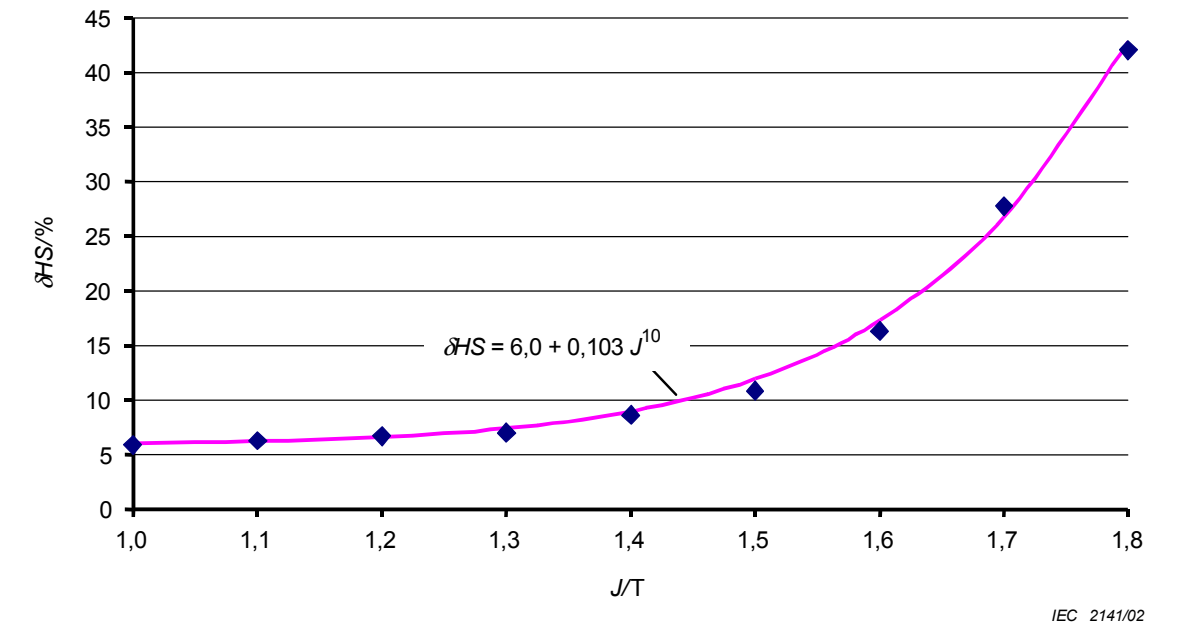
Table C.1 – Epstein-SST conversion factors δP and δHS for grain-oriented material in the polarization range $1,0$ T to $1,8$ T

J T	δP %	δHS %
1,0	1,7	6,1
1,1	1,8	6,3
1,2	2,1	6,6
1,3	2,4	7,4
1,4	2,8	9,0
1,5	3,3	12
1,6	4,0	17
1,7	5,0	27
1,8	6,0	43



Key
Rhombus symbols = experimental data
Continuous line = curve fit to the experimental data according to equation (C.3a)

Figure C.1 – Epstein-SST conversion factor δP for grain-oriented material versus magnetic polarization J



Key
Rhombus symbols = experimental data
Continuous line = curve fit to the experimental data according to equation (C.3b)

Figure C.2 – Epstein-SST conversion factor δHS for grain-oriented material versus magnetic polarization J

Annex D (informative)

Digital sampling methods for the determination of the magnetic properties

D.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, $U_2(t)$, the voltage drop across the non-inductive precision resistor in series with the primary winding (see Figures 4 and 6), $U_1(t)$, 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 the 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 4 applies equally to the analogue methods and the digital sampling method; the digital sampling method allows all functions of the measurement equipments in Figure 4 to 6 to be realized by a combined system of a 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 this technique are different from those of this annex and are not treated here. More information can be found in [3] and [4].

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.

D.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 :

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{f \cdot n} = \frac{1}{f_s} \quad (\text{D.1})$$

where

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

In order to achieve lower uncertainties, the length of the period of the magnetization divided by the time interval between the sampled points, i.e. the ratio f_s/f , should be an integer (Nyquist condition [7]) 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:

$$\hat{J} = \frac{1}{4fN_2A} \frac{1}{T} \int_0^T |U_2(t)| dt \cong \frac{1}{4f_s N_2 A} \sum_{j=0}^{n-1} |u_{2j}| \quad (D.2)$$

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 follows²:

$$P_s = \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t) U_2(t) dt \cong \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{1j} u_{2j} \quad (D.3)$$

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 period of the magnetization, in seconds;
- f is the frequency of the magnetization, 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 6), 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;
- n is the number of instantaneous values sampled over one period;
- j is the index of instantaneous values;
- l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,45$ m; for measurements in connection with a calibration by means of Epstein measurements, see Annex B);
- ρ_m is the conventional density of the test material, in kilograms per cubic metre.

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

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

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 frequency f of the magnetization are derived from a common high frequency clock and thus, have an integer ratio f_s/f . In that case, $U_1(t)$ and $U_2(t)$ 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 [5]. However, some commercial data acquisition equipment cannot be synchronized with the frequency of the magnetization 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 must 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 [7] 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 [5, 6] 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.

D.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 [8]. 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] SIEVERT, J., AHLERS, H., BROSIN, P., CUNDEVA, M. and LUEDKE, J. *Relationship of Epstein to SST Results for Grain-Oriented Steel*. 9th ISEM Conference (1999), published in: P.di Barba, A.Savini (editors): *Non-Linear Electromagnetic Systems*, ISEM'99, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 18, IOS Press, Amsterdam, 2000, p.3-6.
- [2] SIEVERT, J. *The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel - Survey on Methods and Situation of Standards*. SMM 14 Conference, Balatonfuered, Hungary, September 1999, J.Magn.Magn. Mater., **215-215** (2000) p. 647-651.
- [3] FIORILLO, F., *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism. Academic Press (2004), ISBN: 0-12-257251-3.
- [4] 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
- [5] AHLERS, H. and SIEVERT, J., *Uncertainties of Magnetic Loss Measurements, particularly in Digital Procedures*. PTB-Mitt. 94 (1984) p. 99-107.
- [6] 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.
- [7] STEARNS, S.D., *Digital signal analysis*. 5th Edition, Hayden Book (1991), ISBN:0-8104 - 5828-4.
- [8] 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.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	29
1 Objet et domaine d'application.....	31
2 Références normatives.....	32
3 Principes généraux.....	32
3.1 Principe de la méthode d'essai.....	32
3.2 Appareillage d'essai.....	32
3.3 Inductance mutuelle de compensation.....	33
3.4 Eprouvette.....	34
3.5 Source d'alimentation.....	34
4 Détermination des pertes totales spécifiques.....	34
4.1 Principe de la mesure.....	34
4.2 Appareillage.....	34
4.3 Mode opératoire pour la mesure des pertes totales spécifiques.....	35
5 Détermination de l'intensité du champ magnétique, du courant magnétisant et de la puissance apparente spécifique.....	37
5.1 Principe de la mesure.....	38
5.2 Appareillage.....	38
5.3 Mode opératoire.....	39
5.4 Détermination des caractéristiques.....	40
5.5 Reproductibilité.....	42
Annexe A (normative) Exigences concernant la construction des culasses.....	45
Annexe B (informative) Etalonnage du dispositif d'essai par rapport au cadre Epstein.....	46
Annexe C (informative) Relation Epstein-SST pour les tôles d'acier à grains orientés.....	47
Annexe D (informative) Méthodes d'échantillonnage numérique pour la détermination des propriétés magnétiques.....	50
Bibliographie.....	53
Figure 1 – Schéma du dispositif d'essai.....	43
Figure 2 – Dimensions de la culasse.....	43
Figure 3 – Schéma de branchement des cinq bobines de l'enroulement primaire.....	43
Figure 4 – Circuit pour la mesure des pertes totales spécifiques.....	44
Figure 5 – Circuit pour la mesure de la valeur efficace du courant magnétisant.....	44
Figure 6 – Circuit pour la mesure de la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique.....	44
Figure C.1 – Facteur δP de conversion Epstein-SST pour matériau à grains orientés en fonction de la polarisation magnétique J	49
Figure C.2 – Facteur δHS de conversion Epstein-SST pour matériau à grains orientés en fonction de la polarisation magnétique J	49
Tableau C.1 – Facteurs δP et δHS de conversion Epstein-SST pour matériau à grains orientés dans la gamme de polarisation 1,0 T à 1,8 T.....	48

