

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 © 2022 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 l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
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 corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) 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 IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

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

ICS 17.220.20; 29.030

ISBN 978-2-8322-5961-0

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD	4
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 General principles of AC measurements	7
4.1 General	7
4.2 Principle of the single sheet tester method	7
4.3 Test apparatus	7
4.3.1 Yokes	7
4.3.2 Windings	9
4.4 Air flux compensation	10
4.5 Test specimen	10
4.6 Power supply	11
5 Determination of the specific total loss	11
5.1 Principle of measurement	11
5.2 Apparatus	11
5.2.1 Voltage measurement	11
5.2.2 Frequency measurement	12
5.2.3 Power measurement	12
5.3 Measurement procedure of the specific total loss	12
5.3.1 Preparation of measurement	12
5.3.2 Adjustment of power supply	12
5.3.3 Measurements	13
5.3.4 Reproducibility of the measurement of the specific total loss	14
6 Determination of magnetic field strength, primary current and specific apparent power	14
6.1 General	14
6.2 Principle of measurement	14
6.2.1 Peak value of the magnetic polarization	14
6.2.2 RMS value of the primary current	14
6.2.3 Peak value of the magnetic field strength	15
6.3 Apparatus	15
6.3.1 Average type voltmeter	15
6.3.2 RMS current measurement	16
6.3.3 Peak current measurement	16
6.3.4 Power supply	16
6.3.5 Resistor R	16
6.4 Measuring procedure	16
6.4.1 Preparation for measurement	16
6.4.2 Measurement	16
6.4.3 Non-oriented material	17
6.5 Determination of characteristics	17
6.5.1 Determination of $\hat{J}$	17
6.5.2 Determination of $\tilde{H}$	17
6.5.3 Determination of $\hat{H}$	18

6.5.4	Determination of S_S	18
6.5.5	Reproducibility of the measurement of the specific apparent power	19
7	Test report.....	19
Annex A (normative) Requirements concerning the manufacture of yokes.....		20
Annex B (informative) Check and verification of reliable performance of the SST set-up by the use of reference samples and impact of the loss dissipated in the yokes		22
Annex C (informative) Epstein to SST relationship for grain-oriented steel sheet		25
Annex D (informative) Digital sampling methods for the determination of the magnetic properties and numerical air flux compensation		28
D.1	General.....	28
D.2	Technical details and requirements	28
D.3	Calibration aspects	30
D.4	Numerical air flux compensation	30
Bibliography.....		32
Figure 1 – Schematic diagrammes of the test apparatus		8
Figure 2 – Yoke dimensions		9
Figure 3 – Diagram of the connections of the five coils of the primary winding		9
Figure 4 – Circuit for the determination of the specific total loss.....		10
Figure 5 – Circuit for measuring the RMS value of the primary current.....		15
Figure 6 – Circuit for measuring the peak value of the magnetic field strength		15
Figure B.1 – Specific total loss vs. peak flux density (after J.Sievert [3] and G. Bertotti [4]); straight line: $P_S \propto B^{1.85}$ approximation (after C.Ragusa).		23
Figure C.1 – SST-Epstein relative difference δP for conventional grain-oriented material versus magnetic polarization J		27
Figure C.2 – SST-Epstein relative difference δHS for conventional grain-oriented material versus magnetic polarization J		27
Table B.1 – Loss dissipated by the yokes of a standard SST, determined from the loss curves measured on 3 yoke pairs as shown in Figure B.1, and relevant quantities including the relative yokes' contribution, p_Y ; exemplified using 5 standard grades		24
Table C.1 – SST-Epstein relative differences δP and δHS and the conversion factor F_C for conventional grain-oriented material in the polarization range 1,0 T to 1,8 T		26

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.

IEC 60404-3 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels. It is an International Standard.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1992, Amendment 1:2002 and Amendment 2:2009. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) Annex A was revised. The method of determining the yokes' lamination resistance was added to Annex A;
- b) Annex B of the consolidated version of 2010 referred to calibration of the SST using the Epstein method. It was cancelled;
- c) Annex B (new), Annex C and Annex D were revised, they are for information only;
- d) Annex C was modified taking account of the new situation regarding P and R grades;
- e) Annex D was amended by addition of Clause D.4 on the numerical air flux compensation.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
68/699/CDV	68/710/RVC

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

A list of all parts in the IEC 60404 series, published under the general title *Magnetic materials*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

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

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document 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 Scope

This part of IEC 60404 is applicable to grain-oriented and non-oriented electrical steel strip and sheet for measurement of AC magnetic properties at power frequencies.

The object of this document is to define the general principles and the technical details of the measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester (SST).

The single sheet tester is applicable to test specimens obtained from electrical steel strips and sheets of any grade. The AC magnetic characteristics are determined for sinusoidal induced voltages, for specified peak values of the magnetic polarization, for specific peak values of the magnetic field strength and for a specified frequency.

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

NOTE Throughout this document, the quantity "magnetic polarization" is used as defined in IEC 60050-221. In some standards of the IEC 60404 series, the quantity "magnetic flux density" was used.

In order to support the long-term reliability of the performance of this set up and to understand better the relationship between the Epstein method and the SST method, the informative Annexes B and C, respectively, have been included.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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 60050-121, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 121: Electromagnetism*

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

IEC 60404-13, *Magnetic materials – Part 13: Methods of measurement of resistivity, density and stacking factor of electrical steel strip and sheet*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-121 and IEC 60050-221 apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>

- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

4 General principles of AC measurements

4.1 General

Clause 4 specifies the general conditions for the determination of AC magnetic properties of electrical steel strip and sheet at power frequencies by means of a single sheet tester.

4.2 Principle of the single sheet tester method

The test specimen comprises a sample of electrical steel sheet and is placed in the center of two concentric 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).

The temperature changes of the specimen shall be kept below a level likely to produce stress in the test specimen due to thermal expansion or contraction.

4.3 Test apparatus

4.3.1 Yokes

Each yoke is in the form of a U made up of insulated sheets of grain-oriented electrical steel. It shall have a low reluctance and a low specific total loss in the low magnetic polarization region below 0,2 T (see Annex A). It shall be manufactured in accordance with the requirements of Annex A.

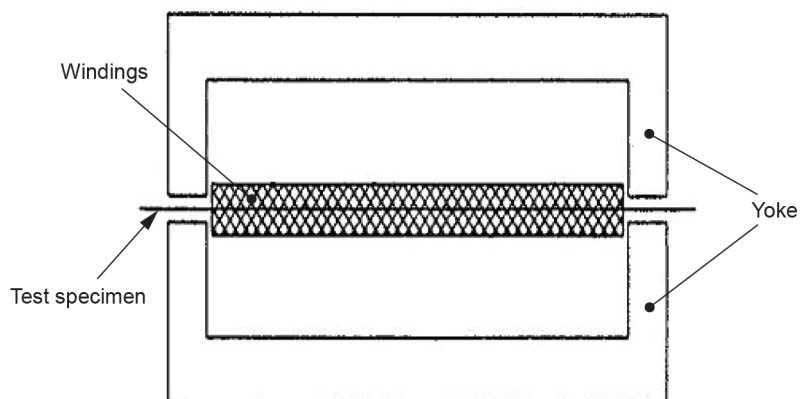
In order to reduce the effect of eddy currents and give a more homogeneous distribution of the flux over the inside of the yokes, the yokes shall be made of a pair of wound cut C-cores or a glued stack of laminations in which case the corners shall have staggered butt joints (see Figure 1).

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 such as twisting, tensioning and compression in the test specimen.

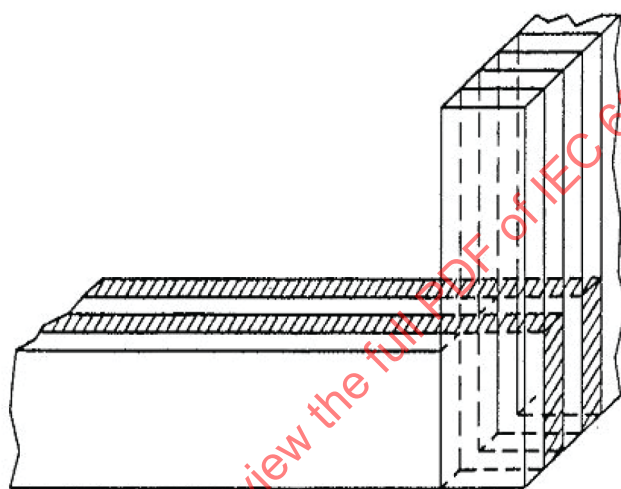
The height of each yoke shall be between 90 mm and 150 mm. Each yoke shall have a width of 500^{+5}_{-0} mm and an inside length of $450 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (see Figure 2).

There shall be a non-conducting, non-magnetic support on which the test specimen is placed, between the vertical limbs of the bottom yokes. This support shall be centered and located in the same plane as the bottom yoke pole faces so that the test specimen is in direct contact with the pole faces without any gap. Care shall be taken that in no case the upper surface of the support is positioned higher than the plane of the pole faces of the bottom yoke.



IEC

a) Cross-section of the SST



IEC

b) Schematic view of the corner of a yoke with stacked lamination

Figure 1 – Schematic diagrammes of the test apparatus

The upper yoke shall be movable upwards to permit insertion of the test specimen. After insertion of the test specimen, the upper yoke shall be lowered to close the magnetic circuit and, simultaneously, the pole faces of the bottom and upper yokes shall be aligned accurately. To minimize the effects of pressure on the test specimen, the upper yoke shall be provided with a means of suspension. 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 configuration 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.

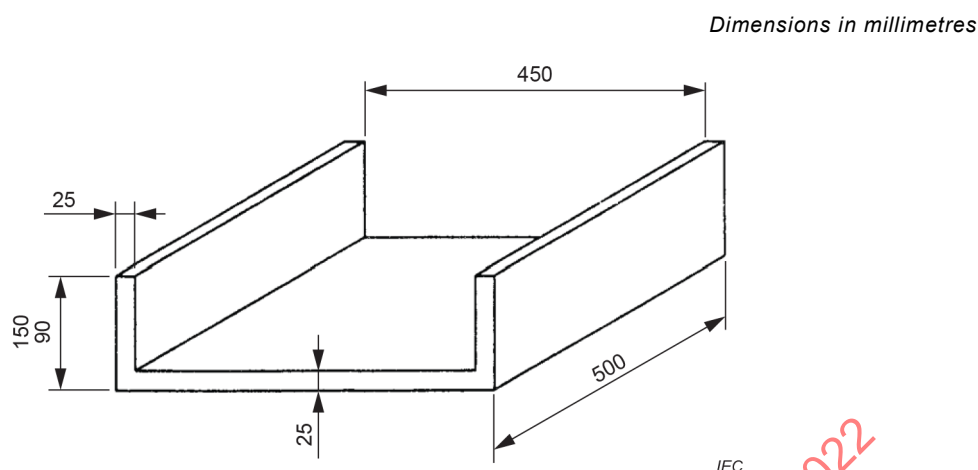


Figure 2 – Yoke dimensions

4.3.2 Windings

The coil system inside the yokes shall have two windings:

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

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

- length: 445 mm $\pm$ 2 mm;
- internal width: 510 mm $\pm$ 1 mm;
- internal height: 5⁰₋₂ mm;
- height: $\leq$ 15 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 layer.