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

**Partie 3: Méthodes de mesure des caractéristiques magnétiques
des bandes et tôles magnétiques en acier à l'aide
de l'essai sur tôle unique**

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 elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 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 60404-3 a été établie par le comité d'études 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

La présente version consolidée de la CEI 60404-3 comprend la deuxième édition (1992) [documents 68(BC)68+75 et 68(BC)77+79], son amendement 1 (2002) [documents 68/258/FDIS et 68/263/RVD], son amendement 2 (2009) [documents 68/389/CDV et 68/397/RVC] et le corrigendum de décembre 2009.

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

Elle porte le numéro d'édition 2.2.

Une ligne verticale dans la marge indique où la publication de base a été modifiée par les amendements 1 et 2.

L'annexe A fait partie intégrante de la présente norme.

L'annexe B, C et D sont données uniquement à titre d'information.

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.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 3: Méthodes de mesure des caractéristiques magnétiques des bandes et tôles magnétiques en acier à l'aide de l'essai sur tôle unique

1 Objet et domaine d'application

La présente partie a pour objet de définir les principes généraux et les détails techniques de mesure des propriétés magnétiques des tôles magnétiques à l'aide de l'essai sur tôle unique.

La présente partie de la CEI 60404 est applicable, aux fréquences industrielles:

- a) aux tôles et feuillards magnétiques à grains orientés:
 - pour la mesure entre 1,0 T et 1,8 T:
 - des pertes totales spécifiques;
 - de la puissance apparente spécifique;
 - de la valeur efficace du champ magnétique;
 - pour la mesure, jusqu'à des valeurs de crête de champ magnétique de 1 000 A/m:
 - de la valeur de crête de la polarisation magnétique;
 - de la valeur de crête du champ magnétique.
- b) aux tôles et feuillards magnétiques à grains non orientés:
 - pour la mesure entre 0,8 T et 1,5 T:
 - des pertes totales spécifiques;
 - de la puissance apparente spécifique;
 - de la valeur efficace du courant d'excitation;
 - pour la mesure, jusqu'à des valeurs de crête de champ magnétique de 10 000 A/m:
 - de la valeur de crête de la polarisation magnétique;
 - de la valeur de crête du champ magnétique.

L'essai sur tôle unique est applicable à des échantillons prélevés dans les tôles et feuillards magnétiques de toute qualité. Les caractéristiques magnétiques sont déterminées pour une tension induite sinusoïdale, pour des valeurs de crête spécifiées de la polarisation magnétique et pour une fréquence spécifiée.

Les mesures sont effectuées à la température ambiante de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ sur des éprouvettes qui ont été au préalable désaimantées.

NOTE Dans la présente partie, la grandeur «polarisation magnétique» est utilisée conformément à la définition figurant dans la CEI 60050(901). Dans certaines normes de la série CEI 60404, on a employé l'expression «induction magnétique».

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 – Partie 221: Matériaux et composants magnétiques*

CEI 60404-2, *Matériaux magnétiques – Partie 2: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des bandes et tôles magnétiques en acier au moyen d'un cadre Epstein*

3 Principes généraux

3.1 Principe de la méthode d'essai

L'éprouvette, constituée par un échantillon de tôle magnétique, est introduite à l'intérieur de deux enroulements:

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

La fermeture du flux est assurée par un circuit magnétique constitué de deux culasses identiques dont la section est très élevée par rapport à celle de l'éprouvette (voir figure 1).

Afin de minimiser les effets de pression sur l'éprouvette, la culasse supérieure doit être munie d'un système de suspension permettant de contrebalancer une partie de la masse de la culasse conformément à 3.2.1.

Des précautions doivent être prises pour s'assurer que les variations de température sont maintenues à un niveau inférieur à celui susceptible de produire des contraintes dans l'éprouvette par dilatation ou contraction thermique.

3.2 Appareillage d'essai

3.2.1 Culasses

Chaque culasse en forme de U est composée de tôles isolées en acier au silicium à grains orientés ou en alliage fer-nickel. Elle doit avoir une faible réluctance et des pertes totales spécifiques ne dépassant pas 1,0 W/kg à 1,5 T et à 50 Hz. Elle doit être fabriquée selon les exigences de l'annexe A.

Afin de réduire l'effet des courants de Foucault et d'obtenir une répartition plus homogène du flux à l'intérieur de la culasse, celle-ci doit être constituée par une paire de culasses en C ou un assemblage collé de bandes, auquel cas les coins doivent être à joints croisés (voir figure 1).

Les faces polaires de la culasse doivent avoir une largeur de 25 mm ± 1 mm.

Les deux faces polaires de chaque culasse doivent être coplanaires à mieux que 0,5 mm près et l'entrefer entre les faces polaires opposées des culasses ne doit dépasser 0,005 mm en aucun point. En outre, les culasses doivent être rigides afin d'éviter toute contrainte mécanique appliquée à l'éprouvette.

La hauteur de chaque culasse doit être comprise entre 90 mm et 150 mm; chaque culasse doit avoir une largeur de 500^{+5}_{-5} mm et une longueur interne de 450 mm $\pm$ 1 mm (voir figure 2).

NOTE Il est reconnu que d'autres dimensions de culasse peuvent être utilisées à condition que la comparabilité des résultats puisse être démontrée.

Le dispositif doit comporter entre les branches verticales des culasses un support non magnétique, en matériau isolant, sur lequel on pose l'éprouvette. Ce support doit être centré et placé dans le même plan que les faces polaires, afin que l'éprouvette soit en contact direct avec les forces polaires sans entrefer.

La culasse supérieure doit être mobile pour permettre la mise en place de l'éprouvette. Après insertion, la culasse supérieure doit être réalignée avec précision avec la culasse inférieure. La suspension de la culasse supérieure doit permettre de contrebalancer une partie de son poids afin d'obtenir une force sur l'éprouvette comprise entre 100 N et 200 N.

NOTE La forme carrée de la culasse a été retenue afin de permettre l'utilisation d'une seule éprouvette dans le cas des tôles à grains non orientés. Par rotation de 90° de l'éprouvette, il est possible de déterminer les caractéristiques dans la direction de laminage et dans le sens perpendiculaire.

3.2.2 Enroulements

Les enroulements primaire et secondaire doivent avoir une longueur d'au moins 440 mm et être enroulés sur un support en matériau isolant, non magnétique, de forme parallélépipédique. Les dimensions du support doivent être les suivantes:

- longueur: 445 mm $\pm$ 2 mm;
- largeur interne: 510 mm $\pm$ 1 mm;
- hauteur interne: 5^{+0}_{-2} mm;
- hauteur: ≤ 15 mm.

L'enroulement primaire peut être constitué:

- soit de cinq bobines ou plus de mêmes dimensions et de même nombre de spires, réparties sur toute la longueur (voir figure 3) et reliées en parallèle. Par exemple, avec cinq bobines, chaque bobine peut comporter 400 spires de fil de cuivre de 1 mm de diamètre, bobinées en cinq couches;
- soit d'un enroulement unique continu et uniformément réparti sur toute la longueur. Par exemple, cet enroulement peut comporter 400 spires de fil de cuivre de 1 mm de diamètre, bobinées en une seule ou plusieurs couches.

Le nombre de spires de l'enroulement secondaire dépendra des caractéristiques des appareils de mesure.

3.3 Inductance mutuelle de compensation

L'effet de flux dans l'air doit être compensé. Cela peut être obtenu, par exemple, à l'aide d'une inductance mutuelle de compensation. L'enroulement primaire de l'inductance mutuelle est connecté en série avec l'enroulement primaire du dispositif d'essai, alors que l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est connecté en opposition avec l'enroulement secondaire du dispositif d'essai.

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 soit pas 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 proportionnelle à la valeur de crête de la polarisation magnétique dans l'éprouvette.

3.4 Eprouvette

La longueur de l'éprouvette doit être d'au moins 500 mm. Bien que la partie de l'éprouvette située en dehors des faces polaires n'ait pas grande influence sur la mesure, cette partie ne doit pas être plus longue que ce qui est nécessaire pour faciliter les opérations de mise en place et d'enlèvement de l'éprouvette.

La largeur de l'éprouvette doit être aussi grande que possible et au maximum égale à la largeur de la culasse.

Pour obtenir la précision maximale, la largeur minimale ne doit pas être inférieure à 60 % de la largeur de la culasse.

Les éprouvettes doivent être découpées sans formation de bavures excessives ou de distorsions mécaniques. L'éprouvette doit être plane. Lors du découpage, la rive de la tôle mère est prise comme référence de la direction de laminage. On admettra les tolérances suivantes pour l'angle entre la direction de laminage et celle du découpage:

- ±1° pour les tôles à grains orientés;
- ±5° pour les tôles à grains non orientés.

Pour les tôles à grains non orientés, on doit préparer deux éprouvettes, l'une coupée parallèlement à la direction de laminage, l'autre perpendiculairement, sauf si l'éprouvette est carrée, auquel cas une seule éprouvette suffit.

3.5 Source d'alimentation

La source d'alimentation doit avoir une faible impédance interne et une stabilité élevée en tension et en fréquence. Pendant les mesures, la tension et la fréquence doivent être maintenues constantes à ±0,2 % près.

En outre, la forme de l'onde de la tension secondaire induite doit être maintenue aussi sinusoïdale que possible. Il est préférable de maintenir le facteur de forme de la tension secondaire égal à $1,111 \pm 1 \%$. Cela peut être réalisé de diverses manières, par exemple à l'aide d'une amplification électronique asservie.

4 Détermination des pertes totales spécifiques

4.1 Principe de la mesure

Le dispositif d'essai avec l'éprouvette constitue un transformateur à vide dont les pertes totales spécifiques sont mesurées selon le circuit de principe de la figure 4.

4.2 Appareillage

4.2.1 Mesure de la tension

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

4.2.1.1 Voltmètre de valeur moyenne

La tension secondaire redressée du dispositif d'essai doit être mesurée avec un voltmètre de valeur moyenne. L'instrument préférable est un voltmètre numérique de ± 0,2 % de précision.

NOTE Des instruments de ce type sont généralement gradués en valeur redressée multipliée par 1,111.

La charge du circuit secondaire doit être aussi faible que possible. Par conséquent, il convient que la résistance interne du voltmètre de valeur moyenne soit au moins égale à 1 000 Ω/V .

4.2.1.2 Voltmètre de valeur efficace

On doit utiliser un voltmètre de valeur efficace. L'instrument préférable est un voltmètre numérique de $\pm 0,2$ % de précision.

4.2.2 Mesure de la fréquence

On doit utiliser un fréquencemètre de $\pm 0,1$ % de précision.

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

4.2.3 Mesure de la puissance

On doit mesurer la puissance avec un wattmètre d'une précision de $\pm 0,5$ % ou meilleure pour la valeur réelle du facteur de puissance et du facteur de crête.

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

La résistance du circuit de tension du wattmètre doit être d'au moins 100 Ω/V pour tous les calibres. Si nécessaire, retrancher des pertes indiquées les pertes supplémentaires introduites par le wattmètre.

La résistance du circuit de tension du wattmètre doit être au moins égale à 5 000 fois sa réactance, à moins que le wattmètre ne soit compensé pour celle-ci.

Si un appareillage destiné à la mesure du courant est inclus dans le circuit, il doit être court-circuité lors de l'ajustement de la tension secondaire ainsi que lors de la mesure des pertes.

4.3 Mode opératoire pour la mesure des pertes totales spécifiques

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

4.3.1 Préparation de la mesure

La longueur de l'éprouvette doit être mesurée à $\pm 0,1$ % près et sa masse déterminée à $\pm 0,1$ %. L'éprouvette doit être ensuite mise en place et centrée sur les axes longitudinal et transversal de la bobine d'essai, et la culasse supérieure, partiellement contrebalancée, doit être abaissée.

Avant la mesure, l'éprouvette doit être désaimantée par une lente diminution d'un champ magnétique alternatif à partir d'une valeur nettement supérieure à celle devant être mesurée.

4.3.2 Réglage de la source

La source doit être réglée de telle manière que la valeur moyenne de la tension secondaire redressée soit:

$$\overline{U_2} = 4 f N_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} A \hat{J} \quad (1)$$

où

$\overline{U_2}$ est la valeur moyenne de la tension secondaire redressée, en volts;

f est la fréquence, en hertz;

R_i est la résistance équivalente des appareils dans le circuit secondaire, en ohms;

R_t est la somme des résistances des enroulements secondaires du dispositif d'essai et de l'inductance mutuelle, en ohms;

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

A est la section de l'éprouvette, en mètre carrés;

$\hat{J}$ est la valeur de crête de la polarisation magnétique, en tesla.

La section A est donnée par l'équation:

$$A = \frac{m}{l \rho_m} \quad (2)$$

où

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

l est la longueur de l'éprouvette, en mètres;

ρ_m est la masse volumique du matériau en essai, en kilogrammes par mètre cube.

4.3.3 Mesures

4.3.3.1 L'ampèremètre, s'il y en a un dans le circuit primaire, doit être observé pour vérifier que le circuit courant du wattmètre n'est pas surchargé. Court-circuiter ensuite l'ampèremètre et régler à nouveau la tension secondaire.

Après contrôle de la forme d'onde du circuit secondaire, on doit procéder à la lecture du wattmètre. La valeur des pertes totales spécifiques doit être calculée d'après la formule:

$$P_s = \left[P \frac{N_1}{N_2} - \frac{(1,111 \overline{|U_2|})^2}{R_i} \right] \frac{l}{m l_m} \quad (3)$$

où

$\overline{|U_2|}$ est la valeur moyenne de la tension secondaire redressée, en volts;

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

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

m est la masse de l'éprouvette, en kilogramme;

l_m est la longueur effective du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,45$ m);

l est la longueur de l'éprouvette, en mètres;

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

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

R_i est la résistance des instruments dans le circuit secondaire, en ohms.

NOTE 1 Des études* ont montré que la longueur interne des culasses est une valeur moyenne appropriée de la longueur effective du circuit magnétique l_m pour différents matériaux et différentes valeurs de polarisation.

NOTE 2 Une procédure, établie de longue date dans quelques pays, consiste à étalonner le dispositif d'essais en déterminant la longueur effective du circuit magnétique à partir des mesures des pertes spécifiques réalisées au moyen d'un cadre Epstein. Les détails de cette procédure d'étalonnage sont décrits en annexe B. Cette procédure n'est autorisée que pour la caractérisation des tôles et feuillets magnétiques destinés à la consommation dans ces pays.

4.3.3.2 Dans le cas de matériaux non orientés, pour des valeurs des pertes totales spécifiques mentionnées dans les normes produits des matériaux magnétiques, la valeur des pertes spécifiques totales reportée doit être calculée comme la moyenne des deux mesures effectuées dans les directions parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage. Pour d'autres applications, les valeurs des pertes totales spécifiques parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage doivent être reportées séparément.