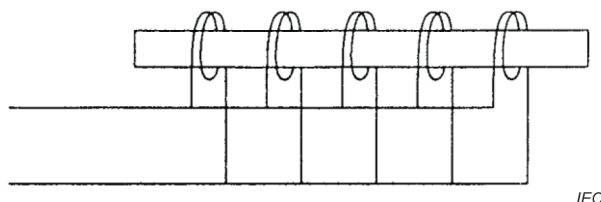
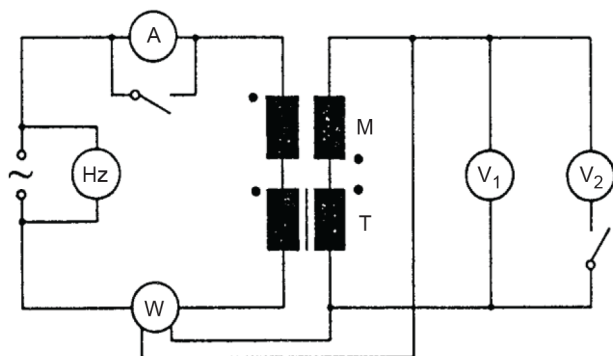


Figure 3 – Diagram of the connections of the five coils of the primary winding

The number of turns on the secondary winding will depend on the characteristics of the measuring instruments. In any case, the determination of the number of turns of the primary and secondary windings shall be made with greatest reliability because a mistake would mean a permanent error.

4.4 Air flux compensation

Compensation shall be made for the effect of air flux. This can be achieved, for example, by a mutual inductor M (see Figure 4). 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.



Key

V_1 is the voltmeter that measures the average rectified voltage;

V_2 is the voltmeter that measures the RMS voltage;

A is the ammeter that measures the RMS value of the primary current;

Hz that measures the frequency;

W that measures the power;

M is the mutual inductor;

T is the test frame.

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

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 test specimen in the test 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.

NOTE 1 Alternatively, the air flux compensation can be executed by the numerical method (for details, see Annex D, Clause D.4).

NOTE 2 In the rest of this document, the term “compensated secondary voltage” is used to mean “voltage induced in the secondary winding compensated for the effect of air flux”.

4.5 Test specimen

The length of the test specimen shall be not less than 500 mm. Although the part of the test 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 optimum accuracy, the minimum width shall be not less than 60 % of the width of the yokes.

NOTE 1 Specific restrictions of the dimensions of the test specimens can be defined for special material grades in the respective product standards for magnetic materials.

NOTE 2 Information about application of the SST to strip samples of 50 mm to 250 mm width: Grain-oriented electrical steel used for distribution transformer (DT) cores is merchandized in the form of slit coils of 50 mm to 250 mm width cut from the as produced steel strips (parent coils) at the different positions across the original strips. The slit coils reflect the considerable variation of the material properties corresponding to the position on the original strip, where they have been cut from. These small strip specimens can be measured using this SST placing them side by side or with distributed gaps in the SST. In order to obtain a relevant measurement result, a minimum of 60 % of the 500 mm wide sample space needs to be filled with strips. The test strip samples can be taken successively from the start or the end of a slit coil. When preparing them taking care would avoid any damage which could influence the test result. Due to the cutting of the sheet into the small strips, the measured loss of narrow strips will be slightly increased compared to the original 500 mm.

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 coil is taken as the reference direction. The angle between the direction of rolling and that of cutting shall not exceed:

- ±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.

4.6 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 compensated secondary voltage shall be maintained as sinusoidal as possible. The form factor of the compensated secondary voltage shall be maintained to within ±1 % of 1,111. This can be achieved by various means, for example by using an electronic feedback amplifier or by a computational digital feedback system.

5 Determination of the specific total loss

5.1 Principle of measurement

The test apparatus with the inserted test specimen represents an unloaded transformer the total loss of which is measured by the circuit shown in Figure 4.

5.2 Apparatus

5.2.1 Voltage measurement

5.2.1.1 Average type voltmeter

The average rectified value of the compensated secondary voltage shall be measured by an average type voltmeter. The preferred instrument is a digital voltmeter having an uncertainty of ±0,2 % or better.

NOTE 1 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.

NOTE 2 For the application of digital sampling methods, see Annex D.

5.2.1.2 RMS voltmeter

A voltmeter responsive to RMS values shall be used. The preferred instrument is a digital voltmeter having an uncertainty of $\pm 0,2$ % or better.

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

5.2.2 Frequency measurement

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

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

5.2.3 Power measurement

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

The ohmic 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, see Formula (3) in 5.3.3.1.

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

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

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

5.3 Measurement procedure of the specific total loss

5.3.1 Preparation of measurement

The length of the test specimen shall be measured with an uncertainty of $\pm 0,1$ % or better and its mass determined within $\pm 0,1$ %. The test specimen shall be loaded and centred on the longitudinal and transverse axes of the windings, 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 knee of the magnetization curve of the test specimen material.

5.3.2 Adjustment of power supply

The power supply output shall be slowly increased until the average rectified value of the compensated secondary voltage, $\overline{|U_2|}$ has reached the required value. This value is calculated from the desired value of the magnetic polarization by means of:

$$\overline{|U_2|} = 4fN_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} A\hat{J} \quad (1)$$

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 the 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 the magnetic polarization, in teslas.

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

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

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 conventional density of the test material, or the value determined in accordance with IEC 60404-13, in kilograms per cubic metre.

5.3.3 Measurements

5.3.3.1 The primary current shall be checked to ensure that the current circuit of the wattmeter is not overloaded. If a current-measuring device is included in the circuit, it shall be short-circuited when the secondary voltage is adjusted and the loss is measured.

After checking that the waveform of the compensated secondary voltage stands within the required tolerances, the wattmeter shall be read. The value of the specific total loss shall then be calculated from the formula:

$$P_s = \left[P \frac{N_1}{N_2} - \frac{(\tilde{U}_2)^2}{R_i} \right] \frac{l}{m l_m} \quad (3)$$

Where P_s

- $\tilde{U}_2$ is the RMS value of the compensated secondary voltage, in volts;
 P_s is the specific total 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 Studies have shown that the inside length between the vertical inner faces of the limbs of the yokes is an appropriate mean value for the effective magnetic path length l_m for various materials under test and polarization values [1]¹.

5.3.3.2 In the case of non-oriented electrical steel, 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 measurement results obtained 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.

5.3.4 Reproducibility of the measurement of the specific total loss

The reproducibility of this method using the test apparatus defined above is characterized by a relative standard deviation of 1 % (for detailed information on the source of this number see [2]) for grain-oriented electrical steel sheet and 2 % for non-oriented electrical steel sheet.

6 Determination of magnetic field strength, primary current and specific apparent power

6.1 General

This Clause 6 describes measuring methods for the determination of the following characteristics:

- peak value of the magnetic polarization $\hat{J}$;
- RMS value of the primary current $\tilde{I}_1$;
- peak value of the magnetic field strength $\hat{H}$;
- specific apparent power S_s .

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

6.2 Principle of measurement

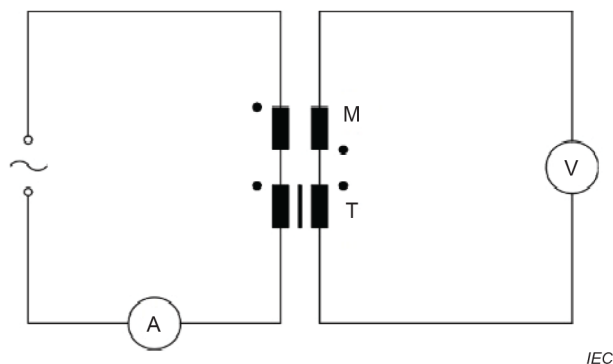
6.2.1 Peak value of the magnetic polarization

The peak value of the magnetic polarization shall be derived from the average rectified value of the compensated secondary voltage measured as described in 5.2.1.1.

6.2.2 RMS value of the primary current

The RMS value of the primary current shall be measured by an RMS ammeter in the circuit of Figure 5.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

**Key**

V is the voltmeter that measures the average rectified voltage;

A is the ammeter that measures the RMS value of the primary current;

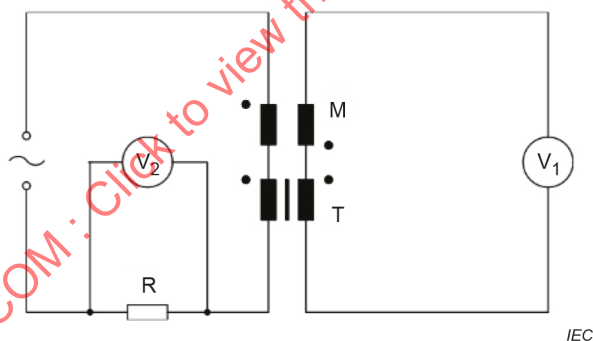
M is the mutual inductor;

T is the test frame.

Figure 5 – Circuit for measuring the RMS value of the primary current

6.2.3 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 as described in 6.3.5 using an electronic voltmeter of high sensitivity indicating the peak value as shown as V_2 in Figure 6.

**Key**

V_1 is the voltmeter that measures the average rectified value of the compensated secondary voltage;

V_2 is the voltmeter that measures the peak value (or the RMS value, see 6.3.2) of the voltage drop across the non-inductive precision resistor;

R is the non-inductive precision resistor;

M is the mutual inductor;

T is the test frame.

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

6.3 Apparatus

6.3.1 Average type voltmeter

The average type voltmeter shall be in accordance with 5.2.1.1.

6.3.2 RMS current measurement

The RMS value of the primary current shall be measured either by means of an RMS ammeter of low impedance of class 0,5 or better (see Figure 5), or by using a precision resistor and an RMS voltmeter described in 5.2.1.2 (see Figure 6, in this case the peak voltmeter is to be replaced by an RMS voltmeter).

6.3.3 Peak current measurement

The measurement of the peak voltage across the resistor R (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.

A peak voltmeter having an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better shall be used.

6.3.4 Power supply

The power supply shall be in accordance with 4.6.

6.3.5 Resistor R

The method shown in Figure 6 requires a precision non-inductive resistor R of a value known to within $\pm 0,1$ %.

The resistance value of the resistor R shall not exceed $1\ \Omega$ in order to minimize the distortion of the magnetizing voltage and, thus, to facilitate the sinusoidal waveform of the induced secondary voltage.

6.4 Measuring procedure

6.4.1 Preparation for measurement

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

Before the measurement, the test specimen shall be demagnetized by slowly decreasing an alternating magnetic field starting from well above the knee of the magnetization curve of the test specimen material.