4.3.4 Reproductibilité

La reproductibilité de cette méthode en utilisant l'appareillage décrit ci-dessus est caractérisée par un écart type relatif de 1 % pour les tôles en acier à grains orientés et 2 % pour les tôles en acier à grains non orientés.

5 Détermination de l'intensité du champ magnétique, du courant magnétisant et de la puissance apparente spécifique

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

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

* J. D. Sievert, Determination of AC Magnetic Power Loss of Electrical Steel Sheet: Present Status and Trends, IEEE Trans. Mag. Vol. 20, No. 5 (1984) 1702-1707.

5.1 Principe de la mesure

5.1.1 Valeur de crête de la polarisation magnétique

La valeur de crête de la polarisation magnétique doit être déterminée à partir de la valeur moyenne de la tension secondaire redressée mesurée comme décrit en 4.2.1.

5.1.2 Valeur efficace du courant magnétisant

La valeur efficace de l'intensité du courant magnétisant doit être mesurée à l'aide d'un ampèremètre de valeur efficace placé dans le circuit comme indiqué à la figure 5.

5.1.3 Valeur de crête de l'intensité du champ magnétique

La valeur de crête de l'intensité du champ magnétique doit être obtenue à partir de la valeur de crête $\hat{I}$ du courant primaire. Celle-ci doit être déterminée en mesurant la tension aux bornes d'une résistance de précision R_n de valeur connue avec un voltmètre de crête comme indiqué à la figure 6.

5.2 Appareillage

5.2.1 Voltmètre de valeur moyenne

La tension secondaire redressée du dispositif d'essai doit être mesurée avec un voltmètre de valeur moyenne. De préférence, on utilisera un voltmètre numérique de précision égale à $\pm 0,2 \%$.

NOTE Des instruments de ce type sont généralement gradués en valeur redressée multipliée par 1,111.

La charge du circuit secondaire doit être aussi faible que possible. Par conséquent, il convient que la résistance interne du voltmètre de valeur moyenne soit au moins égale à $1\,000\ \Omega/V$.

5.2.2 Mesure du courant

La valeur efficace du courant primaire doit être mesurée soit au moyen d'un ampèremètre de valeur efficace de faible impédance de classe 0,5 ou meilleure (voir figure 5), ou en utilisant une résistance de précision et un voltmètre électronique de valeur efficace (voir figure 6).

5.2.3 Mesure du courant de crête

La mesure de la tension de crête aux bornes de la résistance R_n (voir figure 6) doit être exécutée soit au moyen d'un voltmètre électronique de haute sensibilité indiquant la valeur de crête, soit à l'aide d'un oscilloscope étalonné.

Pour la déviation maximale de ces instruments la mesure doit être faite avec une précision de $\pm 3 \%$, ou meilleure.

5.2.4 Source d'alimentation

La source d'alimentation doit être conforme aux exigences de 3.5.

5.2.5 Résistance R_n

La méthode selon la figure 6 exige une résistance non inductive de précision de valeur connue à $\pm 0,5$ % près.

Le choix de la valeur de cette résistance dépend de la sensibilité du voltmètre de valeur de crête. Elle ne doit pas dépasser 1Ω afin de minimiser la distorsion de la forme d'onde de la tension induite.

5.3 Mode opératoire

5.3.1 Préparation de la mesure

La longueur de l'éprouvette doit être mesurée à $\pm 0,1$ % près et sa masse déterminée à $\pm 0,1$ %. L'éprouvette doit être ensuite mise en place et centrée sur les axes longitudinal et transversal de la bobine d'essai, et la culasse supérieure en partie contrebalancée doit être abaissée.

Avant la mesure, l'éprouvette doit être désaimantée par une lente diminution d'un champ magnétique alternatif à partir d'une valeur nettement supérieure à celle devant être mesurée.

5.3.2 Mesure

En pratique, on détermine soit des valeurs uniques, soit des groupes de valeurs de la polarisation magnétique $\hat{J}$ et de l'intensité du champ magnétique ($\hat{H}$ ou $\tilde{H}$).

Si l'intensité du champ magnétique est spécifiée et qu'on envisage de déterminer la polarisation magnétique, on doit régler le courant primaire à la valeur correspondant à l'intensité du champ magnétique spécifiée (voir ci-dessous). La tension secondaire du dispositif d'essai sur tôle unique doit être ensuite lue au voltmètre de valeur redressée (voir 4.3.2).

De même, si la polarisation magnétique est spécifiée et que l'intensité du champ magnétique est à déterminer, la tension secondaire doit être réglée à sa valeur spécifiée conformément à 4.3.2.

Pour la détermination de $\tilde{H}$, la valeur efficace du courant primaire doit être lue sur l'ampèremètre selon le circuit de la figure 5 ou sur un voltmètre selon le circuit de la figure 6.

Pour la détermination de $\hat{H}$, la valeur de crête de la tension aux bornes de la résistance R_n doit être lue sur un voltmètre de valeur de crête.

5.3.3 Matériaux non orientés

Dans le cas de matériaux non orientés, pour la valeur crête de la polarisation magnétique $\hat{J}$ spécifiée dans les normes produits des matériaux magnétiques, la valeur de $\hat{J}$ reportée doit être calculée comme la moyenne des deux mesures réalisées dans les directions parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage. Pour les valeurs $\hat{J}$ la valeur efficace du courant d'excitation, les valeurs parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage doivent être reportées séparément.

5.4 Détermination des caractéristiques

5.4.1 Détermination de $\hat{J}$

La valeur de crête de la polarisation magnétique est donnée par l'équation:

$$\hat{J} = \frac{1}{4 f N_2 A} \overline{U_2} \quad (4)$$

Pour obtenir $\overline{U_2}$, la lecture du voltmètre doit être corrigée par le facteur:

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

où

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

f est la fréquence, en hertz;

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

A est la section de l'éprouvette, en mètre carrés;

R_v est la résistance interne du voltmètre, en ohms;

R_2 est la résistance de l'enroulement secondaire, en ohms;

$\overline{U_2}$ est la valeur moyenne de la tension secondaire redressée, en volts.

5.4.2 Détermination de $\tilde{H}$

La valeur efficace de l'intensité du champ magnétique doit être calculée à partir de la valeur efficace du courant primaire, indiquée par l'ampèremètre selon le schéma de la figure 5 ou par le voltmètre selon le circuit de la figure 6:

$$\tilde{H} = \frac{N_1}{l_m} \tilde{I}_1; \quad (5)$$

où

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

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

l_m est la longueur conventionnelle effective du circuit magnétique en mètres ($l_m = 0,45$ m);

$\tilde{I}_1$ est la valeur efficace du courant primaire, en ampères.

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

5.4.3 Détermination de $\hat{H}$

La valeur de crête de l'intensité du champ magnétique doit être calculée à partir de l'indication $\hat{U}_m$ du voltmètre de valeur de crête:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{R_n l_m} \hat{U}_m \quad (6)$$

où

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

R_n est la valeur de la résistance de précision de la figure 6, en ohms;

$\hat{U}_m$ est la valeur de crête de la tension aux bornes de R_n , en volts.

NOTE La perméabilité d'amplitude est exprimée de la manière suivante:

$$\mu_a = \frac{\hat{J}}{\mu_0 \hat{H}} + 1$$

5.4.4 Détermination de S_s

La puissance apparente est donnée par:

$$S = \tilde{I}_1 \cdot \tilde{U}_2 \frac{N_1}{N_2} = \tilde{I}_1 \cdot 1,111 \cdot \overline{|U_2|} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

où

S est la puissance apparente, en voltampères;

$\tilde{U}_2$ est la valeur efficace de la tension secondaire du dispositif d'essai sur tôle unique, en volts.

NOTE La relation $\tilde{U}_2 = 1,111 \overline{|U_2|}$ n'est valable que pour les tensions sinusoïdales.