6.4.2 Measurement

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

If the peak value of the magnetic field strength is specified and the peak value of the magnetic polarization is to be determined, the primary current shall be set to give the relevant magnetic field strength (see below). Then the compensated secondary voltage of the test apparatus shall be read on the average type voltmeter (see 5.2.1.1).

Again, if the peak value of the magnetic polarization is specified and the peak value of the magnetic field strength is to be determined, the secondary voltage shall be set to its specified value as described in 5.3.2.

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

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

6.4.3 Non-oriented material

In the case of non-oriented material, for the peak value of the magnetic polarization $\hat{J}$ at the peak value of the magnetic field strength $\hat{H}$ specified in the product standards for magnetic materials, the reported value of $\hat{J}$ shall be calculated as the average over the two measurement results obtained for the directions parallel and perpendicular to the direction of rolling. For values of $\hat{J}$ for other purposes and for the measurement of the specific apparent power and the RMS value of the primary current, the values obtained for the directions parallel and perpendicular to the direction of rolling shall be reported separately.

6.5 Determination of characteristics

6.5.1 Determination of $\hat{J}$

6.5.1.1 Peak value $\hat{J}$ of the magnetic polarization

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

$$\hat{J} = \frac{1}{4fN_2A} \frac{R_i + R_t}{R_i} \overline{|U_2|} \quad (4)$$

where

- $\hat{J}$ is the peak value of the magnetic polarization, in teslas;
- 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_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 the mutual inductor, in ohms;
- $\overline{|U_2|}$ is the average rectified value of the compensated secondary voltage, in volts.

6.5.1.2 Reproducibility of $\hat{J}$

The reproducibility of this method using the test apparatus defined above is characterized by a relative standard deviation of 0,25 %.

6.5.2 Determination of $\tilde{H}$

The RMS value of the magnetic field strength shall be calculated from the RMS value of the primary current indicated by the RMS ammeter in the circuit of Figure 5 or by the RMS voltmeter in the circuit of Figure 6 as described in 6.3.2:

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

where

$\tilde{H}$ is the RMS 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 RMS value of primary current, in amperes.

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

6.5.3 Determination of $\hat{H}$

The peak value of the magnetic field strength shall be calculated from the peak value of the primary current $\hat{U}_m / R_n$ indicated by the peak voltmeter in the circuit of Figure 6 as described in 6.3.3:

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

where

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

R_n is the resistance value of the non-inductive precision resistor R in Figure 6, in ohms;

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

NOTE 1 The amplitude permeability is expressed as:

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

NOTE 2 After several groups of corresponding values of $\hat{J}$ and $\hat{H}$ have been determined, the magnetization curve of $\hat{J}$ against $\hat{H}$ can be drawn.

6.5.4 Determination of S_s

The apparent power is given by:

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

where

S is the apparent power, in voltamperes;

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

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

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

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

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;

m_a is the effective 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 RMS value of primary current, in amperes.

6.5.5 Reproducibility of the measurement of the specific apparent power

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

7 Test report

The test report shall include the following, as applicable.

- a) the type and identity of test specimen;
- b) the density of material (conventional or as determined in accordance with IEC 60404-13)
- c) the length and width of test specimen;
- d) the ambient temperature of measurement;
- e) the measurement frequency;
- f) the peak values of the magnetic polarization or the magnetic field strength;
- g) the results of the measurements.

Annex A (normative)

Requirements concerning the manufacture of yokes

It is important to ensure that the power loss dissipated by the yokes is stable and small compared with the total power loss dissipated by the specimen. A power loss of 1 mW/kg at a magnetic flux density of 40 mT or of 0,1 mW/kg at 10 mT are typical, measured at a frequency of 50 Hz (see Figure B.1 and Table B.1). Ways in which the loss can become high are short circuits between laminations in the yokes and uneven distribution of the magnetic flux inside the yokes. For the measurement of the power loss dissipated by the yokes, a primary and a secondary winding wound on the yokes or on appropriate formers shall be used. Four sets of outer primary and inner secondary windings shall be arranged symmetrically on the four vertical limbs of the yokes and switched in series connection. The number of turns depends on the configuration of the measurement instruments. As a typical case, the number of 25 turns for each sub-winding was found to work properly. The windings shall be disconnected when not used for the yokes' loss measurement.

During the manufacture of the yokes with stacked lamination, 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 engineer's blue. Further grinding in stages using carborundum and diamond paste will probably be necessary until a uniform distribution of the engineer's 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.

With wound cut C-cores corresponding measures shall be taken so that equivalent performance characteristics are achieved.

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 neutralize and wash away the acid remaining on the pole faces and between the laminations.

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

A thorough check of the inter-laminar insulation of the yokes with stacked lamination shall be made after pole face etching and cleaning. The electrical resistance of the laminations of the upper and the bottom yokes shall be measured separately. The resistance of all the 10 sections, 5 cm long each, along the pole faces of the yokes shall be measured using a contact pattern strip (see, for instance, Figure 3 in [2]) and an ohmmeter with an uncertainty of 1 % or better. For monitoring that the transition resistance at each contact is negligible, the resistance measurements shall be expanded over all groups of two neighbouring 5-cm sections, i.e. over all section pairs 10 cm in length. The resistance value of the 10-cm section pairs shall agree within 5 % with the sum of the two resistance values measured separately over the respective two 5-cm sections. For proper contact, it is recommended to apply a thin strip of slightly compressible non-conductive material under the contact strip (correspondingly, on top of the contact strip when measuring the bottom yoke). The measurements can be made at the air gap of the front side while the rear side air gap shall be equipped with a strip of isolating material. For the measurements, the upper yoke shall be set down on the lower yoke.

The resistance value of each 5-cm section of both yokes shall be 10 Ω at least. This minimum value was found with the high quality yokes in the series studied in the exercise shown in Figure 4 of IEC TR 62981:2017 [2]. The resistance measured between the outermost laminations of the yokes (over the full length of 50 cm) is then 100 Ω at least. For the case of wound cut C-core yokes it is estimated that, correspondingly, the resistance measured between

the outermost laminations shall be again not less than 100 Ω : Thus, the outermost eddy current path encloses the same magnetic flux in both cases of lamination type.

The inspection of the yokes shall be documented by the manufacturer of the measurement set-up in a detailed record.

NOTE Details of how to measure the resistivity of the yokes' 5-cm sections are given in IEC TR 62981 [2].

Before use, the yokes shall be carefully demagnetized from a magnetic flux density well above the knee of the magnetization curve of the yoke material. The windings for the yokes' loss measurement can be used for the demagnetizing. The power loss dissipated by the yokes at the magnetic polarization which would occur inside the yokes during use shall be measured and recorded by the manufacturer of the SST set-up in the course of the mandatory quality check of the yokes before delivery.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-3:2022

Annex B

(informative)

Check and verification of reliable performance of the SST set-up by the use of reference samples and impact of the loss dissipated in the yokes

The continuous checking of the performance reliability of a SST set-up is recommended to be properly managed by the use of reference samples. This is particularly relevant with test specimens of high permeability materials which are most sensitive with regard to performance alterations of the set-up. It is recommendable that the laboratory has a set of reference samples to their disposal which represents the properties of the materials the set-up is mostly used for.

It is also recommended to provide reference samples with magnetic properties certificated by standards laboratories that have taken part to the latest IEC round robin tests [2] and are able to trace the sample's magnetic characteristics to the results of that RRT, or by laboratories having a specific accreditation.

If conspicuous deviation from expected values appear which also are reproduced when applying a reference sample of known magnetic characteristics, a check of the electrical measuring part of the set-up should additionally be made using appropriate means, for instance a calibrated double signal generator delivering certified electrical power values in the relevant measurement range.

The systematic error of the SST method is formed by the magnetic loss dissipated in the flux closing yokes (see 4.3.1). Its relative contribution to the measured loss value depends on the flux density, grade and thickness of the specimen under test and amounts to about 2 % for high quality electrical steel sheets at 1,7 Tesla. To benchmark this relative to Epstein frames' performance, it is noted that, roughly, the SST measures the specific total loss too high by 2 % and the Epstein frame too low by 4 % (see also [2]).

Studies on the performance of three standard yoke systems (Figure 1), two with a stacked lamination (SST1 and SST3) and one with wound C-cut core lamination (SST2) were made at the German standard institute PTB [3] in 1990. The measurement results are shown in Figure B.1 supplemented by Epstein measurements in the upper region made at IENGf by G. Bertotti [4]. They present the loss dissipated by various yokes systems and corresponding Epstein measurements in the low flux density region which reflect the situation in the yokes under test conditions.

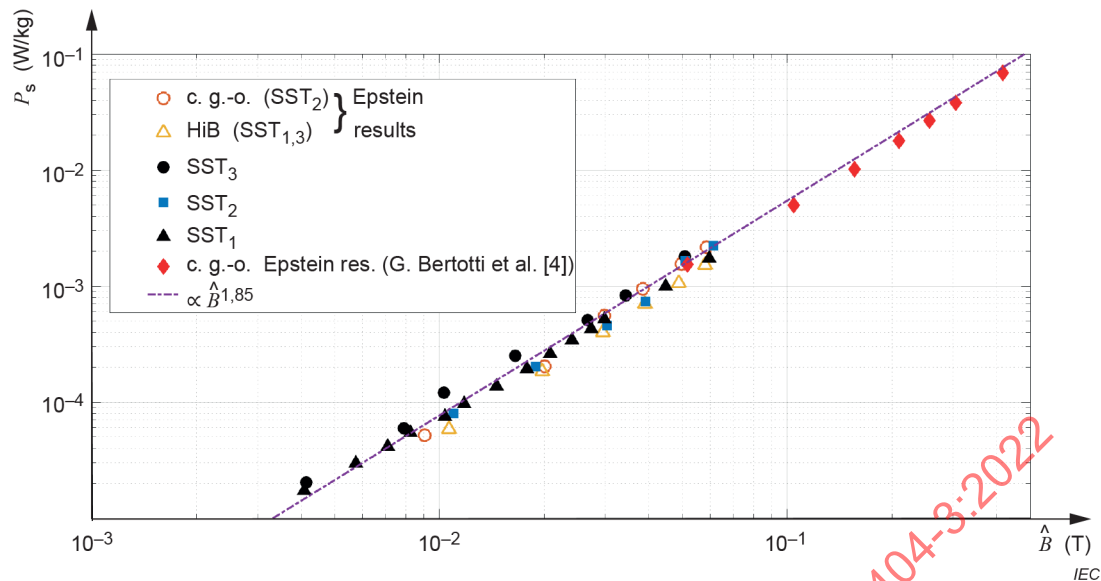


Figure B.1 – Specific total loss vs. peak flux density (after J. Sievert [3] and G. Bertotti [4]); straight line: $P_s \propto B^{1.85}$ approximation (after C. Ragusa).

It can be seen that the three yoke systems, including the wound C-cut core type, show agreement within a certain statistical dispersion. The Epstein results of corresponding S-type (c.g.-o.) and P-type (HiB) grain-oriented material are located - also G. Bertotti's results in the upper part - a bit below the yokes' results. Generally it appears that, in the very low flux density region, the performance of different yokes systems is equalized because the magnetizing processes are dominated by domain wall bowing without excess loss production as also can be concluded from the zero Barkhausen noise in that region. These phenomena could also explain the amazing agreement of performance of a variety of 10 yokes within the IEC RRT (2013/2014) [2]. Moreover, in line with this picture are the findings reported by SST manufacturers, that strong loss variation between yokes made of different materials in the 1.0 T to 1.7 T region are not reflected in the 10 mT region, i.e. the variations in high flux region appear to be not really relevant to the yokes' quality under the relevant test conditions.

The measured loss characteristic of yoke loss values for the relevant flux densities allow to determine the relative contribution of the yokes, p_Y :

$$p_Y = \frac{P_Y}{P_{Sp}} \quad (\text{B.1})$$

where

P_Y is the power loss dissipated by the yokes under test conditions, in watts;

P_{Sp} is the total loss of the model specimen at 1,7 T, in watts.

Table B.1 shows 5 examples of grades and their relevant quantities under test conditions at 1,7 T using the data given in Figure B.1. They demonstrate the contribution of the yokes to the measured value of the total specific loss.

Table B.1 – Loss dissipated by the yokes of a standard SST, determined from the loss curves measured on 3 yoke pairs as shown in Figure B.1, and relevant quantities including the relative yokes' contribution, p_Y ; exemplified using 5 standard grades

Steel name (examples of grades)	Nominal thickness of specimen, d mm	Nominal Loss, P_{sp} of modelling specimen at 1,7 T W	Flux density $\hat{j}_y$ of yokes at 1,7 T of specimen T	Specific total loss in yokes at 1,7 T of specimen W/kg	Total loss in yokes, P_Y at 1,7 T in the specimen W	Relative contribution of the yokes $p_Y = P_Y/P_{sp}$ (x100), %
M130-30S5	0,30	0,658	0,010 2	0,000 085	0,011	1,7
M100-27P5	0,27	0,456	0,009 2	0,000 068	0,008 8	1,9
M90-23P5	0,23	0,349	0,007 8	0,000 050	0,006 5	1,9
M80-23P5	0,23	0,310	0,007 8	0,000 050	0,006 5	2,1
M70-20P5	0,20	0,236	0,006 8	0,000 040	0,005 2	2,2

The subtraction of the yokes' power loss will effectuate that the result approaches the physical true value of loss. However, it should be taken into account that the method is afflicted with considerable indeterminacy due to the imperfectness of the model used at the air gap region and the difficult measurement condition in the low flux region. The uncertainty of this correction procedure is estimated to amount to 10 % to 20 % of the correction (error of error).

Annex C (informative)

Epstein to SST relationship for grain-oriented steel sheet

This Annex C does not form part of the requirements of this document. It is included for information for those who wish to convert SST values into Epstein values and vice versa. It should be noted that the determination of the Epstein/SST ratio usually shows a considerable dispersion from sample-to-sample pair even for identical grades. In fact, this was the reason for defining an SST method independent from the Epstein method (changing SST(1982) to SST (1992)).

This Annex C 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. The general validity of the presented relationships is restricted because it is subject to larger uncertainty of the conversion due to the statistical scatter through the varying internal stress of the individual sheet samples and, even more relevant, through the considerable scattering of the Epstein strip samples preparation with GO materials. The dispersion of the presented relative SST- Epstein difference results δP amounts to about ± 2 % (for the whole range of $\hat{J}$) for the specific total loss, P_s , from about ± 2 % (at $\hat{J} = 1,3$ T) to ± 10 % (at 1,7 T) for the field strength quantities, H , and from about ± 5 % (at 1,3 T) to ± 20 % (at 1,7 T) for the specific apparent power ([5] and [6]). The dispersion (uncertainty) values are also a rough estimation only because the scatter is not normally distributed. Thus, to avoid misunderstanding, it was abstained from indicating error bars in the diagrams.

The relationships were achieved on the basis of Epstein and SST measurements on about 740 samples of the most significant S-type grain-oriented grades, supplied by eight different manufacturers and taken from different production runs. For further details see [5] and [6]. This study did include very few of high permeability (P) grades which did not show specific performance.

This informative Annex C is not applicable to the new group of R-type domain-refined (RD) materials for which, after intense discussions on this issue, a specific SST to Epstein conversion factor $F_c = 0,925$ at $\hat{J} = 1,7$ T was introduced [7]. Transformer designers report that they also apply the findings presented in this Annex C to the design of transformers using non domain-refined P-type materials.

The relationship between Epstein and SST results can be described by the relative differences (in %) 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 using the following formulas:

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

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

$$S_{s,SST} = S_{s,EPS} \times (1 + \delta HS/100) \quad (C.3)$$

Correspondingly, the conversion in the reverse direction can be carried out using the inverse of Formulae C.1, C.2 and C.3 resulting in Formulae C.4, C.5 and C.6:

$$P_{s,EPS} = P_{s,SST} / (1 + \delta P/100) \quad (C.4)$$

$$H_{\text{EPS}} = H_{\text{SST}} / (1 + \delta HS/100) \quad (\text{C.5})$$

$$S_{\text{s,EPS}} = S_{\text{s,SST}} / (1 + \delta HS/100) \quad (\text{C.6})$$

NOTE The relation between the Conversion Factor F_c and δP is given by the formula $F_c = 1/(1+\delta P/100)$.

The averaged relative differences as determined from the experiments (see reference [5] and [6]) are shown as rhombus symbols in the diagrams of Figure C.1 for δP and Figure C.2 for δHS . The values for $\hat{J}$, 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:

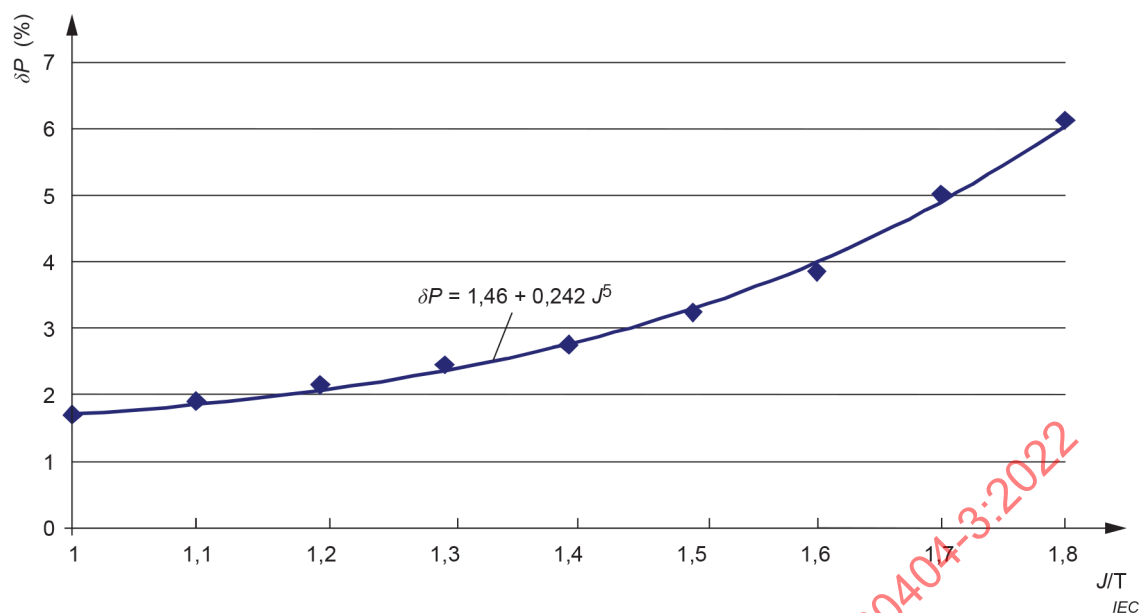
$$\delta P = 1,46 + 0,242 \hat{J}^5 \quad (\text{C.7})$$

$$\delta HS = 6,0 + 0,103 \hat{J}^{10} \quad (\text{C.8})$$

The relative differences as obtained from Formulae (C.7) and (C.8) and the related conversion factor are presented in Table C.1. As remarked above, the values aim first and foremost at S-type grain-oriented grades, however, the application to non-domain refined P-grade materials has also been reported.

Table C.1 – SST-Epstein relative differences δP and δHS and the conversion factor F_c for conventional grain-oriented material in the polarization range 1,0 T to 1,8 T

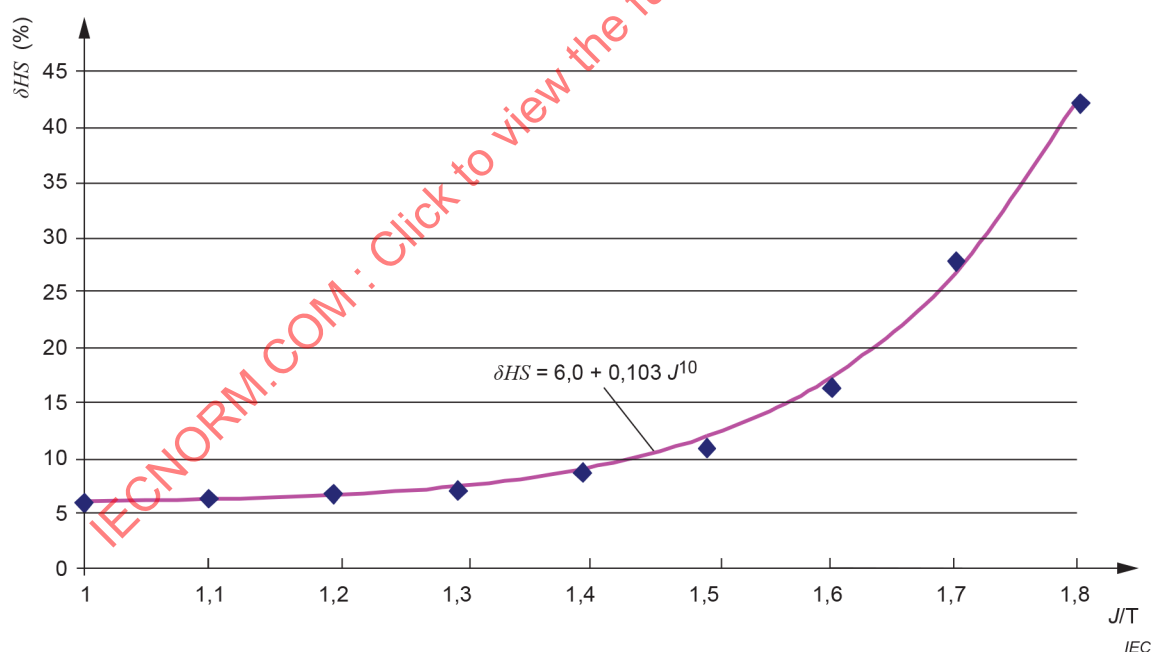
$\hat{J}$ T	δP %	δHS %	$F_c = 1/(1+\delta P/100)$
1,0	1,7	6,1	0,983
1,1	1,8	6,3	0,982
1,2	2,1	6,6	0,979
1,3	2,4	7,4	0,977
1,4	2,8	9,0	0,973
1,5	3,3	12	0,968
1,6	4,0	17	0,962
1,7	5,0	27	0,952
1,8	6,0	43	0,943

**Key**

Rhombus symbols = experimental data (values at 1,0 T to 1,2 T were extrapolated using the measured values)

Continuous line = curve fit to the experimental data according to Formula (C.7)

Figure C.1 – SST-Epstein relative difference δP for conventional grain-oriented material versus magnetic polarization $\hat{J}$

**Key**

Rhombus symbols = experimental data (values at 1,0 T to 1,2 T were extrapolated using the measured values).