En divisant cette quantité par la masse effective m_a calculée selon l'équation $m_a = \frac{l_m}{l} m$, on obtient la puissance apparente spécifique:

$$S_s = \frac{S}{m_a} = \frac{\tilde{I}_1 \cdot 1,111 \cdot \overline{|U_2|} l N_1}{m l_m N_2} \quad (8)$$

où

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

l est la longueur de l'éprouvette, en mètres;

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

$\overline{|U_2|}$ est la valeur moyenne de la tension secondaire redressée, en volts;

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

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

l_m est la longueur conventionnelle effective du circuit magnétique en mètres ($l_m = 0,45$ m);

$\tilde{I}_1$ est la valeur efficace du courant primaire, en ampères.

5.5 Reproductibilité

La reproductibilité de cette méthode en utilisant l'appareillage défini ci-dessus est caractérisée par un écart type relatif de 3 % ou moins.

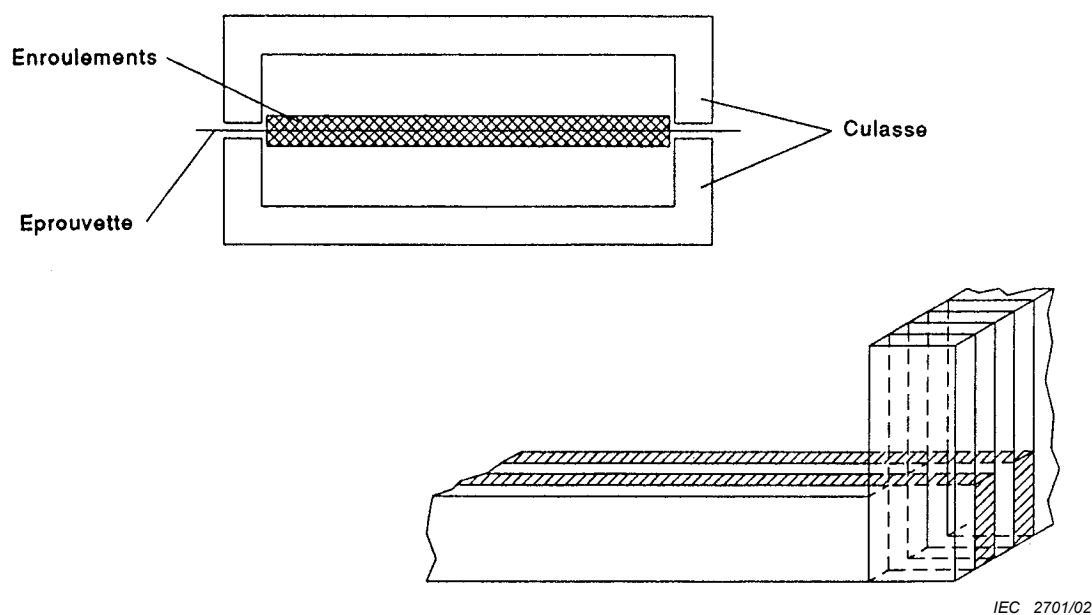


Figure 1 – Schéma du dispositif d'essai

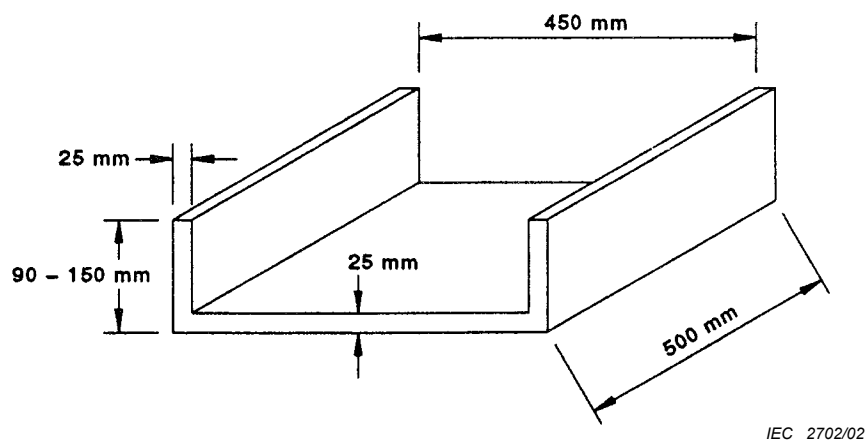


Figure 2 – Dimensions de la culasse

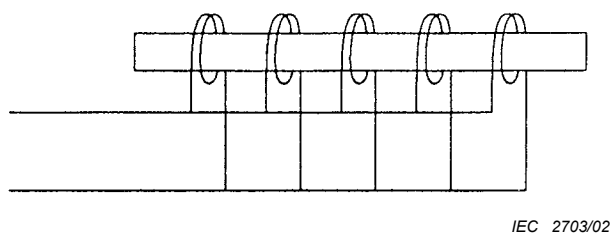
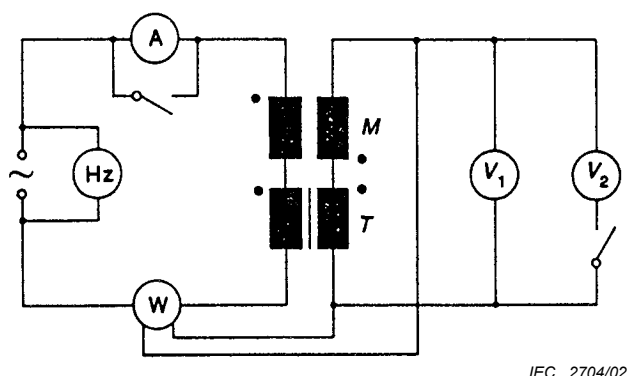


Figure 3 – Schéma de branchement des cinq bobines de l'enroulement primaire



- V_1 mesure la tension moyenne redressée
 V_2 mesure la tension efficace
 M est l'inductance mutuelle
 T est le cadre d'essai

Figure 4 – Circuit pour la mesure des pertes totales spécifiques

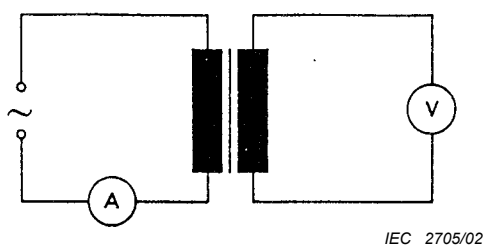


Figure 5 – Circuit pour la mesure de la valeur efficace du courant magnétisant

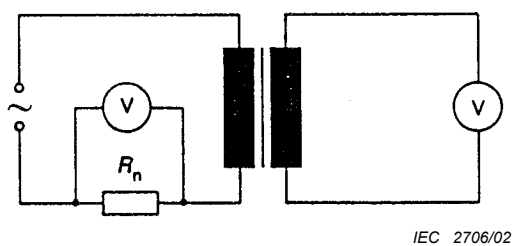


Figure 6 – Circuit pour la mesure de la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique

Annexe A **(normative)**

Exigences concernant la construction des culasses

Il est important de s'assurer que les pertes dans les culasses sont faibles et constantes. Un niveau de pertes de 1 mW/kg mesuré à 50 Hz pour une intensité d'induction magnétique de 40 mT est caractéristique. L'une des raisons pour laquelle les pertes peuvent devenir élevées est l'existence de courts-circuits entre les tôles de la culasse. Pour la mesure des pertes dans les culasses, on peut utiliser un enroulement primaire et un enroulement secondaire sur les culasses; 25 tours suffisent pour chaque enroulement.

Il est nécessaire de vérifier la résistance d'isolement entre différentes parties de la culasse en utilisant un ohmmètre et des sondes.