Continuous line = curve fit to the experimental data according to formula (C.8).

Figure C.2 – SST-Epstein relative difference δHS for conventional grain-oriented material versus magnetic polarization $\hat{J}$

Annex D (informative)

Digital sampling methods for the determination of the magnetic properties and numerical air flux compensation

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 document. It is characterized by the digitalization of the compensated 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 the narrow and equidistant time periods each by sample-and-hold circuits. They are then immediately converted to digital values by analogue-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 document.

The digital sampling method may be applied to the measurement procedures which are described in the main part of this document. 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 equipment in Figure 4, Figure 5 and Figure 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 D and are not treated here. More information can be found in [8] and [9].

This Annex D is helpful in understanding the impact of the digital sampling method on the precision achievable by the methods of this document. 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 [10] and the sampling frequency, f_s , should be greater than twice the higher order harmonic of the input signal (Nyquist-Shannon condition [10]).

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:

$$\hat{J} = \frac{1}{4fN_2A} \frac{1}{T} \int_0^T |U_2(t)| dt \cong \frac{1}{4f_sN_2A} \sum_{j=0}^{n-1} |u_{2j}| \quad (D.2)$$

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:

$$P_s = \frac{1}{l_m A \rho_m} \left(\frac{N_1}{R_n N_2} \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t) U_2(t) dt - \frac{\tilde{U}_2^2}{R_i} \right) \cong \frac{1}{l_m A \rho_m} \left(\frac{N_1}{R_n N_2} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{1j} u_{2j} - \frac{1}{R_i} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{2j}^2 \right) \quad (D.3)$$

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_n 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);
- ρ_m is the conventional density of the test material, in kilograms per cubic metre.
- R_i is the combined resistance of the instruments in the secondary circuit, in ohms;
- $\tilde{U}_2$ is the RMS value of the voltage induced in the secondary winding, in volts.

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

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

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 [11]. 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 document). The use of a low-pass anti-aliasing filter [10] 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 [11,12] 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 document, 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 DC coupled to avoid any low frequency phase shift. However, DC 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 DC offsets.

D.3 Calibration aspects

The verification of the repeatability and reproducibility requirements of this document make careful calibration of the measurement equipment necessary. The two voltage channels including preamplifiers and ADC can be calibrated using a calibrated reference AC voltage source [13]. 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.

D.4 Numerical air flux compensation

The numerical air flux compensation can be done similar to the principle of mutual inductor (see, for instance, [8]).

$$U_{2c}(t) = U_{2m}(t) - \frac{C}{R_n} \cdot \frac{dU_1(t)}{dt} \quad (D.4)$$

$U_{2c}(t)$ is the compensated secondary induced voltage in volts;

$U_{2m}(t)$ is the uncompensated secondary induced voltage in volts;

C is the value of compensation factor in Ohm seconds;

U_1 is the voltage drop across the precision resistor R in volts;

R_n is the resistance of the non-inductive precision resistor R in series with the primary winding in ohms.

First, the voltage drop across the precision resistor R , $U_1(t)$, is differentiated in a way to avoid phase shifts and significant noise amplification injected from the current signal. A possible method can be a five-point or twelve-point differentiation.

Secondly, the compensation can be done as shown in Formula (D.4).

The adjustment of the value of compensation factor can be made so that, when passing an alternating current through the primary windings in the absence of the specimen in the apparatus, the compensated voltage shall be no more than 0,1 % of the non-compensated voltage appearing across the secondary winding of the test apparatus alone.

The numerical air flux compensation is advantageous to avoid increases in phase shift and impedance of windings caused by addition of mutual inductor.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-3:2022

Bibliography

- [1] SIEVERT, J., Determination of AC Magnetic Power Loss of Electrical Steel Sheet: Present Status and Trends, IEEE Trans. Mag. 20 (1984) p. 1702-1707.
- [2] IEC TR 62981:2017, *Studies and comparisons of magnetic measurements on grain-oriented electrical steelsheet determined by means of the single sheet test method and Epstein test method*
- [3] SIEVERT, J. and H. AHLERS, H., *Is the Epstein Frame replaceable?* SMM9 Conference, Anales de Fisica Serie B, 86 (1990), p. 58-63)
- [4] G. Bertotti, F. Fiorillo, Magnetic Properties of Metals · Magnetic Alloys for Technical Applications. Soft Magnetic Alloys, Invar and Elinvar Alloys, Landolt-Börnstein - Group III Condensed Matter, Volume 19I1 19945
- [5] 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.
- [6] SIEVERT, J. *The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel – Survey on Methods and Situation of Standards*. SMM 14 Conference, Balatonfüred, Hungary, September 1999, J. Magn. Magn. Mater., 215-216 (2000) p. 647-651.
- [7] IEC 60404-8-7:2020, *Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully-processed state*
- [8] FIORILLO, F., *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism. Academic Press (2004), ISBN: 0-12-257251-3.
- [9] Annex C: "Sinusoidal waveform control by digital means" from IEC 60404-6:2018, Ed.3.1, *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 100 kHz by the use of ring specimens*
- [10] STEARNS, S.D., *Digital signal analysis*. 5th Edition, Hayden Book (1991), ISBN:0-8104 - 5828-4.
- [11] AHLERS, H. and SIEVERT, J., Uncertainties of Magnetic Loss Measurements, particularly in Digital Procedures, PTB-Mitt. 94 (1984) p. 99-107.
- [12] 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.
- [13] AHLERS, H., Precision calibration procedure for magnetic loss testers using a digital two-channel function generator. SMM11 Venice 1993, J. Magn. Magn. Mater., 133 (1994) p.437-439.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-3:2022

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	36
1 Domaine d'application	38
2 Références normatives	38
3 Termes et définitions	38
4 Principes généraux des mesurages en courant alternatif	39
4.1 Généralités	39
4.2 Principe de la méthode d'essai sur tôle unique	39
4.3 Appareillage d'essai	39
4.3.1 Culasses	39
4.3.2 Enroulements	41
4.4 Compensation du flux d'air	42
4.5 Eprouvette	42
4.6 Source d'alimentation	43
5 Détermination des pertes totales spécifiques	43
5.1 Principe de mesure	43
5.2 Appareillage	43
5.2.1 Mesurage de la tension	43
5.2.2 Mesurage de la fréquence	44
5.2.3 Mesurage de la puissance	44
5.3 Mode opératoire pour le mesurage des pertes totales spécifiques	44
5.3.1 Préparation du mesurage	44
5.3.2 Réglage de la source d'alimentation	44
5.3.3 Mesurages	45
5.3.4 Reproductibilité du mesurage des pertes totales spécifiques	46
6 Détermination de l'intensité du champ magnétique, du courant primaire et de la puissance apparente spécifique	46
6.1 Généralités	46
6.2 Principe de mesure	46
6.2.1 Valeur de crête de la polarisation magnétique	46
6.2.2 Valeur efficace du courant primaire	46
6.2.3 Valeur de crête de l'intensité du champ magnétique	47
6.3 Appareillage	47
6.3.1 Voltmètre de valeur moyenne	47
6.3.2 Mesurage du courant en valeur efficace	48
6.3.3 Mesurage du courant de crête	48
6.3.4 Source d'alimentation	48
6.3.5 Résistance R	48
6.4 Mode opératoire pour le mesurage	48
6.4.1 Préparation du mesurage	48
6.4.2 Mesurage	48
6.4.3 Matériaux à grains non orientés	49
6.5 Détermination des caractéristiques	49
6.5.1 Détermination de $\hat{J}$	49
6.5.2 Détermination de $\tilde{H}$	49
6.5.3 Détermination de $\hat{H}$	50

6.5.4	Détermination de S_S	50
6.5.5	Reproductibilité du mesurage de la puissance apparente spécifique	51
7	Rapport d'essai	51
Annexe A (normative) Exigences relatives à la construction des culasses.....		52
Annexe B (informative) Contrôle et vérification de la fiabilité des performances du dispositif SST par l'utilisation d'échantillons de référence et impact des pertes dissipées dans les culasses.....		54
Annexe C (informative) Relation Epstein-SST pour les tôles en acier à grains orientés.....		57
Annexe D (informative) Méthodes d'échantillonnage numérique pour la détermination des caractéristiques magnétiques et compensation numérique du flux d'air		60
D.1	Généralités	60
D.2	Détails techniques et exigences.....	60
D.3	Aspects liés à l'étalonnage.....	62
D.4	Compensation numérique du flux d'air	63
Bibliographie.....		64
Figure 1 – Schémas de l'appareillage d'essai.....		40
Figure 2 – Dimensions de la culasse.....		41
Figure 3 – Schéma de branchement des cinq bobines de l'enroulement primaire		41
Figure 4 – Circuit pour la détermination des pertes totales spécifiques		42
Figure 5 – Circuit pour le mesurage de la valeur efficace du courant primaire.....		47
Figure 6 – Circuit pour le mesurage de la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique.....		47
Figure B.1 – Pertes totales spécifiques en fonction de l'induction de crête (d'après J.Sievert [3] et G. Bertotti [4]); droite: approximation $P_S \propto B^{1.85}$ (d'après C.Ragusa).....		55
Figure C.1 – Différence SST-Epstein relative δP pour un matériau conventionnel à grains orientés en fonction de la polarisation magnétique $\hat{J}$		59
Figure C.2 – Différence SST-Epstein relative δHS pour un matériau conventionnel à grains orientés en fonction de la polarisation magnétique $\hat{J}$		59
Tableau B.1 – Pertes dissipées par les culasses d'un SST normalisé, déterminées à partir des courbes de pertes mesurées sur 3 paires de culasses, comme cela est représenté à la Figure B.1, et grandeurs pertinentes, y compris la contribution relative des culasses, p_Y ; représentées par 5 qualités normalisées.....		56
Tableau C.1 – Différences SST-Epstein relatives δP et δHS et facteur de conversion F_C pour le matériau conventionnel à grains orientés dans la plage de polarisation 1,0 T à 1,8 T		58

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 (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC 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 l'IEC. L'IEC 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevet.