Pendant la fabrication des culasses, un recuit de relaxation des bandes découpées est nécessaire. Après assemblage des bandes constituant les culasses (qui doit être réalisé sans application d'une pression élevée), les faces polaires doivent être usinées. Le parallélisme doit être démontré à l'aide d'une cale appropriée et l'uniformité de l'entrefer peut être vérifié à l'aide d'un liquide révélateur de planéité. Des rodages successifs à l'aide de carborundum ou de pâte diamant seront probablement nécessaires jusqu'à ce qu'une répartition uniforme du liquide révélateur de planéité indique un entrefer suffisamment homogène. Le rodage peut être effectué en plaçant la culasse supérieure dans sa position normale d'utilisation sur la culasse inférieure et en la déplaçant d'un mouvement de va-et-vient de faible amplitude.

L'opération de rodage fait fluer le métal entre les bandes et occasionne des courts-circuits. Il est important d'enlever ce métal qui a flué par une attaque acide soignée à l'aide d'un acide non oxydant (par exemple de l'acide chlorhydrique). Cela consiste à frotter les faces polaires avec un chiffon imprégné d'acide jusqu'à disparition de la couche qui a flué. Il est important de laver soigneusement et de neutraliser l'acier.

Il est utile de mesurer les pertes dans la culasse avant et après le rodage et l'attaque afin de vérifier la réduction des pertes entraînée par ce traitement.

Une vérification finale de la résistance d'isolement doit être faite après l'attaque et le nettoyage des faces polaires.

Avant utilisation, une désaimantation soignée de la culasse doit être effectuée à partir d'une valeur d'induction nettement plus élevée que la plus grande induction existant en pratique dans la culasse.

Annexe B (informative)

Etalonnage du dispositif d'essai par rapport au cadre Epstein

NOTE Cette annexe ne fait pas partie des exigences de la norme. Elle est rédigée pour information à l'intention de ceux qui voudraient obtenir la corrélation entre des mesures réalisées à l'aide de la présente méthode et celles réalisées au cadre Epstein (voir note 2, page 18).

L'étalonnage du dispositif d'essai consiste à déterminer la longueur effective de son circuit magnétique à partir de la mesure des pertes totales spécifiques au cadre Epstein.

Cette détermination de la longueur effective du circuit magnétique est faite pour chaque qualité de matériau, et chaque induction dont on veut déterminer les pertes totales spécifiques.

En premier lieu les pertes totales spécifiques sont mesurées à l'aide du cadre Epstein conformément à la CEI 60404-2 (sauf que, dans le cas des matériaux à grains non orientés, toutes les bandes placées dans le cadre Epstein doivent avoir la même orientation).

Ensuite, placer au moins 12 bandes déjà mesurées au cadre Epstein, côte à côte, dans le dispositif d'essai. Mesurer à nouveau les pertes avec le dispositif pour une induction égale à celle pour laquelle les pertes totales spécifiques ont été déterminées au cadre Epstein.

La longueur effective l_m du circuit magnétique est calculée d'après la formule:

$$l_m = \frac{Pl}{mP_{sE}} \quad (\text{B.1})$$

où

P est la puissance mesurée par le wattmètre connecté avec le dispositif d'essai, en watts;

l est la longueur des bandes Epstein, en mètres;

m est la masse totale des bandes Epstein placées dans le dispositif d'essai, en kilogrammes;

P_{sE} est les pertes totales spécifiques déterminées au cadre Epstein, en watts par kilogramme.

NOTE Dans le cas de matériaux à grains non orientés, il y a deux longueurs effectives du circuit magnétique, une pour chaque direction de prélèvement.

Annexe C (informative)

Relation Epstein-SST pour les tôles d'acier à grains orientés

NOTE La présente annexe ne fait pas partie des prescriptions de la norme. Elle est incluse à titre d'information pour ceux qui souhaitent convertir les valeurs SST en valeurs Epstein et vice versa. Il existe deux différences significatives par rapport à la procédure de l'annexe B, comme suit:

- l'annexe B prescrit le mode opératoire d'étalonnage d'un SST au moyen de longues bandes Epstein. Elle donne une valeur exacte pour le facteur d'étalonnage Epstein-SST pour l'échantillon individuel considéré;
- en coupant les tôles en bandes, le mode opératoire de l'annexe B donne un facteur d'étalonnage Epstein-SST qui se rapporte à un échantillon de tôle détensionné qui est constitué à partir des bandes Epstein recuites. En utilisant ce mode opératoire d'étalonnage, les valeurs des pertes totales spécifiques déterminées sur les éprouvettes de tôles seront en meilleur accord avec celles déterminées en utilisant les éprouvettes Epstein correspondantes, si les éprouvettes de tôle sont détensionnées et s'écarteront plus des valeurs Epstein si les tôles ne sont pas détensionnées.

Par ailleurs, l'annexe C décrit la conversion de valeurs SST en valeurs Epstein et vice versa, de manière générale, c'est-à-dire dans le cas où seulement une des deux méthodes de mesure a été utilisée. L'annexe C se limite au matériau à grains orientés. Bien sûr, la validité générale des relations présentées est sujette à la plus grande incertitude de la conversion, parce que la dispersion statistique due aux contraintes internes, etc., de l'échantillon de tôle individuel est considérable. Elle s'élève à environ ± 2 % (pour tout l'intervalle de J) pour les pertes totales spécifiques, P , se situe environ entre ± 3 % (pour $J = 1,3$ T) et ± 10 % (pour 1,7 T) pour les intensités du champ magnétique, H , et environ entre ± 5 % (à 1,3 T) et ± 20 % (à 1,7 T) pour la puissance apparente spécifique, S [1] et [2]¹.

Les relations ont été établies sur la base de mesures Epstein et SST sur environ 750 échantillons des nuances à grains orientés les plus significatives, livrées par huit producteurs différents et prélevés au cours de séquences de production différentes. Pour plus de détails, voir [1] et [2]. Cette étude n'a pas porté sur des matériaux à domaine affiné. Toutefois, la décision d'appliquer l'annexe C aux matériaux à domaine affiné relève de l'utilisateur de la présente norme.

La relation entre les résultats Epstein et les résultats SST peut être décrite par un facteur δP (pour les pertes totales spécifiques, P) et δHS (pour l'intensité du champ magnétique, H et la puissance apparente spécifique, S). La conversion des résultats Epstein, $P_{s,EPs}$, H_{EPs} et $S_{s,EPs}$, en résultats SST, $P_{s,SST}$, H_{SST} et $S_{s,SST}$, peut être opérée comme suit:

$$P_{s,SST} = P_{s,EPs} \times (1 + \delta P / 100) \quad (C.1a)$$

$$H_{SST} = H_{EPs} \times (1 + \delta HS / 100) \quad (C.1b)$$

$$S_{s,SST} = S_{s,EPs} \times (1 + \delta HS / 100) \quad (C.1c)$$

De manière correspondante, la conversion inverse peut être réalisée comme suit:

$$P_{s,EPs} = P_{s,SST} / (1 + \delta P / 100) \quad (C.2a)$$

$$H_{EPs} = H_{SST} / (1 + \delta HS / 100) \quad (C.2b)$$

$$S_{s,EPs} = S_{s,SST} / (1 + \delta HS / 100) \quad (C.2c)$$

¹ Les références entre crochets renvoient à la bibliographie.

Les facteurs de conversion déterminés par les expérimentations (voir références [1] et [2]) sont indiqués par des symboles en forme de losange dans les diagrammes de la figure C.1 pour δP et de la figure C.2 pour δHS . Les valeurs pour $J = 1,0$ T à $1,2$ T ont été obtenues par extrapolation des données expérimentales. Les deux diagrammes comportent également les courbes lissées à partir des données expérimentales (lignes continues). Les relations représentant les courbes lissées sont les suivantes:

$$\delta P = 1,46 + 0,242 J^5 \quad (\text{C.3a})$$

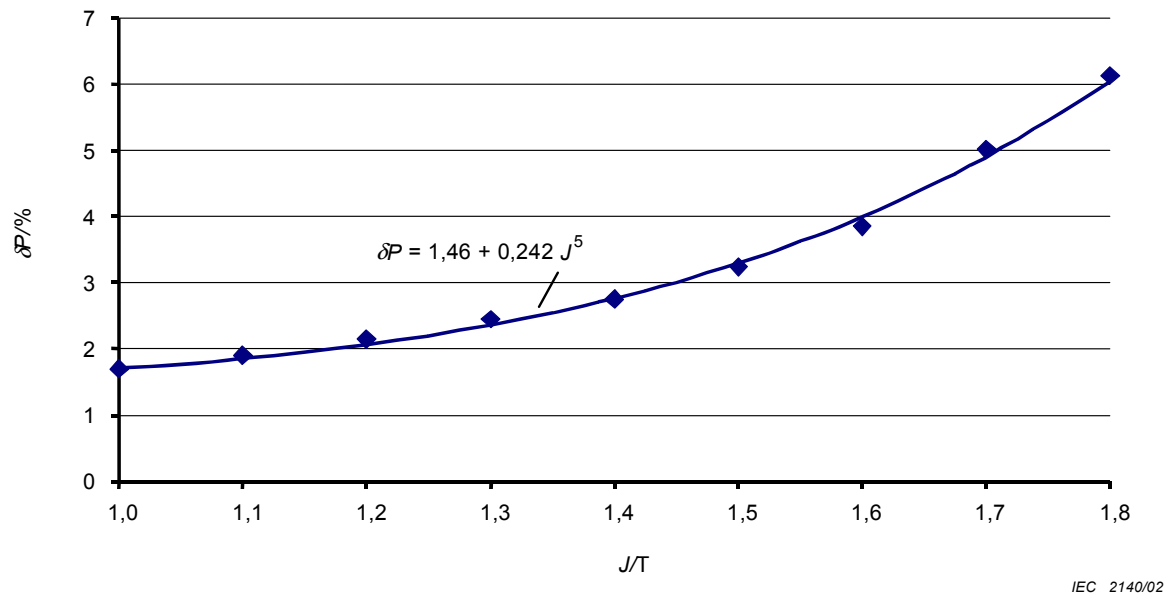
$$\delta HS = 6,0 + 0,103 J^{10} \quad (\text{C.3b})$$

Lorsque J excède $1,8$ T, les équations (C.2a-c) et (C.3a,b) ou une extrapolation graphique peuvent être appliquées.

Les facteurs de conversion obtenus à partir des équations (C.3a) et (C.3b) sont présentés dans le tableau C.1.

Tableau C.1 – Facteurs δP et δHS de conversion Epstein-SST pour matériau à grains orientés dans la gamme de polarisation $1,0$ T à $1,8$ T

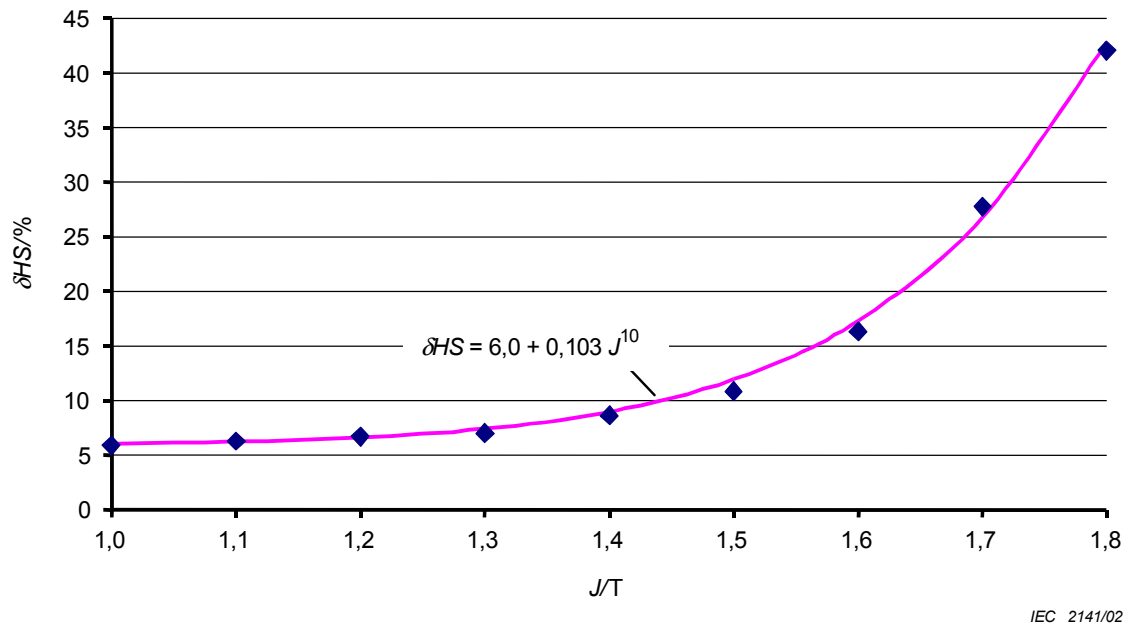
J T	δP %	δHS %
1,0	1,7	6,1
1,1	1,8	6,3
1,2	2,1	6,6
1,3	2,4	7,4
1,4	2,8	9,0
1,5	3,3	12
1,6	4,0	17
1,7	5,0	27
1,8	6,0	43



Légende

Symboles en forme de losange = données expérimentales
Ligne continue = courbe lissée à partir des données expérimentales conformément à l'équation (C.3a)

Figure C.1 – Facteur δP de conversion Epstein-SST pour matériau à grains orientés en fonction de la polarisation magnétique J



Légende

Symboles en forme de losange = données expérimentales
Ligne continue = courbe lissée à partir des données expérimentales conformément à l'équation (C.3b)

Figure C.2 – Facteur δHS de conversion Epstein-SST pour matériau à grains orientés en fonction de la polarisation magnétique J

Annexe D (informative)

Méthodes d'échantillonnage numérique pour la détermination des propriétés magnétiques

D.1 Généralités

La méthode d'échantillonnage numérique est une technique avancée qui devient pratiquement la seule appliquée pour la partie électrique du mode opératoire de mesure décrit dans la présente norme. Elle est caractérisée par la numérisation de la tension secondaire, $U_2(t)$, et de la chute de tension à travers la résistance de précision non inductive en série avec l'enroulement primaire (voir Figures 4 et 6), $U_1(t)$, et l'évaluation des données pour la détermination des propriétés magnétiques de l'éprouvette. Dans ce but, les valeurs instantanées de ces tensions d'index respectifs j , u_{2j} et u_{1j} sont échantillonnées et bloquées simultanément comme fonctions «tension en fonction du temps» pendant des durées courtes et équidistantes, par des circuits échantillonneurs-bloqueurs. Elles sont ensuite immédiatement converties en valeurs numériques par des convertisseurs analogique/numérique (ADC). Les données par paires échantillonnées sur une ou plusieurs périodes, l'éprouvette et les paramètres de réglage donnent ensemble l'information complète pour une mesure. Cet ensemble de données permet le traitement informatique pour la détermination de toutes les propriétés magnétiques exigées dans la présente norme.

La méthode d'échantillonnage numérique peut être appliquée aux modes opératoires de mesure qui sont décrits dans la partie principale de cette norme. Le schéma fonctionnel de la Figure 4 s'applique de la même manière aux méthodes analogiques et à la méthode d'échantillonnage numérique; la méthode d'échantillonnage numérique permet la réalisation de toutes les fonctions des équipements de mesure des Figures 4 à 6 par un système intégrant le matériel et le logiciel d'acquisition de données. Le contrôle de la forme sinusoïdale de la tension secondaire peut aussi être réalisé par une méthode numérique. Cependant, le but et le mode opératoire de cette technique sont différents de ceux de la présente annexe et ne sont pas traités ici. Des informations supplémentaires sont disponibles dans [3] et [4].