L'IEC 60404-3 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette troisième édition annule et remplace la première édition parue en 1992, l'Amendement 1:2002 et l'Amendement 2:2009. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) l'Annexe A a été révisée. La méthode de détermination de la résistance des bandes des culasses a été ajoutée à l'Annexe A;
- b) l'Annexe B de l'édition consolidée de 2010 faisait référence à l'étalonnage du SST à l'aide de la méthode Epstein. Elle a été annulée;

- c) l'Annexe B (nouvelle), l'Annexe C et l'Annexe D ont été révisées et sont seulement informatives;
- d) l'Annexe C a été modifiée compte tenu de la nouvelle situation concernant les qualités P et R;
- e) l'Annexe D a été amendée par ajout de l'Article D.4 relatif à la compensation numérique du flux d'air.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
68/699/CDV	68/710/RVC

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60404, publiées sous le titre général *Matériaux magnétiques*, se trouve sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 s'applique aux bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés et à grains non orientés pour le mesurage des caractéristiques magnétiques en courant alternatif aux fréquences industrielles.

Le présent document a pour objet de définir les principes généraux et les détails techniques pour le mesurage des caractéristiques magnétiques des bandes et tôles magnétiques en acier à l'aide de l'essai sur tôle unique (SST, *Single Sheet Tester*).

L'essai sur tôle unique s'applique aux éprouvettes prélevées à partir de bandes et de tôles magnétiques en acier de toute qualité. Les caractéristiques magnétiques en courant alternatif sont déterminées pour des tensions induites sinusoïdales, pour les valeurs de crête spécifiées de la polarisation magnétique, pour les valeurs de crête spécifiques de l'intensité du champ magnétique et pour une fréquence spécifiée.

Les mesurages sont effectués à la température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sur des éprouvettes qui ont été au préalable désaimantées.

NOTE Dans le présent document, la grandeur "polarisation magnétique" est utilisée conformément à la définition de l'IEC 60050-221. Dans certaines normes de la série IEC 60404, la grandeur "induction magnétique" a été utilisée.

Afin de soutenir la fiabilité à long terme des performances de cette configuration et de mieux comprendre la relation entre la méthode Epstein et la méthode SST, les annexes informatives B et C, ont été respectivement, ajoutées.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC 60050-121, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 121: Electromagnétisme*

IEC 60050-221, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 221: Matériaux et composants magnétiques*

IEC 60404-13, *Matériaux magnétiques – Partie 13: Méthodes de mesure de la résistivité, de la masse volumique et du facteur de foisonnement des bandes et tôles en acier électrique*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'IEC 60050-121 et de l'IEC 60050-221 s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

4 Principes généraux des mesurages en courant alternatif

4.1 Généralités

L'Article 4 spécifie les conditions générales relatives à la détermination des caractéristiques magnétiques en courant alternatif des bandes et tôles magnétiques en acier aux fréquences industrielles, à l'aide de l'essai sur tôle unique.

4.2 Principe de la méthode d'essai sur tôle unique

L'éprouvette, constituée d'un échantillon de tôle magnétique en acier, est placée au centre de deux enroulements concentriques:

- un enroulement primaire extérieur (enroulement de magnétisation);
- 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 importante par rapport à celle de l'éprouvette (voir Figure 1).

Les variations de température de l'éprouvette doivent être maintenues à un niveau inférieur à celui susceptible de produire une tension dans l'éprouvette par dilatation ou contraction thermique.

4.3 Appareillage d'essai

4.3.1 Culasses

Chaque culasse en forme de U est composée de tôles isolées en acier magnétique à grains orientés. Elle doit présenter une faible réluctance et de faibles pertes totales spécifiques dans la région à faible polarisation magnétique, au-dessous de 0,2 T (voir Annexe A). Elle doit être fabriquée selon les exigences de l'Annexe A.

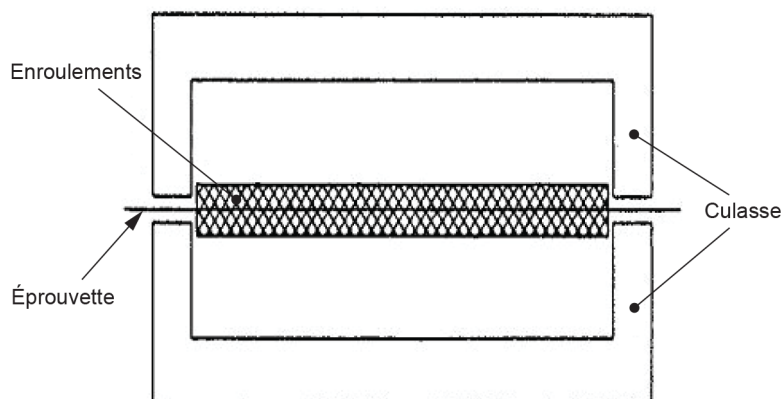
Afin de réduire l'effet des courants de Foucault et d'obtenir une répartition plus homogène du flux à l'intérieur de la culasse, celle-ci doit être constituée d'une paire de culasses en C coupées et bobinées, ou d'un assemblage collé de bandes, auquel cas les coins doivent être à joints croisés (voir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

Les faces polaires de la culasse doivent avoir une largeur de $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

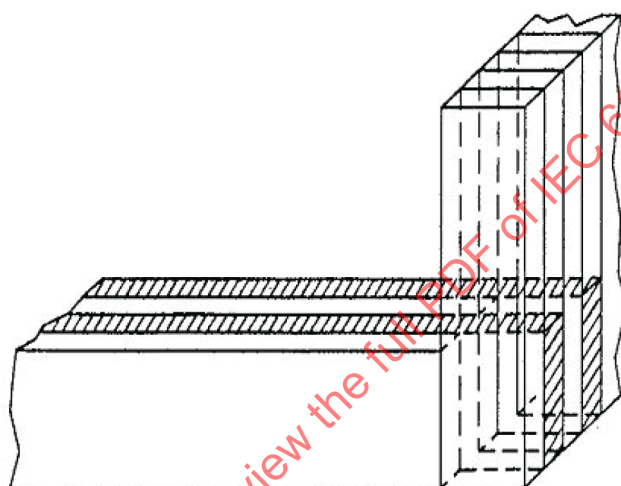
Les deux faces polaires de chaque culasse doivent être coplanaires à 0,5 mm près, et l'entrefer entre les faces polaires opposées des culasses ne doit dépasser 0,005 mm en aucun point. En outre, les culasses doivent être rigides afin d'éviter toute contrainte mécanique telle qu'une torsion, une tension ou une compression 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}_{-0} mm et une longueur interne de $450 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (voir Figure 2).

L'éprouvette doit être placée sur un support en matériau isolant et non magnétique, entre les branches verticales des culasses inférieures. Ce support doit être centré et placé dans le même plan que les faces polaires de la culasse inférieure, afin que l'éprouvette soit en contact direct avec les faces polaires sans entrefer. Des précautions doivent être prises afin que la surface supérieure du support ne soit positionnée en aucun cas plus haut que le plan des faces polaires de la culasse inférieure.



a) Section du SST



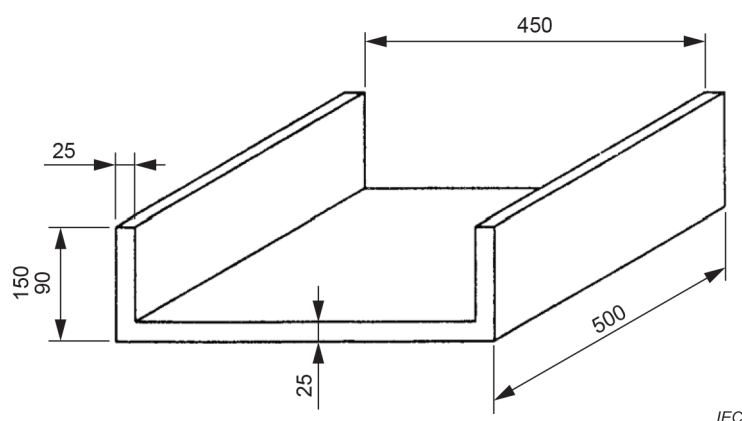
b) Vue schématique du coin d'une culasse à bandes assemblées

Figure 1 – Schémas de l'appareillage d'essai

La culasse supérieure doit être mobile pour permettre la mise en place de l'éprouvette. Après la mise en place de l'éprouvette, la culasse supérieure doit être abaissée pour fermer le circuit magnétique et, simultanément, les faces polaires des culasses inférieure et supérieure doivent parfaitement s'aligner. Afin de réduire le plus possible les effets de pression sur l'éprouvette, la culasse supérieure doit être équipée d'un système de suspension. 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 configuration carrée de la culasse a été retenue afin de permettre l'utilisation d'une seule éprouvette dans le cas des matériaux à grains non orientés. Par rotation de 90° de l'éprouvette, il est possible de déterminer les caractéristiques dans la direction de laminage et perpendiculairement à celle-ci.

Dimensions en millimètres

**Figure 2 – Dimensions de la culasse****4.3.2 Enroulements**

Le système de bobine qui se trouve à l'intérieur des culasses doit comporter deux enroulements:

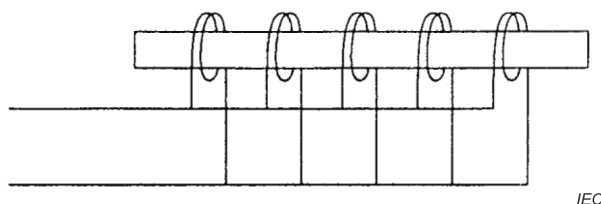
- un enroulement primaire, à l'extérieur (enroulement de magnétisation);
- un enroulement secondaire, à l'intérieur (enroulement de tension).

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

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

L'enroulement primaire peut être constitué:

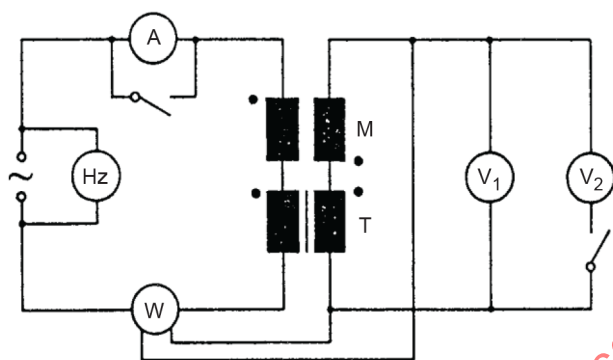
- soit de cinq bobines ou plus de mêmes dimensions et de même nombre de spires, réparties sur toute la longueur et reliées en parallèle (voir Figure 3). Par exemple, avec cinq bobines, chaque bobine peut comporter 400 spires de fil de cuivre de 1 mm de diamètre, bobinées en cinq couches;
- soit d'un 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 couche.

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

Le nombre de spires de l'enroulement secondaire dépend des caractéristiques des instruments de mesure. Dans tous les cas, la détermination du nombre de spires des enroulements primaire et secondaire doit être effectuée avec la plus grande fiabilité, car une erreur entraînerait une erreur permanente.

4.4 Compensation du flux d'air

L'effet de flux d'air doit être compensé. Cela peut être obtenu, par exemple, à l'aide d'une inductance mutuelle M (voir Figure 4). L'enroulement primaire de l'inductance mutuelle est connecté en série avec l'enroulement primaire de l'appareillage d'essai, tandis que l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est connecté en opposition avec l'enroulement secondaire de l'appareillage d'essai.



Légende

V_1 est le voltmètre qui mesure la tension moyenne redressée

V_2 est le voltmètre qui mesure la tension en valeur efficace

A est l'ampèremètre qui mesure la valeur efficace du courant primaire

Hz mesure la fréquence

W mesure la puissance

M est l'inductance mutuelle

T est le cadre d'essai

Figure 4 – Circuit pour la détermination des pertes totales spécifiques

La valeur de l'inductance mutuelle doit être réglée de façon telle qu'en l'absence d'éprouvette dans l'appareillage d'essai, lorsqu'un courant alternatif circule dans les enroulements primaires, la tension mesurée entre les bornes non reliées entre elles des enroulements secondaires ne doit pas être supérieure à 0,1 % de la tension observée dans l'enroulement secondaire de l'appareillage d'essai seul. Ainsi, la valeur moyenne de la tension redressée induite dans les enroulements secondaires combinés est proportionnelle à la valeur de crête de la polarisation magnétique dans l'éprouvette.

NOTE 1 En variante, la compensation du flux d'air peut être obtenue par la méthode numérique (pour plus d'informations, voir Annexe D, Article D.4).

NOTE 2 Dans la suite du présent document, le terme "tension secondaire compensée" signifie "tension induite dans l'enroulement secondaire compensé pour l'effet de flux d'air".

4.5 Eprouvette

La longueur de l'éprouvette doit être d'au moins 500 mm. Même si la partie de l'éprouvette située en dehors des faces polaires n'a pas grande influence sur la mesure, cette partie ne doit pas être plus longue que nécessaire pour faciliter la mise en place et le retrait de l'éprouvette.

La largeur de l'éprouvette doit être aussi importante que possible et au maximum égale à la largeur des culasses.

Pour obtenir l'exactitude maximale, la largeur minimale ne doit pas être inférieure à 60 % de la largeur des culasses.

NOTE 1 Des restrictions spécifiques relatives aux dimensions des éprouvettes peuvent être définies pour des qualités de matériaux particulières dans les normes de produits respectives des matériaux magnétiques.

NOTE 2 Informations concernant l'application du SST aux échantillons de bande de 50 mm à 250 mm de largeur: l'acier magnétique à grains orientés utilisé pour les noyaux des transformateurs de distribution est commercialisé sous forme de bobines refendues de 50 mm à 250 mm de largeur, découpées dans des bandes en acier brutes (bobines mères), en différentes positions sur les bandes d'origine. Les bobines refendues reflètent la variation considérable des caractéristiques du matériau en fonction de la position sur la bande d'origine dans laquelle elles ont été découpées. Ces petites éprouvettes peuvent être mesurées à l'aide de ce SST en les plaçant côte à côte ou à espaces réguliers dans le dispositif d'essai. Afin d'obtenir une mesure pertinente, il est nécessaire de remplir de bandes au moins 60 % de l'espace d'échantillonnage de 500 mm de largeur. Les échantillons de bandes d'essai peuvent être prélevés successivement au début ou à la fin d'une bobine refendue. Lors de leur préparation, prendre des précautions pour éviter tout dommage susceptible d'influencer le résultat de l'essai. En raison de la découpe de la tôle en bandes de faibles dimensions, les pertes mesurées des bandes étroites sont légèrement supérieures par rapport à celles de la tôle d'origine de 500 mm.

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 bobine mère est prise comme direction de référence. L'angle entre la direction de laminage et celle de découpage ne doit pas dépasser:

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

Pour les tôles en acier à grains non orientés, deux éprouvettes doivent être découpées, l'une parallèlement à la direction de laminage, l'autre perpendiculairement, sauf si l'éprouvette est carrée, auquel cas seule une éprouvette est nécessaire.

4.6 Source d'alimentation

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

En outre, la forme d'onde de la tension secondaire compensée doit être maintenue aussi sinusoïdale que possible. Le facteur de forme de la tension secondaire compensée doit être maintenu à $1,111 \pm 1$ %. Cela peut être réalisé de différentes manières, par exemple à l'aide d'une amplification électronique asservie ou d'un système numérique de rétroaction par calcul.

5 Détermination des pertes totales spécifiques

5.1 Principe de mesure

L'appareillage d'essai avec l'éprouvette mise en place constitue un transformateur à vide dont les pertes totales sont mesurées selon le circuit représenté à la Figure 4.

5.2 Appareillage

5.2.1 Mesurage de la tension

5.2.1.1 Voltmètre de valeur moyenne

La valeur moyenne redressée de la tension secondaire compensée doit être mesurée à l'aide d'un voltmètre de valeur moyenne. L'instrument privilégié est un voltmètre numérique avec une incertitude de ±0,2 % ou mieux.

NOTE 1 Des instruments de ce type sont généralement gradués en valeur moyenne 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.

NOTE 2 Pour l'application de méthodes d'échantillonnage numérique, voir Annexe D.

5.2.1.2 Voltmètre de valeur efficace

Un voltmètre de valeur efficace doit être utilisé. L'instrument privilégié est un voltmètre numérique avec une incertitude de $\pm 0,2$ % ou mieux.

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

5.2.2 Mesurage de la fréquence

Un fréquencemètre avec une incertitude de $\pm 0,1$ % ou mieux doit être utilisé.

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

5.2.3 Mesurage de la puissance

La puissance doit être mesurée à l'aide d'un wattmètre avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou mieux pour la valeur réelle du facteur de puissance et du facteur de crête.

La résistance ohmique du circuit de tension du wattmètre doit être d'au moins 100 Ω/V pour toutes les plages. Si nécessaire, les pertes dans le circuit secondaire doivent être retranchées des pertes indiquées; voir Formule (3) en 5.3.3.1.

La résistance ohmique 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 dispositif de mesure du courant est inclus dans le circuit, il doit être court-circuité lors de l'ajustement de la tension secondaire ainsi que lors du mesurage des pertes.

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

5.3 Mode opératoire pour le mesurage des pertes totales spécifiques

5.3.1 Préparation du mesurage

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

Avant le mesurage, l'éprouvette doit être désaimantée par une lente diminution d'un champ magnétique alternatif à partir d'une valeur nettement supérieure au coude de la courbe de magnétisation du matériau de l'éprouvette.

5.3.2 Réglage de la source d'alimentation

La puissance d'alimentation doit être progressivement augmentée, jusqu'à ce que la valeur moyenne redressée de la tension secondaire compensée, $\overline{U_2}$, atteigne la valeur exigée. Cette valeur est calculée à partir de la valeur souhaitée de la polarisation magnétique au moyen de la formule:

$$\overline{U_2} = 4fN_2 \frac{R_i}{R_i + R_l} A\hat{J} \quad (1)$$

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 combinée des instruments dans le circuit secondaire, en ohms;
 R_l est la résistance-série des enroulements secondaires de l'appareillage 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 mètres carrés;
 $\hat{f}$ est la valeur de crête de la polarisation magnétique, en teslas.

La section A de l'éprouvette est donnée par la formule:

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

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 conventionnelle du matériau à l'essai, ou la valeur déterminée selon l'IEC 60404-13, en kilogrammes par mètre cube.

5.3.3 Mesurages

5.3.3.1 Le courant primaire doit être vérifié afin de s'assurer que le circuit courant du wattmètre n'est pas surchargé. Si un dispositif de mesure du courant est inclus dans le circuit, il doit être court-circuité lors de l'ajustement de la tension secondaire ainsi que lors du mesurage des pertes.

Après avoir vérifié que la forme d'onde de la tension secondaire compensée se situe dans les limites de tolérance exigées, la valeur du wattmètre doit être lue. La valeur des pertes totales spécifiques doit alors être calculée d'après la formule:

$$P_s = \left[P \frac{N_1}{N_2} - \frac{(\tilde{U}_2)^2}{R_i} \right] \frac{l}{m l_m} \quad (3)$$

où

- $\tilde{U}_2$ est la valeur efficace de la tension secondaire compensée, en volts;
 P_s représente 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 kilogrammes;
 l_m est la longueur conventionnelle 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 combinée des instruments dans le circuit secondaire, en ohms.

NOTE Des études ont montré que la longueur interne entre les faces internes verticales des branches des culasses est une valeur moyenne appropriée de la longueur effective du circuit magnétique l_m pour différents matériaux à l'essai et différentes valeurs de polarisation [1]¹.

5.3.3.2 Dans le cas d'un acier magnétique à grains non orientés, pour des valeurs de pertes totales spécifiques indiquées dans les normes de produits des matériaux magnétiques, la valeur consignée des pertes totales spécifiques doit être calculée comme la moyenne des deux mesures obtenues dans les directions parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage. Pour d'autres applications, les valeurs des pertes totales spécifiques dans les directions parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage doivent être consignées séparément.

5.3.4 Reproductibilité du mesurage des pertes totales spécifiques

La reproductibilité de cette méthode à l'aide de l'appareillage d'essai décrit ci-dessus est caractérisée par un écart-type relatif de 1 % (pour plus d'informations sur la source de ce chiffre, voir [2]) pour les tôles magnétiques en acier à grains orientés et de 2 % pour les tôles magnétiques en acier à grains non orientés.

6 Détermination de l'intensité du champ magnétique, du courant primaire et de la puissance apparente spécifique

6.1 Généralités

Le présent Article 6 décrit les méthodes de mesure qui permettent de déterminer les caractéristiques suivantes:

- valeur de crête de la polarisation magnétique $\hat{J}_i$;
- valeur efficace du courant primaire $\hat{I}_1$;
- valeur de crête de l'intensité du champ magnétique $\hat{H}$;
- puissance apparente spécifique S_g .

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

6.2 Principe de mesure

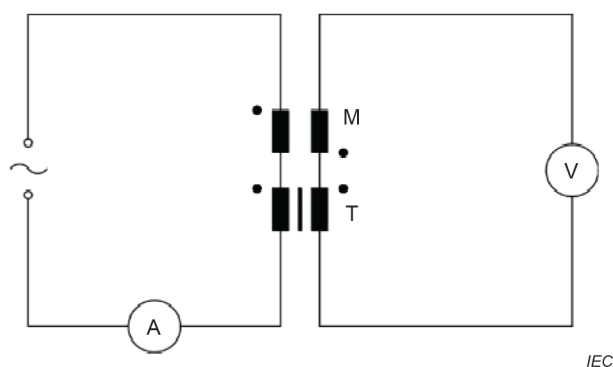
6.2.1 Valeur de crête de la polarisation magnétique

La valeur de crête de la polarisation magnétique doit être déterminée à partir de la valeur moyenne redressée de la tension secondaire compensée mesurée comme cela est décrit en 5.2.1.1.

6.2.2 Valeur efficace du courant primaire

La valeur efficace du courant primaire doit être mesurée à l'aide d'un ampèremètre de valeur efficace placé dans le circuit de la Figure 5.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

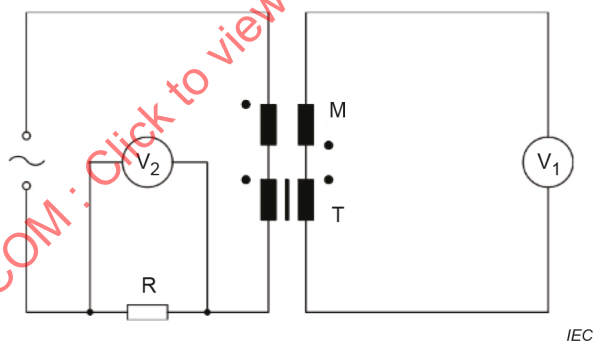
**Légende**

- V est le voltmètre qui mesure la tension moyenne redressée;
 A est l'ampèremètre qui mesure la valeur efficace du courant primaire;
 M est l'inductance mutuelle;
 T est le cadre d'essai.

Figure 5 – Circuit pour le mesurage de la valeur efficace du courant primaire

6.2.3 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 chute de tension aux bornes d'une résistance de précision R de valeur connue, comme cela est décrit en 6.3.5, à l'aide d'un voltmètre électronique de haute sensibilité qui indique la valeur de crête, représenté par V_2 à la Figure 6.

**Légende**

- V_1 est le voltmètre qui mesure la valeur moyenne redressée de la tension secondaire compensée
 V_2 est le voltmètre qui mesure la valeur de crête (ou la valeur efficace, voir 6.3.2) de la chute de tension aux bornes de la résistance de précision non inductive
 R est la résistance de précision non inductive
 M est l'inductance mutuelle
 T est le cadre d'essai

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

6.3 Appareillage

6.3.1 Voltmètre de valeur moyenne

Le voltmètre de valeur moyenne doit être conforme au 5.2.1.1.

6.3.2 Mesurage du courant en valeur efficace

La valeur efficace du courant primaire doit être mesurée au moyen d'un ampèremètre de valeur efficace de faible impédance de classe 0,5 ou mieux (voir Figure 5), ou en utilisant une résistance de précision et un voltmètre de valeur efficace, décrit en 5.2.1.2 (voir Figure 6; dans ce cas, le voltmètre de crête doit être remplacé par un voltmètre de valeur efficace).

6.3.3 Mesurage du courant de crête

La tension de crête aux bornes de la résistance R (voir Figure 6) doit être mesurée soit au moyen d'un voltmètre électronique de haute sensibilité qui indique la valeur de crête, soit à l'aide d'un oscilloscope étalonné.

Un voltmètre de crête avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou mieux doit être utilisé.

6.3.4 Source d'alimentation

La source d'alimentation doit être conforme au 4.6.

6.3.5 Résistance R

La méthode représentée à la Figure 6 exige une résistance de précision non inductive R de valeur connue à $\pm 0,1$ % près.

La valeur de la résistance R ne doit pas dépasser 1Ω afin de réduire le plus possible la distorsion de tension de magnétisation, et donc de faciliter la forme d'onde sinusoïdale de la tension induite secondaire.

6.4 Mode opératoire pour le mesurage

6.4.1 Préparation du mesurage

La longueur de l'éprouvette doit être mesurée avec une incertitude de $\pm 0,1$ % ou mieux, et sa masse doit être déterminée avec une incertitude de $\pm 0,1$ % ou mieux. L'éprouvette doit être chargée et centrée sur les axes longitudinal et transversal de la bobine d'enroulement. La culasse supérieure, partiellement contrebalancée, doit ensuite être abaissée.

Avant le mesurage, l'éprouvette doit être désaimantée par une lente diminution d'un champ magnétique alternatif à partir d'une valeur nettement supérieure au coude de la courbe de magnétisation du matériau de l'éprouvette.

6.4.2 Mesurage

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

Si la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique est spécifiée et si la valeur de crête de la polarisation magnétique doit être déterminée, le courant primaire doit être réglé sur la valeur qui correspond à l'intensité appropriée du champ magnétique (voir ci-dessous). La tension secondaire compensée de l'appareillage d'essai doit alors être lue sur le voltmètre de valeur moyenne (voir 5.2.1.1).

De même, si la valeur de crête de la polarisation magnétique est spécifiée et si la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique doit être déterminée, la tension secondaire doit être réglée sur sa valeur spécifiée conformément au 5.3.2.

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

Pour la détermination de $\tilde{H}$, la valeur de crête de la chute de tension aux bornes de la résistance R doit être lue sur un voltmètre de crête ou sur l'oscilloscope étalonné.

6.4.3 Matériaux à grains non orientés

Dans le cas d'un matériau à grains non orientés, pour la valeur de crête de la polarisation magnétique $\hat{J}$ à la valeur de crête de l'intensité du champ magnétique $\tilde{H}$ spécifiée dans les normes de produits des matériaux magnétiques, la valeur consignée de $\hat{J}$ doit être calculée comme la moyenne des deux mesures obtenues dans les directions parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage. Pour les valeurs de $\hat{J}$ à d'autres fins et pour le mesurage de la puissance apparente spécifique et de la valeur efficace du courant primaire, les valeurs obtenues dans les directions parallèle et perpendiculaire à la direction de laminage doivent être consignées séparément.

6.5 Détermination des caractéristiques

6.5.1 Détermination de $\hat{J}$

6.5.1.1 Valeur de crête de la polarisation magnétique $\hat{J}$

La valeur de crête de la polarisation magnétique est donnée par la formule:

$$\hat{J} = \frac{1}{4fN_2A} \frac{R_i + R_t}{R_i} \overline{|U_2|} \quad (4)$$

où

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

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 mètres carrés;

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

R_t est la résistance-série des enroulements secondaires de l'appareillage d'essai et de l'inductance mutuelle, en ohms;

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

6.5.1.2 Reproductibilité de $\hat{J}$

La reproductibilité de cette méthode en utilisant l'appareillage d'essai défini ci-dessus est caractérisée par un écart-type relatif de 0,25 %.

6.5.2 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 de valeur efficace dans le circuit de la Figure 5 ou par le voltmètre de valeur efficace dans le circuit de la Figure 6, comme cela est décrit en 6.3.2:

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

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.

NOTE Après détermination de plusieurs groupes de valeurs correspondantes de $\hat{J}$ et $\hat{H}$, la courbe de magnétisation de $\hat{J}$ en fonction de $\hat{H}$ peut être tracée.

6.5.3 Détermination de $\hat{H}$

La valeur de crête de l'intensité du champ magnétique doit être calculée à partir de la valeur de crête du courant primaire $\hat{U}_m / R_n$ indiquée par le voltmètre de crête dans le circuit de la Figure 6, comme cela est décrit en 6.3.3:

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

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 non inductive R de la Figure 6, en ohms;

$\hat{U}_m$ est la chute de tension de crête aux bornes de la résistance R, en volts.

NOTE 1 La perméabilité d'amplitude est exprimée de la manière suivante:

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

NOTE 2 Après détermination de plusieurs groupes de valeurs correspondantes de $\hat{J}$ et $\hat{H}$, la courbe de magnétisation de $\hat{J}$ en fonction de $\hat{H}$ peut être tracée.

6.5.4 Détermination de S_s

La puissance apparente est donnée par:

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

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 $\tilde{U}_2 = 1,111 \cdot \sqrt{U_2}$ n'est valable que pour les tensions sinusoïdales.

La division de cette grandeur par la masse effective $m_a = \frac{l_m}{l} m$ de l'éprouvette donne la puissance apparente spécifique:

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

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;

m_a est la masse effective 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.

6.5.5 Reproductibilité du mesurage de la puissance apparente spécifique

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

7 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes, le cas échéant:

- le type et l'identité de l'éprouvette;
- la masse volumique du matériau (conventionnelle ou déterminée selon l'IEC 60404-13);
- la longueur et la largeur de l'éprouvette;
- la température ambiante lors du mesurage;
- la fréquence de mesurage;
- les valeurs de crête de la polarisation magnétique ou de l'intensité du champ magnétique;
- les mesures obtenues.

Annexe A (normative)

Exigences relatives à la construction des culasses

Il est important de s'assurer que la puissance dissipée par les culasses est stable et faible par rapport à la puissance totale dissipée par l'éprouvette. Une puissance dissipée de 1 mW/kg à une induction magnétique de 40 mT ou de 0,1 mW/kg à 10 mT sont des valeurs types, mesurées à une fréquence de 50 Hz (voir Figure B.1 et Tableau B.1). Les pertes peuvent devenir conséquentes en cas de courts-circuits entre les bandes des culasses et de répartition inégale du flux magnétique à l'intérieur des culasses. Pour le mesurage de la puissance dissipée par les culasses, un enroulement primaire et un enroulement secondaire bobinés sur les culasses ou sur des supports appropriés doivent être utilisés. Quatre ensembles d'enroulements primaire extérieur et secondaire intérieur doivent être disposés de manière symétrique sur les quatre branches verticales des culasses et connectés en série. Le nombre de spires dépend de la configuration des instruments de mesure. Habituellement, le nombre de 25 spires pour chaque sous-enroulement s'avère adéquat. Les enroulements doivent être déconnectés lorsqu'ils ne sont pas utilisés pour le mesurage des pertes des culasses.

Pendant la fabrication des culasses à bandes assemblées, un recuit de relaxation des bandes découpées est exigé. Après assemblage des bandes qui constituent 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 vérifiée à l'aide d'un liquide révélateur de planéité. Des rodages successifs à l'aide de carborundum ou de pâte diamant sont 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 selon un mouvement de va-et-vient de faible amplitude.

Avec des culasses en C coupées et bobinées, les mesures correspondantes doivent être prises pour obtenir des caractéristiques de performances équivalentes.

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 neutraliser et d'éliminer soigneusement l'acide restant sur les faces polaires et entre les bandes.

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 obtenue par ce traitement.

Une vérification approfondie de l'isolant interbande des culasses à bandes assemblées doit être effectuée après l'attaque et le nettoyage des faces polaires. La résistance électrique des bandes des culasses supérieure et inférieure doit être mesurée séparément. La résistance des 10 sections, chacune de 5 cm de longueur, le long des faces polaires des culasses doit être mesurée à l'aide d'une bande de contact (voir, par exemple, Figure 3 de [2]) et d'un ohmmètre avec une incertitude de 1 % ou mieux. Pour contrôler que la résistance de transition à chaque contact est négligeable, le mesurage des résistances doit être étendu à tous les groupes de deux sections voisines de 5 cm, c'est-à-dire à toutes les paires de sections de 10 cm de longueur. La valeur de la résistance des paires de sections de 10 cm doit représenter 5 % de la somme des deux valeurs de résistance mesurées séparément sur les deux sections respectives de 5 cm. Pour un contact approprié, il est recommandé d'appliquer une fine bande de matériau isolant, légèrement compressible, sous la bande de contact (et réciproquement sur la bande de contact lors du mesurage de la culasse inférieure). Les mesurages peuvent être réalisés au niveau de l'entrefer de la face avant, tandis que l'entrefer de la face arrière doit être équipé d'une bande de matériau isolant. Lors des mesurages, la culasse supérieure doit être posée sur la culasse inférieure.