Cette annexe aide à comprendre l'impact de la méthode d'échantillonnage numérique sur le niveau de précision accessible par les méthodes de la présente norme. Cela est particulièrement important car, puisque les circuits ADC, les enregistreurs de transitoires et les logiciels sont facilement disponibles, cela incite à construire son propre wattmètre. La méthode d'échantillonnage numérique peut donner une faible incertitude mais elle conduit à de lourdes erreurs si elle est utilisée de façon incorrecte.

D.2 Détails techniques et exigences

Le principe de la méthode d'échantillonnage numérique est la discrétisation de la tension et du temps, c'est-à-dire le remplacement du temps infinitésimal dt par l'intervalle de temps fini Δt :

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{f \cdot n} = \frac{1}{f_s} \quad (\text{D.1})$$

où

Δt est l'intervalle de temps entre les points d'échantillonnage, en secondes;

T est la longueur de la période de magnétisation, en secondes;

n est le nombre de valeurs instantanées échantillonnées sur une période;

f est la fréquence de magnétisation, en hertz;

f_s est la fréquence d'échantillonnage, en points par secondes.

Pour obtenir des incertitudes plus faibles, il convient que la longueur de la période de magnétisation divisée par l'intervalle de temps entre les points d'échantillonnage, c'est-à-dire le rapport f_s/f , soit un nombre entier (condition de Nyquist [7]) et il convient que la fréquence d'échantillonnage, f_s , soit supérieure à deux fois la bande passante du signal d'entrée.

Pour un voltmètre détectant la valeur moyenne, la valeur crête de la densité de flux peut être calculée par la somme des valeurs de u_{2j} échantillonnées sur une période, comme suit:

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

Le calcul de la perte totale spécifique est réalisé par la multiplication point par point des valeurs de u_{2j} et u_{1j} et la somme sur une période, comme suit ²:

$$P_s = \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \frac{1}{T} \int_{t=0}^T U_1(t) U_2(t) dt \cong \frac{N_1}{l_m R N_2 A \rho_m} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{1j} u_{2j} \quad (D.3)$$

où

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

P_s est la perte totale spécifique de l'éprouvette, en watts par kilogramme;

T est la longueur de la période de magnétisation, en secondes;

f est la fréquence de magnétisation, en hertz;

f_s est la fréquence d'échantillonnage, en points par secondes;

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

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

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

R est la résistance de la résistance de précision non inductive R en série avec l'enroulement primaire (voir Figure 6), en ohms;

U_1 est la chute de tension à travers la résistance de précision non inductive R , en volts;

U_2 est la tension secondaire, en volts;

n est le nombre de valeurs instantanées échantillonnées sur une période;

j est l'indice de valeurs instantanées;

l_m est la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique, en mètres ($l_m = 0,45$ m; pour les mesures en relation avec l'étalonnage au moyen des mesures Epstein, voir Annexe B);

ρ_m est la masse volumique conventionnelle du matériau soumis à essai, en kilogrammes par mètre cube.

² La valeur crête de l'intensité du champ magnétique et la puissance apparente peuvent être calculées proportionnellement en utilisant

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

Les paires de valeurs u_{2j} et u_{1j} peuvent être traitées par ordinateur ou, en temps réel, par un processeur de signal numérique (DSP) en utilisant un multiplicateur-sommeur numérique suffisamment rapide et sans exigence de stockage intermédiaire. Maintenir la condition de Nyquist est possible uniquement lorsque la fréquence d'échantillonnage f_s et la fréquence de magnétisation f sont dérivées d'une horloge à fréquence commune élevée et, par conséquent, possèdent un rapport entier f_s/f . Dans ce cas, $U_1(t)$ et $U_2(t)$ peuvent être balayées en utilisant 128 échantillons par période avec une précision suffisante. D'après le théorème de Shannon, cette figure est déterminée par la fréquence correspondante la plus élevée dans le signal $H(t)$, qui n'est normalement pas supérieure à celle de la 41^{ème} harmonique [5]. Cependant, certains équipements d'acquisition de données du commerce ne peuvent pas être synchronisés avec la fréquence de magnétisation et, en conséquence, le rapport f_s/f n'est pas un nombre entier, c'est-à-dire que la condition Nyquist n'est pas remplie. Dans ce cas, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit considérablement plus élevée (500 échantillons par période ou plus) de façon à maintenir faible l'écart de longueur de période vraie par rapport au temps le plus proche du point échantillonné. Maintenir la condition de Nyquist devient un avantage décisif dans le cas des applications de fréquence plus élevée (par exemple à 400 Hz, qui se situe dans le domaine d'application de la présente norme). L'utilisation d'un filtre anti-repliement spectral passe-bas [7] est recommandée pour éliminer les composantes de fréquence plus élevée non pertinentes qui pourraient par ailleurs interférer avec le processus d'échantillonnage numérique en produisant un bruit de repliement spectral.

En ce qui concerne la résolution pour l'amplitude, les études [5, 6] ont montré qu'en dessous d'une résolution de 12 bits, l'erreur de numérisation peut être considérable, en particulier pour un matériau non orienté ayant une teneur élevée en silicium. On recommande donc au moins une résolution de 12 bits pour l'amplitude donnée. En outre, il convient que les deux canaux de tension transfèrent les signaux sans déphasage significatif. Il convient que le déphasage soit assez faible pour que l'incertitude de mesurage de la puissance spécifiée dans la présente norme, soit 0,5 %, ne soit pas dépassée. Plus le facteur de puissance $\cos(\varphi)$ (φ étant le déphasage entre les composants fondamentaux des deux signaux de tension) est petit, plus la prise en compte du déphasage est pertinente. Pour cette raison, le concept d'un canal unique avec un multiplexeur conduisant à des temps d'échantillonnage différents pour les valeurs instantanées des deux tensions n'est pas recommandé.

Les amplificateurs de conditionnement du signal sont de préférence à courant continu et couplé pour éviter tout déphasage à basse fréquence. Cependant, les décalages de courant continu dans les amplificateurs de conditionnement du signal peuvent conduire à d'importantes erreurs dans les valeurs calculées numériquement. On peut annuler les corrections numériques pour éliminer de tels décalages de courant continu.

D.3 Aspects d'étalonnage

La vérification des exigences de répétabilité et de reproductibilité de cette norme rend nécessaire un étalonnage soigné de l'équipement de mesurage. Les deux canaux de tension y compris les préamplificateurs et l'ADC peuvent être étalonnés en utilisant une source de tension en courant alternatif de référence [8]. De plus, il convient de vérifier la caractéristique de phase des deux canaux et sa dépendance à la fréquence et, si possible, de les prendre en compte par le processus d'évaluation de l'ordinateur. Dans tous les cas, il ne sera peut-être pas suffisant d'étalonner le réglage en utilisant des échantillons de référence parce que cet étalonnage serait efficace uniquement pour cette combinaison de matériau et de condition de mesure.

Bibliographie

- [1] SIEVERT J., AHLERS H., BROSIN P., CUNDEVA M. et LUEDKE J. *Relationship of Epstein to SST Results for Grain-Oriented Steel*. 9th ISEM Conference (1999), published in: P.di Barba, A.Savini (editors): *Non-Linear Electromagnetic Systems*, ISEM'99, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 18, IOS Press, Amsterdam, 2000, p.3-6.
- [2] SIEVERT, J. *The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel - Survey on Methods and Situation of Standards*. SMM 14 Conference, Balatonfuered, Hungary, September 1999, *J.Magn.Magn. Mater.*, **215-215** (2000) p. 647-651.
- [3] FIORILLO, F., *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism. Academic Press (2004), ISBN: 0-12-257251-3.
- [4] 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
- [5] AHLERS, H. and SIEVERT, J., *Uncertainties of Magnetic Loss Measurements, particularly in Digital Procedures*. PTB-Mitt. 94 (1984) p. 99-107.
- [6] 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.
- [7] STEARNS, S.D., *Digital signal analysis*. 5th Edition, Hayden Book (1991), ISBN:0-8104 - 5828-4.
- [8] 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.

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch