

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester

Matériaux magnétiques –

Partie 16: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer à l'aide de l'essai sur tôle unique

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 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 Central Office
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 corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

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 also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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.

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.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

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 aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester

Matériaux magnétiques –

Partie 16: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer à l'aide de l'essai sur tôle unique

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20; 29.030

ISBN 978-2-8322-5426-4

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
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 General principles	8
4.1 Principle of the method	8
4.2 Test specimen	9
4.3 Test apparatus.....	9
4.3.1 General	9
4.3.2 Yoke	10
4.3.3 Windings	10
4.3.4 Air flux compensation	11
4.3.5 Magnetic shielding.....	11
4.4 Power supply	11
4.5 Measuring instruments.....	12
4.6 Digital sampling technique	12
5 Measurement procedure	13
5.1 Principle of measurement.....	13
5.2 Preparation of measurement.....	13
5.3 Adjustment of power supply	14
6 Determination of characteristics.....	14
6.1 Determination of the magnetic polarization	14
6.2 Determination of the magnetic field strength	15
6.3 Determination of the specific total loss.....	15
6.4 Determination of the specific apparent power.....	16
7 Reproducibility.....	16
Annex A (informative) Requirements of the single sheet tester for Fe-based amorphous strip	17
A.1 Shape of test specimen.....	17
A.2 H coil method.....	17
A.3 Yoke	17
A.4 Wirings	17
A.5 Non-inductive precision resistor	18
A.6 Magnetic shielding	18
A.7 Method for checking the stability of the installed H coil from time to time	18
Annex B (informative) Digital sampling technique for the determination of the magnetic properties and numerical air flux compensation	19
B.1 General.....	19
B.2 Technical details and requirements.....	19
B.3 Calibration aspects	22
B.4 Numerical air flux compensation	22
Annex C (informative) Sinusoidal waveform control of the magnetic polarization by digital means	24
Bibliography.....	26

Figure 1 – Schematic diagram of the test apparatus.....	8
Figure 2 – Circuit of the wattmeter method with H coil mode	9
Figure 3 – Yoke dimensions.....	10
Figure 4 – Circuit of the wattmeter method with H coil mode adopting the digital sampling technique	12

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

**Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of
Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60404-16 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

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

CDV	Report on voting
68/570/CDV	68/583A/RVC

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

This document has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

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 "<http://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.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

INTRODUCTION

A method of measuring the magnetic properties of Fe-based amorphous strip is required to grade what is regarded as a promising material to reduce energy loss in transformer cores and, consequently, to reduce global warming.

Fe-based amorphous strip is produced by a rapidly-solidifying, direct-casting process. The strip is intended primarily for the construction of wound cores of distribution transformers for commercial power frequency (50 Hz and 60 Hz) applications.

After appropriate heat treatment, the strip exhibits a significantly lower value of specific total loss compared to grain-oriented electrical steel strip. It is associated with low hysteresis loss due to low magnetic anisotropy and low eddy current loss due to high resistivity and reduced thickness. However, significant deterioration can occur by applying stress on the strip due to the large magnetostriction and low magnetic anisotropy characteristics of the material.

Therefore, a method of measurement of the magnetic properties of Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester (SST) is required, independent of IEC 60404-3 [1]¹, which is specified for electrical steel sheets.

The almost exclusively applied wattmeter method is used also in this standard. However, the widely used version with the determination of the magnetic field strength from the magnetizing current ("MC method") is not applicable to this kind of material, because the influence of the yokes on the loss measurement is significantly greater for the thinner and magnetically softer test specimen of this material. Thus, the wattmeter method with H coil mode ("H coil method") has been included for the magnetic field determination. International round robin tests of SST and Fe-based amorphous test specimens have been carried out, resulting in a suitable configuration of the SST for amorphous material. The single-yoke concept was adopted in order to avoid the effect of the impact of the upper yoke caused by the high magneto-elastic sensitivity of the material.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester

1 Scope

This part of IEC 60404 is applicable to Fe-based amorphous strips specified in IEC 60404-8-11 for the measurement of AC magnetic properties at frequencies up to 400 Hz.

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

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

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

NOTE 1 The single sheet tester specified in this document is appropriate for other materials which have magnetic properties and physical characteristics similar to those of Fe-based amorphous strip, such as nano-crystalline soft magnetic strip. The single sheet tester for electrical steel sheets is specified in IEC 60404-3.

NOTE 2 Throughout this document the term “magnetic polarization” is used as described in IEC 60050-121. In some standards of the IEC 60404 series, the term “magnetic flux density” is used.

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 – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 60404-8-11, *Magnetic materials – Part 8-11: Specifications for individual materials – Fe-based amorphous strip delivered in the semi-processed state*

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

4 General principles

4.1 Principle of the method

This document applies the wattmeter method with H coil mode for the determination of the magnetic field strength (“H coil method”). The flux closure is made by a single “U”-shaped yoke.

The test specimen comprises a Fe-based amorphous strip, which is placed inside the following two windings:

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

A H coil that detects the magnetic field strength at the surface of the test specimen is placed under the test specimen.

The flux closure is made by a single vertical “U” shaped yoke, the cross-section of which is very large compared with that of the test specimen (see Figure 1).

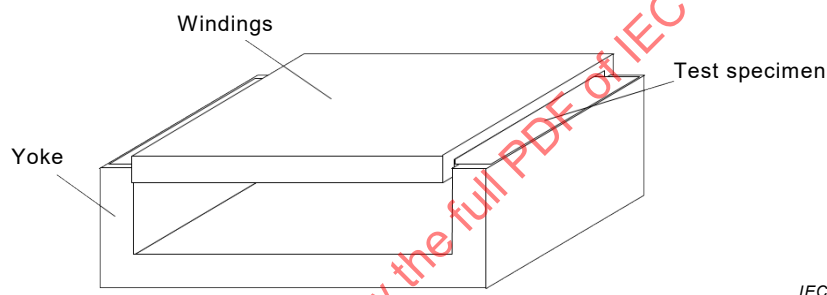


Figure 1 – Schematic diagram of the test apparatus

NOTE 1 Double yokes are unsuitable because the influence of the loading of an upper yoke on the test specimen is significant due to the large magnetostriction of the material. However, the upper yoke can be placed on the lower yoke in the absence of the test specimen to demagnetize yokes and to measure the power loss in the yokes.

The circuit diagram of Figure 2 illustrates the principle of the wattmeter method with H coil mode. The single sheet tester and the measuring instruments shall be connected as shown in Figure 2.

NOTE 2 Figure 2 also sets out the fundamentals of the widely used digital sampling technique, where the instrument functions are realised partly, or fully, through evaluating software. For the application of the digital sampling technique, see 4.6 and Annex B. Figure 2 does not show the feed-back circuit for the waveform control of the induced secondary voltage (see 4.4 and Annex C).

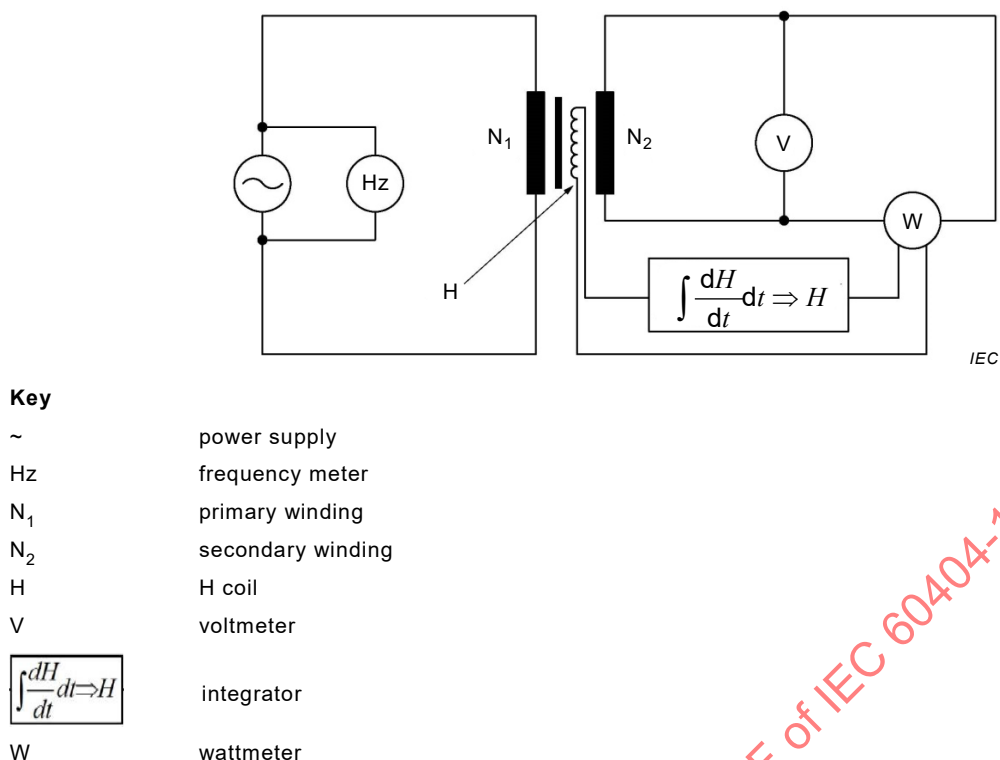


Figure 2 – Circuit of the wattmeter method with H coil mode

NOTE 3 The voltage induced in the H coil, $U_H(t)$, can be used for the air flux compensation in different ways (see 4.3.4 and Clause B.4) and for the digital sinusoidal waveform control of the induced secondary voltage, $U_2(t)$ (see 5.3 and Annex C).

4.2 Test specimen

The test specimen shall be sampled in accordance with IEC 60404-8-11.

NOTE Nominal widths of Fe-based amorphous strip are 142,2 mm, 170,2 mm and 213,4 mm (see IEC 60404-8-11).

The length of the test specimen shall be no less than 280 mm, which is the outside dimension of the distance across the pole faces of the yoke. Although the part of the specimen situated outside the pole faces has no great influence on the measurement, this part shall not be longer than is necessary to facilitate insertion and removal of the test specimen.

The test specimen shall be cut to length from Fe-based amorphous strip without the formation of excessive burrs or mechanical distortion. The test specimen shall be plane and rectangular.

The test specimen shall be prepared by a magnetic anneal in a DC magnetic field directed parallel to the casting direction according to the instructions of the manufacturer. The test specimen shall be flat during the treatment.

Care shall be taken in handling the test specimen after the treatment in order to avoid raising fragments of the strip or creating mechanical stresses in the test specimen because the material is usually brittle after heat treatment.

4.3 Test apparatus

4.3.1 General

The test apparatus comprises the windings and the yoke (see Figure 1).

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

4.3.2 Yoke

The yoke is in the form of a letter U built by using soft ferrite (see Figure 3). It should have a low magnetic remanence, a low reluctance and a specific total loss as low as possible.

NOTE 1 Lower quality of yoke materials can lead to poor measurement quality and to misleading results of the magnetic properties of the test specimen accordingly (see Annex A).

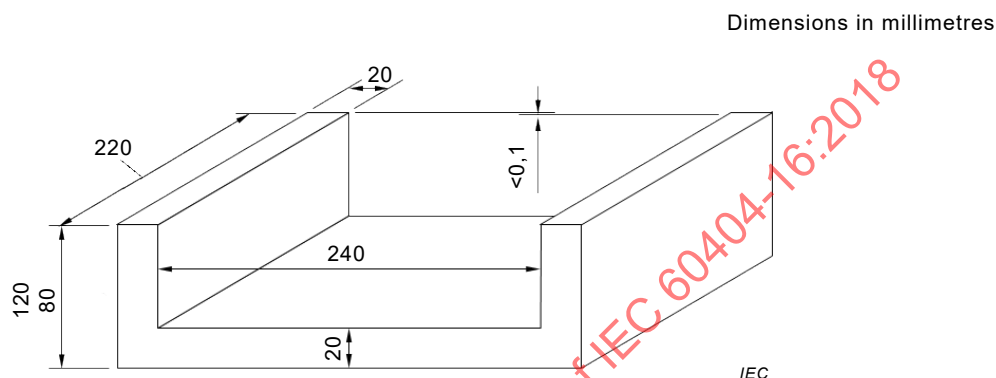


Figure 3 – Yoke dimensions

The yoke shall have pole faces having a width of $20 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

The two pole faces of the yoke shall be as flat as possible and coplanar to within 0,1 mm. Also, the yoke shall be rigid in order to avoid creating mechanical stresses in the test specimen.

The height of the yoke shall be between 80 mm and 120 mm. The yoke shall have a width of $220 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ and an inside length of $240 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (see Figure 3).

Other yoke dimensions may be used provided that comparability of the results can be demonstrated.

NOTE 2 The power loss dissipated in the yoke can be measured by making a magnetic closure circuit consisting of the yoke and a matching upper yoke that are wound with primary and secondary windings; 25 turns are sufficient for each winding.

There shall be a specimen support, which is made of non-conductive and non-magnetic materials, between the vertical limbs of the yokes. The surface of the support, on which the test specimen is supported, shall be in the same plane with the pole faces so that the test specimen can contact the pole faces with minimum air gaps.

NOTE 3 If there are steps between the surface of the test support plane and the pole faces, deteriorated magnetic properties are measured.

4.3.3 Windings

The primary winding shall be at least 230 mm in length. The secondary winding shall be $120 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ in length and centred in the primary winding. The primary and secondary windings shall be wound on a non-conducting, non-magnetic and rectangular former. The dimensions of the former shall be as follows:

- length for winding: $235 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$;
- internal height: $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$;
- external height: $\leq 15 \text{ mm}$; the value of 12 mm is recommended.

The primary winding can be made up of a single continuous and uniform winding taking up the whole length. One example of the winding is made up of 220 turns of copper wire 1 mm in diameter taking up the whole length, wound in one or more layers.

The secondary winding shall be made up of a single continuous and uniform winding taking up the length of $120 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, wound in one layer. The number of turns on the secondary winding depends on the characteristics of the measuring instruments.

The H coil shall have the same length as the secondary winding and be centred in the primary winding. The H coil shall be wound on a non-conducting, non-magnetic and rectangular plate. The width of the plate shall be $120 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ and the height of the plate shall be $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$.

The H coil shall be embedded in the specimen support plate and the distance between the upper surface of the support plate and the upper surface of the H coil shall be $1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$.

The area-turns of the H coil shall be calibrated in a uniform field using a solenoid coil of a diameter and length large enough to obtain a uniform field over the volume of the H coil.

4.3.4 Air flux compensation

Compensation of the effect of air flux on the induced secondary voltage shall be made.

This can be achieved, for example, by the numerical air flux compensation method (see Clause B.4).

4.3.5 Magnetic shielding

A simple magnetic shielding of the single sheet tester is recommended to weaken sufficiently the effects of geomagnetic and other external magnetic fields in order to avoid unexpected magnetization of the test apparatus (see Annex A).

4.4 Power supply

The power supply should consist of a computer-controlled arbitrary signal generator and a power amplifier, or an instrument integrating both of these functions (see Figure 4).

The arbitrary signal generator shall synthesize a signal of magnetizing waveform, amplitude and frequency data which are programmed externally. A low pass filter should be inserted between the arbitrary signal generator and the power amplifier to prevent aliasing at the measuring instruments.

The frequency shall be measured with an accuracy of $\pm 0,1 \%$ or better.

The waveform of the induced secondary voltage shall be maintained as sinusoidal as possible. It is preferable not only to maintain the form factor of the induced secondary voltage to within 1,111 with a relative tolerance of $\pm 1 \%$, but also to suppress harmonic contents in the induced secondary voltage to as low as possible. This can be achieved by various means, using analogue feedback control or by digital means described in Annex C.

The power amplifier shall be of low internal impedance and shall be highly stable in terms of voltage and frequency, being with sufficiently low voltage noise. During the measurement, the voltage and frequency shall be maintained constant within $\pm 0,2 \%$.

The power amplifier should be a bipolar type with low noise and wide ranges of frequency and voltage.

4.5 Measuring instruments

The measuring instruments shall meet the following specifications: The power shall be measured with an accuracy of $\pm 0,5\%$ or better at the actual power factor and crest factor. The voltages shall be measured with an accuracy of $\pm 0,5\%$ or better.

4.6 Digital sampling technique

The fundamental circuit of the digital sampling technique, almost exclusively used for this kind of measurement, is shown in Figure 4, in this case employing the H coil combined with the integrator for the determination of the magnetic field strength (for technical details see also Annex B). The measuring instrument is usually composed of preamplifiers, a digitizer and a digital signal calculator, and provides the functions of the wattmeter and voltmeter shown in Figure 2 in the software.

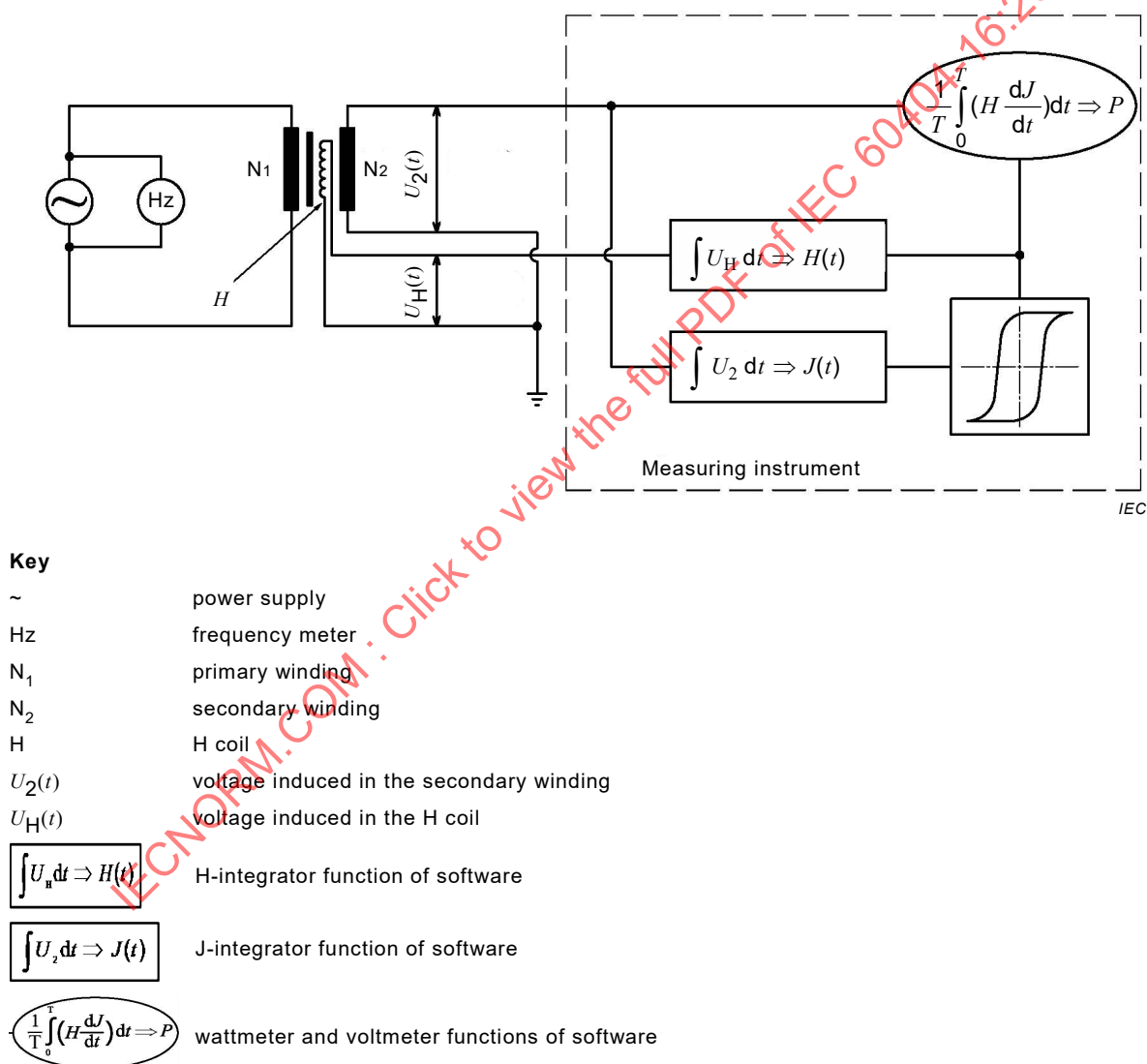


Figure 4 – Circuit of the wattmeter method with H coil mode adopting the digital sampling technique

NOTE 1 The numerical air flux compensation, $J = B - \mu_0 \times H$, is not presented in Figure 4 but is included in the software, see 4.3.4. Figure 4 does also not show the possible analogue feed-back circuit for the waveform control of the induced secondary voltage (see 4.4). The waveform control can also be managed by digital means (see the paragraph before the last one in 4.6 and Annex C).

The following signals shall be measured:

- the voltage induced in the secondary winding, $U_2(t)$;
- the voltage induced in the H coil, $U_H(t)$;

The data set of signals $U_H(t)$ and $U_2(t)$ sampled over one period of magnetization provides the complete information for one measurement.

The magnetic field strength $H(t)$, the magnetic polarization $J(t)$, the specific total loss P_s and the specific apparent power S_s shall be calculated from $U_H(t)$ and $U_2(t)$ by the function of the field measuring devices and the wattmeter in the measuring instrument, see Clause 6.

The measuring instrument using the digital sampling technique is comprised of calibrated preamplifiers for each signal channel, a calibrated digitizer and a digital signal calculator. The measuring instrument has two independent signal channels corresponding to $U_2(t)$ and $U_H(t)$ working simultaneously with a sampling clock that is synchronized with the readout clock of the arbitrary signal generator. Unsynchronized sampling is also used; however, a higher sampling rate is then required to achieve the same accuracy (see Annex B).

The signal channels shall have sufficiently high input impedance (typically $> 1\text{ M}\Omega$ in parallel with about 100 pF) to avoid the load on the secondary winding. The phase shift difference between the channels shall be sufficiently small even at the lowest power factor.

The digital signal calculator calculates the magnetic properties through the evaluating software.

The digital signal calculator may create the digital feedback signal to feed into the arbitrary signal generator for the sinusoidal waveform control of the magnetic polarization by digital means (see Annex C).

The instrument specifications established in 4.5 shall also be applied to the digital sampling technique.

NOTE 2 For the technical details and requirements of the digital sampling technique, see Annex B.

5 Measurement procedure

5.1 Principle of measurement

The apparatus and the windings shall be connected as shown in Figure 2 or Figure 4, as applicable.

If the digital sampling technique is employed, the voltage induced in the secondary winding $U_2(t)$ and the voltage induced in the H coil $U_H(t)$ shall be measured as time functional signals.

The magnetic field strength $H(t)$, the magnetic polarization $J(t)$, the specific total loss P_s and the specific apparent power S_s shall be calculated from $U_H(t)$ and $U_2(t)$.

NOTE For the technical details and requirements of the digital sampling technique, see Annex B.

5.2 Preparation of measurement

The length of the test specimen and its mass shall be measured with an accuracy of $\pm 0,1\%$. The test specimen shall be loaded and centred on the longitudinal and transverse axes of the windings.

The cross-sectional area of the test specimen shall be calculated from Formula (1).

$$A = \frac{m}{l\rho_m} \quad (1)$$

where

- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- m is the mass of the test specimen, in kilograms;
- l is the length of the test specimen, in metres;
- ρ_m is the density of the test material, in kilograms per cubic metre.

Prior to measurement, the test specimen shall be carefully demagnetized from well above the value of magnetic field strength to be measured, by slowly reducing the corresponding magnitude of the alternating magnetizing current to zero.

5.3 Adjustment of power supply

In practice, single or grouped peak values of magnetic polarization J and magnetic field strength $\hat{H}$ are set at a specified frequency.

For the measurements of the specific total loss P_s , the specific apparent power S_s , r.m.s. value of magnetic field strength $\tilde{H}$ and the peak value of the magnetic field strength $\hat{H}$, the peak value of magnetic polarization $\hat{J}$ shall be set by adjusting the power supply.

For the measurement of the peak value of magnetic polarization $\hat{J}$, the peak value of magnetic field strength $\hat{H}$ shall be set.

The values of $\hat{H}$ and $\hat{J}$ shall be calculated from $U_H(t)$ and $U_2(t)$ measured over one or several periods of magnetization respectively, using formulas corresponding to Formulas (2) and (3), respectively.

The output of the power supply shall be slowly increased until $\hat{J}$ or $\hat{H}$ has reached the desired value. The output of the power supply shall not decrease during the measurement.

The waveform of the induced secondary voltage $U_2(t)$ should be checked to ensure that only the fundamental component is present. In addition, the shape of the hysteresis loop composed of $H(t)$ and $J(t)$ should be checked to ensure that a symmetrical loop is presented.

6 Determination of characteristics

6.1 Determination of the magnetic polarization

The magnetic polarization $J(t)$ shall be calculated from Formula (2).

$$J(t) = \frac{1}{N_2 A} \left\{ \int_0^t U_2(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^t U_2(\tau) d\tau \right) dt \right\} \quad (2)$$

where

- $J(t)$ is the magnetic polarization, in teslas;
- N_2 is the number of turns of the secondary winding;
- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- $U_2(t)$ is the induced secondary voltage, in volts;
- τ is an auxiliary time variable.

The second term in the brackets of Formula (2) is the time average over the length of a period which compensates for the integration constant.

6.2 Determination of the magnetic field strength

The magnetic field strength $H(t)$ shall be calculated from Formula (3).

$$H(t) = \frac{1}{\mu_0 (N_H A_H)} \left\{ \int_0^t U_H(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^t U_H(\tau) d\tau \right) dt \right\} \quad (3)$$

where

$H(t)$ is the magnetic field strength, in amperes per metre;

μ_0 is the magnetic constant ($4 \pi \times 10^{-7}$ henrys per metre);

$(N_H A_H)$ is the area-turns of the H coil, in square metres;

$U_H(t)$ is the voltage induced in the H coil, in volts;

τ is an auxiliary time variable.

The second term in the brackets of Formula (3) is the time average over the length of a period which compensates for the integration constant.

NOTE For the determination of the area-turns of H coil, see 4.3.3.

6.3 Determination of the specific total loss

The specific total loss P_s , corresponds to the area of the hysteresis loop formed by the magnetic field strength $H(t)$ and the magnetic polarization $J(t)$, and shall be calculated from Formula (4).

$$P_s = \frac{f}{\rho_m} \int_0^T H(t) \frac{dJ(t)}{dt} dt = \frac{f}{\rho_m N_2 A} \int_0^T H(t) U_{2c}(t) dt \quad (4)$$

where

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

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

f is the frequency of the magnetization, in hertz;

T is the magnetizing period where $T = 1/f$, in seconds;

N_2 is the number of turns of the secondary winding;

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

$H(t)$ is the magnetic field strength, in amperes per metre;

$J(t)$ is the magnetic polarization, in teslas;

$U_{2c}(t)$ is the air flux compensated induced secondary voltage, in volts.

NOTE 1 For the air flux compensation, $J = B - \mu_0 \times H$, see 4.3.4.

NOTE 2 In the first integral of Formula (4), $\int_0^T H(t) \frac{dJ(t)}{dt} dt$, B was replaced by J because the contribution of the

air flux, the integral $\int_0^T H(t) \frac{\mu_0 dH(t)}{dt} dt$, is zero.

6.4 Determination of the specific apparent power

The specific apparent power S_s shall be calculated from Formula (5).

$$S_s = 2\pi f \frac{1}{\rho_m} \tilde{H} \cdot \tilde{J} \quad (5)$$

where

- S_s is the specific apparent power of the test specimen, in volt-amperes per kilogram;
- f is the frequency of the magnetization, in hertz;
- ρ_m is the conventional density of the test material, in kilograms per cubic metres;
- $\tilde{H}$ is the r.m.s. value of magnetic field strength $H(t)$, in amperes per metre;
- $\tilde{J}$ is the r.m.s. value of magnetic polarization $J(t)$, in teslas.

7 Reproducibility

The reproducibility of this method using the test apparatus defined above is characterized by a relative standard deviation of 3 % or less for the specific total loss at 1,3 T and 1,4 T, about 1 % for the peak value of magnetic polarization at 80 A/m, and about 6 % for the specific apparent power at 1,3 T and 1,4 T.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

Annex A

(informative)

Requirements of the single sheet tester for Fe-based amorphous strip

A.1 Shape of test specimen

The test specimen should be kept flat in the test apparatus. The magnetic properties of Fe-based amorphous strip can be deteriorated significantly with a small deformation of its shape because of the high magnetoelastic sensitivity of the material.

The test method using a toroidal test specimen in accordance with IEC 60404-6 [2] is unsuitable because a small change in diameter of the test specimen is usually unavoidable and then deteriorated magnetic properties may be obtained.

A.2 H coil method

The wattmeter method with the determination of the magnetic field strength from the magnetizing current ("MC method"), measures magnetic properties including the effects of the yoke. Thus, this combination is unsuitable for thin and low loss materials such as Fe-based amorphous strip. In contrast, the wattmeter method with H coil mode ("H coil method"), measures only the magnetic properties of test specimen at the area apart from the pole faces of yoke. Therefore, the loss values measured using the MC method are usually indicated higher than the values when the H coil method is used.

To apply the H coil method, a key point is to connect one terminal of the signal from the H coil and one terminal of the signal from the secondary winding as shown in Figure 4. It results in an effective reduction of high frequency noise on the signal of the H coil. Larger area-turns of the H coil and amplification of the H coil signal by a high quality preamplifier with low noise and low phase shift are also key points. A preamplifier powered by a clean DC power source is preferential in order to be free from power frequency noise.

Synchronous averaging of the signals over several periods is effective to remove noise on the signals except the noise of power frequency when the frequency of the magnetization is the same as the power frequency.

A.3 Yoke

The yoke material has low magnetic remanence and low values of specific total loss at low magnetization to reduce DC bias of magnetization of the test specimen. Soft ferrite is suitable for the yoke material.

A single yoke is more suitable than double yokes. The magnetic properties of Fe-based amorphous strip are very sensitive to stress. The upper yoke will apply stress in the parts of the test specimen near the pole faces of the yokes, and, as a result, the magnetic properties become deteriorated. Moreover, the large magnetostriction of Fe-based amorphous material causes compressive stress in the material if both ends of the test specimen are clamped between the pole faces of the yokes. These effects are considered larger than loss increases by planar eddy currents in the very thin test specimen caused by the asymmetric transition of the flux in the single yoke.

A.4 Wirings

The voltage induced in the H coil $U_H(t)$ is low and can easily be superimposed by high frequency noise. To reduce the noise on the output signal, the wires between windings and

the measuring instrument should be connected as shown in Figure 4; each pair of terminals is connected on one side with the common ground.

A.5 Non-inductive precision resistor

A non-inductive precision resistor having an accuracy of $\pm 0,1$ % or better is used to measure the magnetizing current that is used for the sinusoidal waveform control of the magnetic polarization by digital means (see Annex C). The resistance value is $1\ \Omega$ or less in order to minimize the distortion of the magnetic polarization signal.

A four-terminal resistor of sufficient heat capacity should be used. The two current terminals are connected in series with the primary winding and the two potential terminals are connected to a signal channel of the measuring instrument.

A.6 Magnetic shielding

Since the magnetic permeability of Fe-based amorphous strip is very high, it is preferable that the single sheet tester is equipped with a magnetic shield. Even if the magnetic axis of the test apparatus is oriented at right angles to the direction of the earth's magnetic field, the geomagnetic field can magnetize the test specimen, to a substantial degree, in the transverse direction to the magnetic axis. A simple magnetic shield can avoid this unexpected magnetization of the test specimen by the external magnetic field.

A.7 Method for checking the stability of the installed H coil from time to time

After the H coil is installed in the former, the area-turns of the H coil may be checked in comparison of the peak values of magnetic field strength obtained by the H coil and a reference H coil of known area-turns placed in the centre of the windings without the test specimen. The reference H coil can be previously calibrated in a uniform field.

A simple alternative method without a reference coil is to feed a stable and known exciting current through the primary winding in the absence of the test specimen in the test apparatus and comparing the H coil output with the value recorded earlier, kept as a reference value. Besides the simplicity, the advantage of the simple method is avoiding error introduced by the positioning of the reference coil.

NOTE The calibration of the area-turns of the H coil in a uniform field using a solenoid coil of a diameter and length large enough to obtain a uniform field over the volume of the H coil is described in 4.3.3.

Annex B (informative)

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

B.1 General

The digital sampling technique is an advanced method that is almost exclusively applied to the electrical part of the measurement procedure of this document [3-5]. Applied to the wattmeter method with H coil mode, it is characterized by the digitization of the voltage $U_2(t)$ induced in the secondary winding and the voltage $U_H(t)$ induced in the H coil, and by the evaluation of these 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_{Hj} respectively, are sampled and held simultaneously from the time-dependent voltage signals during a narrow and equidistant time period 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 test specimen data 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.

Figure 4 represents the circuit of the wattmeter method with H coil mode adopting the digital sampling technique based on the principle of the circuit shown in Figure 2. The digital sampling technique allows all functions of the measurement equipment in Figure 2 to be realised by a combined system of a data acquisition equipment and software. The control of the sinusoidal waveform of the induced secondary voltage can also be realised by a digital means as is shown in Annex C.

Annex B is helpful in understanding the impact of the digital sampling technique on the precision achievable by the methods of this document. This is particularly important because ADC circuits, transient recorders and supporting software are readily available and make it possible to establish a sampling wattmeter. The digital sampling technique can offer low uncertainty, but it leads to large errors if improperly used.

NOTE This principle and implementation of digital sampling technique are widely described in many papers and books [6-8].

B.2 Technical details and requirements

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

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

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 second.

In order to achieve lower uncertainties, the length of the period of the magnetization divided by the time interval between the sampled points, i.e. the ratio f_s/f , should be an integer (Nyquist condition [7]) and the sampling frequency, f_s , should be greater than twice the input signal bandwidth.

The windings of the test apparatus are connected as shown in Figure 4.

The power supply is usually a computer controlled digital signal generator and a power amplifier. A low pass filter should be inserted between the digital signal generator and the power amplifier to prevent aliasing at the measuring instruments. The measuring instrument usually consists of preamplifiers for each signal channel, a calibrated digitizer and a digital signal calculator (usually a personal computer). The preamplifier should have a high input impedance (typically $>1 \text{ M}\Omega$ in parallel with 90 pF to 150 pF) to avoid loading the secondary circuit and amplifies the input signal into voltage suitable for digitizing with high signal-to-noise ratio. It is recommended that the sampling clock of the digitizer should be synchronized with the clock of the digital signal generator (Nyquist condition).

The measuring instrument digitizes the voltage induced in the secondary winding and the voltage induced in the H coil simultaneously into instantaneous values u_{m2j} and u_{mHj} , respectively. The values u_{m2j} and u_{mHj} should be corrected by the factor, $\frac{R_i + R_2}{R_i}$ and $\frac{R_i + R_H}{R_i}$, respectively, to compensate for the voltage drop through the resistances of the instruments in the measuring circuit. Therefore, the values are calculated as follows:

$$u_{2j} = \frac{R_i + R_2}{R_i} u_{m2j} \quad (\text{B.2})$$

$$u_{Hj} = \frac{R_i + R_H}{R_i} u_{mHj} \quad (\text{B.3})$$

where

- u_{m2j} is the measured instantaneous value of the voltage induced in the secondary winding, in volts;
- u_{mHj} is the measured instantaneous value of the voltage of the H coil, in volts;
- u_{2j} is the instantaneous value of the voltage induced in the secondary winding, in volts;
- u_{Hj} is the instantaneous value of the voltage induced in the H coil, in volts;
- R_i is the input resistance of the measuring instrument, in ohms;
- R_2 is the resistance of the secondary winding, in ohms;
- R_H is the resistance of the H coil, in ohms.

Instantaneous values of the magnetic field strength h_j are calculated as follows:

$$h_j = h'_j - \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} h'_k \quad (\text{B.4})$$

The second term of Formula (B.4) is the average over the length of a period which compensates for the integration constant. The signal h'_j is the result of the integration of the digitalized voltage measured at the H-coil which includes the integration constant and is to be calculated as follows:

$$h'_j = \frac{1}{\mu_0 f_s (N_H A_H)} \sum_{k=0}^j u_{Hk} \quad (\text{B.4A})$$

The digital signal calculator reconstructs the data arrays of h_j , u_{2j} and u_{Hj} into numerical signals of voltages $H(t)$, $U_2(t)$ and $U_H(t)$ respectively, over one period of magnetization.

Compensation of the effect of air flux on the induced secondary voltage $U_2(t)$ should be achieved by the numerical air flux compensation method (see Clause B.4).

The magnetic polarization $J(t)$ can be calculated by using

$$J(t) = \frac{1}{N_2 A} \left\{ \int_0^t U_2(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^t U_2(\tau) d\tau \right) dt \right\} \quad (\text{B.5})$$

τ is an auxiliary time variable.

The second term in the brackets of Formula (B.5) is the time average over the length of a period which compensates for the integration constant.

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:

$$\hat{J} = \frac{1}{4 f N_2 A} \frac{1}{T} \int_0^T |U_2(t)| dt \cong \frac{1}{4 f_s N_2 A} \sum_{j=0}^{n-1} |u_{2j}| \quad (\text{B.6})$$

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

$$P_s = \frac{1}{\rho_m T} \int_0^T H(t) \frac{dJ(t)}{dt} dt \cong \frac{1}{N_2 A \rho_m} \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} h_j u_{2j} \quad (\text{B.7})$$

and the calculation of the specific apparent power follows:

$$S_s = \frac{1}{N_2 A \rho_m} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} h_j^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} u_{2j}^2} \quad (\text{B.8})$$

where

- $J(t)$ is the magnetic polarization, in function of time, in teslas;
- $H(t)$ is the magnetic field strength, in function of time, in amperes per metre;
- $\hat{J}$ is the peak value of the magnetic polarization, in teslas;
- $\hat{H}$ is the peak value of the magnetic field strength, in amperes per metre;
- P_s is the specific total loss of the test specimen, in watts per kilogram;
- S_s is the specific apparent power of the test specimen, in volt-amperes 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_2 is the number of turns of the secondary winding;
- μ_0 is the magnetic constant ($4 \pi \times 10^{-7}$ henrys per metre);
- $(N_H A_H)$ is the area-turns of the H coil, in square metres;
- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- ρ_m is the conventional density of the test material, in kilograms per cubic metre;
- h_j is the instantaneous value of the magnetic field strength, in amperes per metre;
- u_{2j} is the instantaneous value of the induced secondary voltage, in volts;

- n is the number of instantaneous values sampled over one period;
 j, k are the indexes of instantaneous values;
 $U_2(t)$ is the induced secondary voltage, in function of time, in volts;
 $U_H(t)$ is the voltage induced in the H coil, in function of time, in volts.

NOTE With the H coil method, a correction term of the power consumed by the instruments in the secondary circuit loss is not necessary for the calculation of the specific total loss.

The pairs of values, u_{Hj} and u_{2j} , 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, $U_H(t)$ 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 [9] in technical frequencies. 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 should be considerably higher (500 samples per period or more) in order to keep the deviation of the true period length from the nearest time of sampled point small. Keeping the Nyquist condition becomes a decisive advantage in the case of higher frequency applications to keep the sampling frequency reasonable low. The use of a low-pass anti-aliasing filter [7] is recommended in order to eliminate irrelevant higher frequency components which would otherwise interact with the digital sampling process producing aliasing noise.

Regarding the amplitude resolution, studies [6, 9] have shown that below a 12-bit resolution, the digitization 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 consideration of the phase shift is more relevant the lower the power factor $\cos(\varphi)$ becomes (φ being the phase difference between the fundamental components of the two voltage signals) and the higher the frequency is. 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.

B.3 Calibration aspects

The verification of the reproducibility requirements of this standard makes careful calibration of the measurement equipment necessary. The two voltage channels including preamplifiers and ADCs can be calibrated using a calibrated reference AC voltage source traceable to national standards [8]. By connecting the reference AC voltage source to inputs of the two voltage channels, the amplitude of each channel and the phase difference between channels and the dependence on the frequency should be verified. These performances of the two channels can be taken into account with the evaluation processing in the digital signal calculator. In any case, it would not be sufficient to calibrate the set-up using reference samples because the Fe-based amorphous strip is quite sensitive to stress that could be applied on the sample during repetition of measurements.

B.4 Numerical air flux compensation

The numerical air flux compensation method is similar to the principle of mutual inductor.

Applied to the H coil method, the compensation can be carried out as follows:

$$U_{2c}(t) = U_{2m}(t) - C \cdot U_H(t) \quad (\text{B.9})$$

where

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

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

C is the value of compensation factor;

$U_H(t)$ is the voltage induced in the H coil, in volts.

The adjustment of the value of compensation factor C can be made so that, when passing an alternating current through the primary winding in the absence of the test specimen in the test apparatus, the compensated voltage must be no more than 0,1 % of the non-compensated voltage appearing across the secondary winding alone, corresponding to the condition of maximum magnetic flux density such as 80 A/m.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

Annex C (informative)

Sinusoidal waveform control of the magnetic polarization by digital means

The prescribed sinusoidal waveform of the magnetic polarization may be difficult to achieve by means of conventional analogue feedback techniques. Instabilities and auto-oscillations are likely to occur when the magnetic polarization is increased beyond the knee of the magnetization curve. The digital means is expected to be immune from auto-oscillatory effects.

The voltage $U_g(t)$ to be fed into the arbitrary signal generator can be calculated from Formula (C.1) neglecting spurious capacitance effects [4,5,10,11].

$$U_g(t) = \frac{1}{G} \left(N_1 \left(A \frac{dJ(t)}{dt} + \mu_0 A_1 \frac{dH(t)}{dt} \right) + R_s I(t) \right) = \frac{1}{G} \left(A N_1 \frac{dJ(t)}{dt} + \frac{\mu_0 A_1 N_1^2}{l_m} \frac{dI(t)}{dt} + R_s I(t) \right) \quad (C.1)$$

where

- $U_g(t)$ is the voltage to be fed into the arbitrary signal generator, in volts;
- G is the gain of the power amplifier;
- N_1 is the total number of turns of the primary winding;
- N_2 is the total number of turns of the secondary winding;
- $J(t)$ is the target magnetic polarization, in teslas;
- $H(t)$ is the magnetic field strength, in amperes per metre;
- $I(t)$ is the magnetizing current, in amperes;
- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- A_1 is the effective cross-sectional area of the primary winding, in square metres;
- l_m is the conventional effective magnetic path length, in metres ($l_m = 0,24$ m);
- μ_0 is the magnetic constant, $4 \pi \times 10^{-7}$ henrys per metre;
- R_s is the total series resistance of the magnetizing circuit, in ohms.

An iterative method of signal waveform control is possible. A voltage $U_{i+1}(t)$, to be fed into the computer controlled arbitrary signal generator at $(i + 1)$ -th step, can be calculated from Formula (C.2). The voltage $U_{i+1}(t)$ is calculated from the difference between the measured voltages induced in the second winding $U_2(t)$ and the target voltage induced in the second winding for the desired set point $U_J(t)$. The iteration can be stopped once the prescribed form factor value 1,111 with a relative tolerance of ± 1 % of the magnetic polarization is attained.

$$U_{i+1}(t) = U_i(t) + K \frac{N_1}{G N_2} (U_J(t) - U_2(t)) \quad (C.2)$$

where

- $U_{i+1}(t)$ is the voltage to be fed into the arbitrary signal generator at $(i + 1)$ -th step, in volts;
- K is the constant of negative-feedback; positive value below 1,0;
- G is the gain of the power amplifier;
- $U_J(t)$ is the calculated voltage induced in the secondary winding when the set magnetic polarization has been achieved, in volts;
- $U_2(t)$ is the voltage induced in the secondary winding, in volts.

Because the signal control by digital means is the repetition of magnetization, acquisition of the signals, demagnetization and signal control, the total time for signal control becomes longer compared with the analogue case. In order to reduce the total control time, a special apparatus that switch the signals $U_i(t)$ to $U_{i+1}(t)$ seamlessly can be adopted to omit the demagnetization.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

Bibliography

- [1] IEC 60404-3: 1992², *Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester*
IEC 60404-3:1992/AMD1:2002
IEC 60404-3:1992/AMD2:2009
- [2] IEC 60404-6:2003, *Magnetic materials – Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens*
- [3] ISHIHARA, Y., *Investigation on measurement methods of magnetic properties of Fe-based amorphous strip based for an IEC standard*. Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics, 48 (2015) p.113-122
- [4] BIRKELBACH, G., HEMPEL, K. A. and SCHULTE, F. J., *Very low frequency magnetic hysteresis measurements with well-defined time dependence of the flux density*. IEEE Trans. on Magn., MAG-22 (1986) p.505-507
- [5] BERTOTTI, G., FERRARA, E., FIORILLO, F. and PASQUALE, M., *Loss measurement on amorphous alloys under sinusoidal and distorted induction waveform using a digital feedback technique*. J. Appl. Phys., 73 (1993) p.5375-5377
- [6] De WULF, M. and MELKEBEEK, J., *On the advantage and drawbacks of using digital acquisition systems for the determination of magnetic properties of electrical steel sheet and strip*. J. Magn. Magn. Mater., 196-197 (1999) p.940-942
- [7] STERNS, S.D., *Digital signal analysis*. 5th Edition, Hayden Book (1991), ISBN: 0-8104-5828-4
- [8] AHLERS, H., *Precision calibration procedure for magnetic loss testers using a digital two-channel function generator*. SMM 11 Venice 1993, J. Magn. Magn. Mater., vol 133 (1994) p.437-439
- [9] AHLERS, H. and SIEVERT, J., *Uncertainties of Magnetic Loss Measurements, particularly in Digital Procedures*. PTB-Mitt. 94 (1984) p.99-107
- [10] LÜDKE, J. and AHLERS, H., *Hybrid control used to obtain sinusoidal curve form for the power loss measurement on magnetic materials*. Proceedings of the EMMA Conference 2000: Materials Science Forum, vols 373-376 (2001) p.469-472
- [11] FIORILLO, F., *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism. Academic Press (2004), ISBN: 0-12-257251-3

² A consolidated version of this publication exists, comprising IEC 60404-3:1992, IEC 60404-3:1992/AMD1:2002 and IEC 60404-3:1992/AMD2:2009.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes et définitions	33
4 Principes généraux	34
4.1 Principe de la méthode	34
4.2 Eprouvette d'essai	35
4.3 Appareillage d'essai.....	36
4.3.1 Généralités	36
4.3.2 Culasse	36
4.3.3 Enroulements	36
4.3.4 Compensation du flux d'air	37
4.3.5 Blindage magnétique	37
4.4 Alimentation électrique.....	37
4.5 Instruments de mesure	38
4.6 Technique d'échantillonnage numérique	38
5 Procédure de mesure	40
5.1 Principe de mesure	40
5.2 Préparation de la mesure	40
5.3 Réglage de l'alimentation électrique.....	41
6 Détermination des caractéristiques	41
6.1 Détermination de la polarisation magnétique.....	41
6.2 Détermination du champ magnétique	42
6.3 Détermination des pertes totales massiques	42
6.4 Détermination de la puissance apparente massique.....	43
7 Reproductibilité	43
Annexe A (informative) Exigences relatives au dispositif d'essai sur tôle unique des bandes en alliage amorphe à base de fer.....	44
A.1 Forme de l'éprouvette d'essai	44
A.2 Méthode de la bobine de H	44
A.3 Culasse	44
A.4 Câblages	45
A.5 Résistance de précision non inductive	45
A.6 Blindage magnétique	45
A.7 Méthode de vérification périodique de la stabilité de la bobine de H installée.....	45
Annexe B (informative) Technique d'échantillonnage numérique pour la détermination des propriétés magnétiques et compensation numérique du flux d'air	46
B.1 Généralités	46
B.2 Détails techniques et exigences	46
B.3 Aspects liés à l'étalonnage.....	50
B.4 Compensation numérique du flux d'air	50
Annexe C (informative) Contrôle de la forme d'onde sinusoïdale de la polarisation magnétique par des moyens numériques	51
Bibliographie.....	53

Figure 1 – Schéma du dispositif d'essai	34
Figure 2 – Circuit de la méthode du wattmètre en mode bobine de H	35
Figure 3 – Dimensions de la culasse	36
Figure 4 – Circuit de la méthode du wattmètre en mode bobine de H exploitant la technique d'échantillonnage numérique	39

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 16: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer 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 brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60404-16 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

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

CDV	Rapport de vote
68/570/CDV	68/583A/RVC

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60404, publiées sous le titre général *Matériaux magnétiques*, peut être consultée 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 "<http://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.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-16:2018

INTRODUCTION

Une méthode de mesure des propriétés magnétiques d'une bande en alliage amorphe à base de fer est exigée pour qualifier ce qui est considéré comme un matériau prometteur pour réduire les pertes énergétiques dans les noyaux de transformateur et, par conséquent, lutter contre le réchauffement climatique.

Le métal amorphe à base de fer est produit par un procédé de solidification rapide par coulée continue. La bande est destinée en premier lieu à la construction de noyaux enroulés de transformateurs de distribution pour les applications commerciales aux fréquences industrielles (50 Hz et 60 Hz).

Après un traitement thermique adéquat, la bande présente des pertes totales massiques relativement faibles par rapport à la tôle magnétique à grains orientés. Cela est lié aux faibles pertes par hystérésis dues à la faible anisotropie magnétique, ainsi qu'aux faibles pertes par courants de Foucault du fait d'une résistivité élevée et d'une faible épaisseur du matériau. Pourtant, une détérioration importante peut se produire en appliquant une contrainte sur la bande, en raison de la forte magnétostriction et des faibles caractéristiques d'anisotropie magnétique du matériau.

Par conséquent, une méthode de mesure des propriétés magnétiques de la bande en alliage amorphe à base de fer à l'aide de l'essai sur tôle unique (SST) est exigée, indépendamment de l'IEC 60404-3 [1]¹, spécifiée pour les tôles magnétiques.

La présente norme fait également appel à la méthode du wattmètre qui est presque exclusivement utilisée pour ce type de mesure. Cependant, la version largement répandue consistant à déterminer le champ magnétique à partir du courant magnétisant ("méthode MC") n'est pas applicable à ce type de matériau, car l'influence des culasses sur la mesure des pertes est relativement supérieure pour l'éprouvette d'essai de ce matériau, qui est plus fine et magnétiquement plus douce. Ainsi, la méthode du wattmètre en mode bobine de H ("méthode de la bobine de H") a été incluse pour déterminer le champ magnétique. Des essais interlaboratoires internationaux de SST et d'éprouvettes d'essai en alliage amorphe à base de fer ont été réalisés, ce qui a donné une configuration convenable du SST pour matériau amorphe. Le concept de culasse simple a été adopté pour éviter l'effet de l'impact de la culasse supérieure, causé par la forte sensibilité magnéto-élastique du matériau.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 16: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer à l'aide de l'essai sur tôle unique

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 s'applique aux bandes en alliage amorphe à base de fer spécifiées dans l'IEC 60404-8-11 pour la mesure des propriétés magnétiques en courant alternatif, avec des fréquences allant jusqu'à 400 Hz.

L'objet de la présente partie est de définir les principes généraux et les détails techniques sur la mesure des propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer à l'aide de l'essai sur tôle unique.

L'essai sur tôle unique s'applique aux éprouvettes d'essai prélevées à partir de bandes en alliage amorphe à base de fer de n'importe quelle qualité. Les caractéristiques magnétiques en courant alternatif sont déterminées pour une tension induite sinusoïdale, pour les valeurs de crête spécifiées de la polarisation magnétique et pour une fréquence spécifiée.

Les mesures sont réalisées à une température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sur des éprouvettes d'essai qui ont été au préalable désaimantées.

NOTE 1 Le dispositif d'essai sur tôle unique spécifié dans le présent document convient pour d'autres matériaux qui possèdent des propriétés magnétiques et des caractéristiques physiques semblables à celles des bandes en alliage amorphe à base de fer, telles que les bandes en alliage magnétiquement doux nanocristallin. Le dispositif d'essai sur tôle unique pour les tôles magnétiques est spécifié dans l'IEC 60404-3.

NOTE 2 Dans l'ensemble du présent document, l'expression "polarisation magnétique" est utilisée conformément à la définition de l'IEC 60050-121. Certaines parties de la série IEC 60404 utilisent plutôt l'expression "induction magnétique".

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte 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 électrotechnique international – Chapitre 221: Matériaux et composants magnétiques*

IEC 60404-8-11, *Matériaux magnétiques – Partie 8-11: Spécifications pour matériaux particuliers – Bandes en alliage amorphe à base de fer, livrées à l'état semi-fini*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60050-121 et 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 <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

4 Principes généraux

4.1 Principe de la méthode

Le présent document s'applique à la méthode du wattmètre avec bobine de H pour déterminer le champ magnétique ("méthode de la bobine de H"). Le flux se referme au moyen d'une culasse simple en "U".

L'éprouvette d'essai comprend une bande en alliage amorphe à base de fer, placée à l'intérieur des deux enroulements suivants:

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

Une bobine de H qui détecte le champ magnétique à la surface de l'éprouvette d'essai est placée au-dessous de l'éprouvette d'essai.

La fermeture du flux est assurée par une culasse simple verticale en "U", dont la section est très importante par rapport à celle de l'éprouvette d'essai (voir Figure 1).

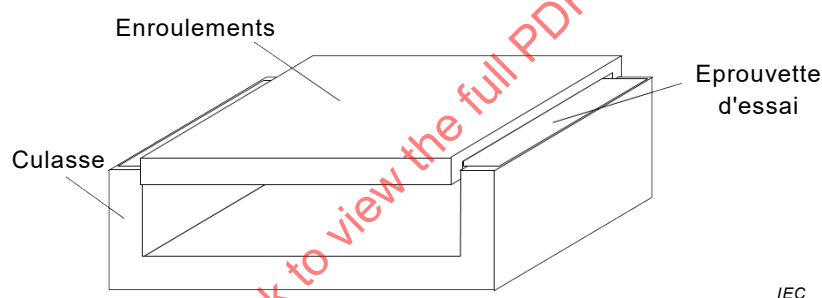


Figure 1 – Schéma du dispositif d'essai

NOTE 1 Les doubles culasses ne conviennent pas, car l'influence de la charge d'une culasse supérieure sur l'éprouvette d'essai est importante du fait de la forte magnétostriction du matériau. Néanmoins, la culasse supérieure peut être placée sur la culasse inférieure en l'absence de l'éprouvette d'essai, afin de désaimanter les culasses et de mesurer les pertes de puissance dans les culasses.

Le schéma du circuit de la Figure 2 représente le principe de la méthode du wattmètre avec la bobine de H. Le dispositif d'essai sur tôle unique et les instruments de mesure doivent être raccordés conformément à la Figure 2.

NOTE 2 La Figure 2 définit également les principes fondamentaux de la technique d'échantillonnage numérique, largement répandue, où les fonctions d'instruments sont réalisées entièrement ou en partie par le logiciel d'évaluation. Pour l'application de la technique d'échantillonnage numérique, voir 4.6 et l'Annexe B. La Figure 2 ne représente pas le circuit de rétroaction pour le contrôle de la forme d'onde de la tension secondaire induite (voir 4.4 et Annexe C).

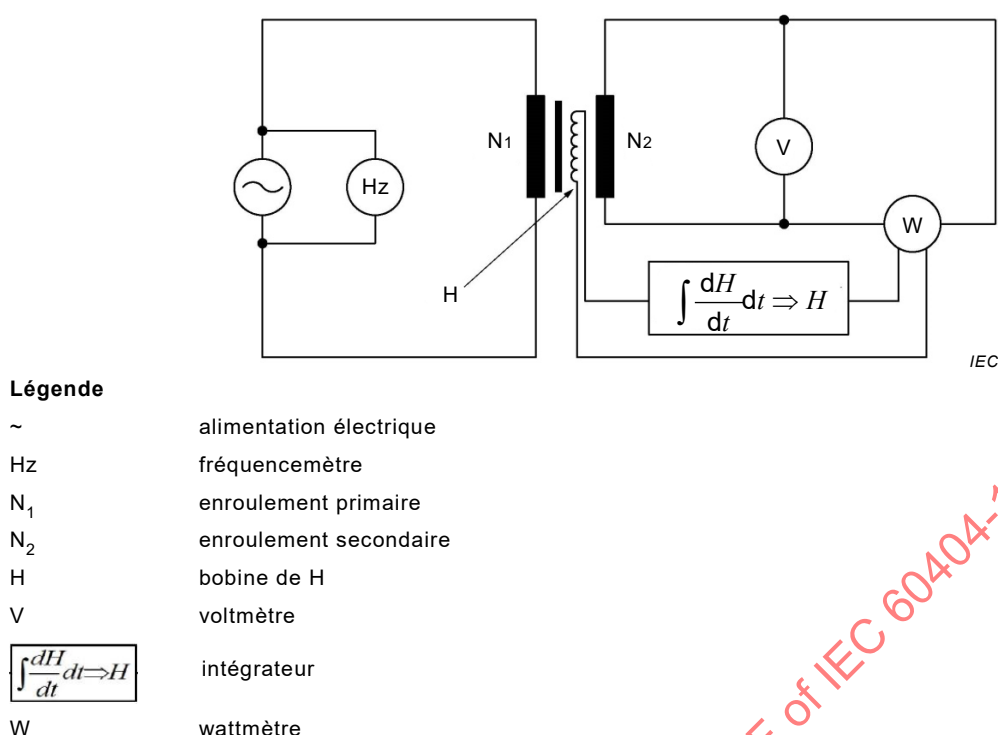


Figure 2 – Circuit de la méthode du wattmètre en mode bobine de H

NOTE 3 La tension induite dans la bobine de H, $U_H(t)$, peut servir à compenser le flux d'air de différentes manières (voir 4.3.4 et Article B.4) et à contrôler la forme d'onde sinusoïdale numérique de la tension secondaire induite $U_2(t)$ (voir 5.3 et Annexe C).

4.2 Epreuve d'essai

L'éprouvette d'essai doit être échantillonnée conformément à l'IEC 60404-8-11.

NOTE Les largeurs nominales des bandes en alliage amorphe à base de fer sont: 142,2 mm, 170,2 mm et 213,4 mm (voir IEC 60404-8-11).

La longueur de l'éprouvette d'essai ne doit pas être inférieure à 280 mm, ce qui correspond à la dimension extérieure de la distance entre les faces polaires de la culasse. Bien que la partie de l'éprouvette située en dehors des faces polaires n'ait pas grande influence sur la mesure, cette partie ne doit pas être plus longue que ce qui est nécessaire pour faciliter les opérations de mise en place et d'enlèvement de l'éprouvette d'essai.

Les éprouvettes doivent être découpées à la longueur voulue dans la bande en alliage amorphe à base de fer, sans formation de bavures excessives ou de distorsions mécaniques. L'éprouvette d'essai doit être plane et rectangulaire.

L'éprouvette d'essai doit être préparée par recuit magnétique dans un champ magnétique continu orienté parallèlement à la direction de la coulée, conformément aux instructions du fabricant. L'éprouvette d'essai doit être maintenue à plat durant le traitement.

Des précautions doivent être prises pour la manipulation de l'éprouvette d'essai après le traitement afin d'éviter de soulever des fragments de la bande ou de créer des contraintes mécaniques dans l'éprouvette d'essai, du fait que le matériau est généralement fragile après le traitement thermique.

4.3 Appareillage d'essai

4.3.1 Généralités

L'appareillage d'essai comprend les enroulements et la culasse (voir Figure 1).

Des précautions doivent être prises pour maintenir les variations de température à un niveau inférieur à celui susceptible de produire des contraintes dans l'éprouvette d'essai en raison d'une dilatation ou d'une contraction thermique.

4.3.2 Culasse

La culasse est en forme de U et est en ferrite doux (voir Figure 3). Il convient que la culasse présente une faible rémanence magnétique, une faible réluctance et des pertes totales spécifiques les plus faibles possible.

NOTE 1 Une moindre qualité des matériaux de culasse peut entraîner une qualité de mesure médiocre et donc des résultats erronés sur les propriétés magnétiques de l'éprouvette d'essai (voir Annexe A).

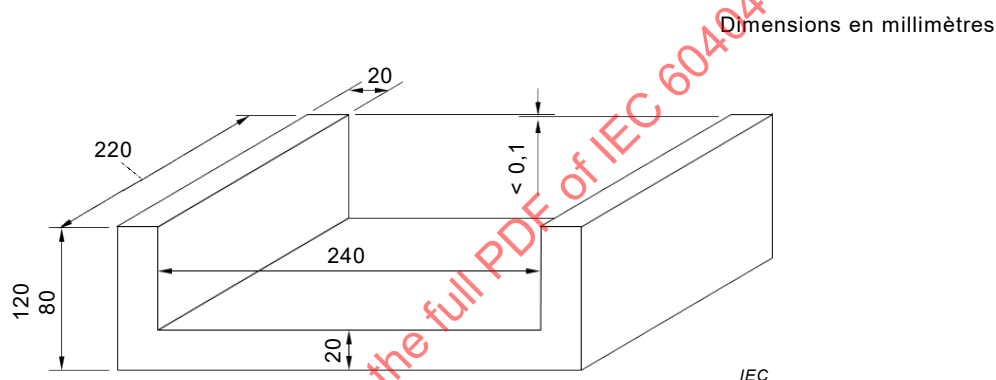


Figure 3 – Dimensions de la culasse

Les faces polaires de la culasse doivent avoir une largeur de $20 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Les deux faces polaires de la culasse doivent être aussi plates que possible et être coplanaires à $0,1 \text{ mm}$ près. De même, la culasse doit être rigide afin d'éviter la création de contraintes mécaniques à l'intérieur de l'éprouvette d'essai.

La hauteur de la culasse doit être comprise entre 80 mm et 120 mm . La culasse doit avoir une largeur de $220 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ et une longueur interne de $240 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (voir Figure 3).

D'autres dimensions de culasse peuvent être utilisées sous réserve que la comparabilité des résultats puisse être démontrée.

NOTE 2 La dissipation des pertes de puissance dans la culasse peut être mesurée en réalisant un circuit magnétique fermé constitué de la culasse et d'une culasse supérieure adaptée, les deux étant bobinées avec les enroulements primaire et secondaire. Il suffit de 25 spires pour chaque enroulement.

L'éprouvette doit être placée sur un support, réalisé dans un matériau non conducteur et non magnétique, entre les branches verticales des culasses. La surface du support de l'éprouvette d'essai doit se trouver dans le même plan que les faces polaires, de façon à ce que l'éprouvette soit en contact avec les faces polaires avec un minimum d'entrefer.

NOTE 3 S'il y a des écarts entre la surface du plan du support d'essai et les faces polaires, des propriétés magnétiques détériorées seront mesurées.

4.3.3 Enroulements

L'enroulement primaire doit avoir une longueur minimale de 230 mm . L'enroulement secondaire doit avoir une longueur minimale de $120 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ et être centré sur

l'enroulement primaire. Les enroulements primaire et secondaire doivent être enroulés sur un support en matériau non conducteur et non magnétique, de forme parallélépipédique. Les dimensions du support doivent être les suivantes:

- longueur d'enroulement: $235 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$;
- hauteur interne: $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$;
- hauteur externe: $\leq 15 \text{ mm}$; la valeur de 12 mm est recommandée.

L'enroulement primaire peut être constitué d'un enroulement unique continu et uniformément réparti sur toute la longueur. Par exemple, cet enroulement peut comporter 220 spires de fil de cuivre de 1 mm de diamètre sur l'ensemble de la longueur, bobinées en une ou plusieurs couches.

L'enroulement secondaire doit être constitué d'un enroulement unique continu et uniformément réparti sur une longueur de $120 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, enroulé sur une couche. Le nombre de spires de l'enroulement secondaire dépend des caractéristiques des appareils de mesure.

La bobine de H doit être de même longueur que l'enroulement secondaire et doit être centrée sur l'enroulement primaire. La bobine de H doit être enroulée sur une plaque en matériau non conducteur et non magnétique, de forme rectangulaire. La largeur de la plaque doit être de $120 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, et la hauteur de la plaque doit être de $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$.

La bobine de H doit être incorporée à la plaque support de l'éprouvette, et la distance entre la surface supérieure de la plaque support et la face supérieure de la bobine de H doit être de $1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$.

La bobine de H doit être étalonnée dans un champ uniforme en utilisant un solénoïde ayant un diamètre et une longueur suffisamment grands pour obtenir un champ uniforme sur le volume de la bobine de H.

4.3.4 Compensation du flux d'air

La compensation de l'effet du flux d'air sur la tension secondaire induite doit être assurée.

Cela est possible, par exemple, avec la méthode de compensation numérique du flux d'air (voir Article B.4).

4.3.5 Blindage magnétique

Un simple blindage magnétique du dispositif d'essai sur tôle unique est recommandé pour affaiblir suffisamment les effets du géomagnétisme et des autres champs magnétiques externes, afin d'éviter une aimantation inopinée de l'appareillage d'essai (voir Annexe A).

4.4 Alimentation électrique

Il convient que l'alimentation électrique soit constituée d'un générateur de signaux arbitraires commandé par ordinateur, et d'un amplificateur de puissance ou d'un instrument assurant ces deux fonctions (voir Figure 4).

Le générateur de signaux arbitraires doit synthétiser un signal de forme d'onde d'excitation, l'amplitude et les données de fréquence, qui sont programmées de manière externe. Il convient d'insérer un filtre passe-bas entre le générateur de signaux arbitraires et l'amplificateur de puissance, afin d'empêcher une distorsion de repliement sur les instruments de mesure.

La fréquence doit être mesurée avec une précision d'au moins $\pm 0,1 \%$.

La forme d'onde de la tension secondaire induite doit être maintenue aussi sinusoïdale que possible. Il est préférable non seulement de maintenir le facteur de forme de la tension secondaire induite à 1,111 avec une tolérance relative de ± 1 %, mais également de supprimer, dans toute la mesure du possible, les résidus harmoniques de la tension secondaire induite. Cela peut s'obtenir par différents moyens, par exemple en utilisant un contrôle de rétroaction analogique ou les moyens numériques décrits à l'Annexe C.

L'amplificateur de puissance doit avoir une faible impédance interne et une stabilité élevée en tension et en fréquence. Son niveau de bruit à basse tension doit être suffisamment faible. Pendant les mesures, la tension et la fréquence doivent être maintenues constantes à $\pm 0,2$ % près.

Il convient que l'amplificateur de puissance soit de type bipolaire à faible bruit, avec de larges plages de fréquence et de tension.

4.5 Instruments de mesure

Les instruments de mesure doivent satisfaire aux spécifications suivantes: La puissance doit être mesurée avec une précision d'au moins $\pm 0,5$ % pour la valeur réelle du facteur de puissance et du facteur de crête. Les tensions doivent être mesurées avec une précision d'au moins $\pm 0,5$ %.

4.6 Technique d'échantillonnage numérique

La Figure 4 représente le circuit fondamental de la technique d'échantillonnage numérique presque exclusivement utilisée pour ce type de mesure; dans cet exemple, la bobine de H est combinée à l'intégrateur pour déterminer le champ magnétique (pour les détails techniques, voir également l'Annexe B). L'instrument de mesure est généralement composé de préamplificateurs, d'un convertisseur numérique et d'un processeur de signal numérique; il assure les fonctions de wattmètre et de voltmètre représentées dans la Figure 2, dans le logiciel.

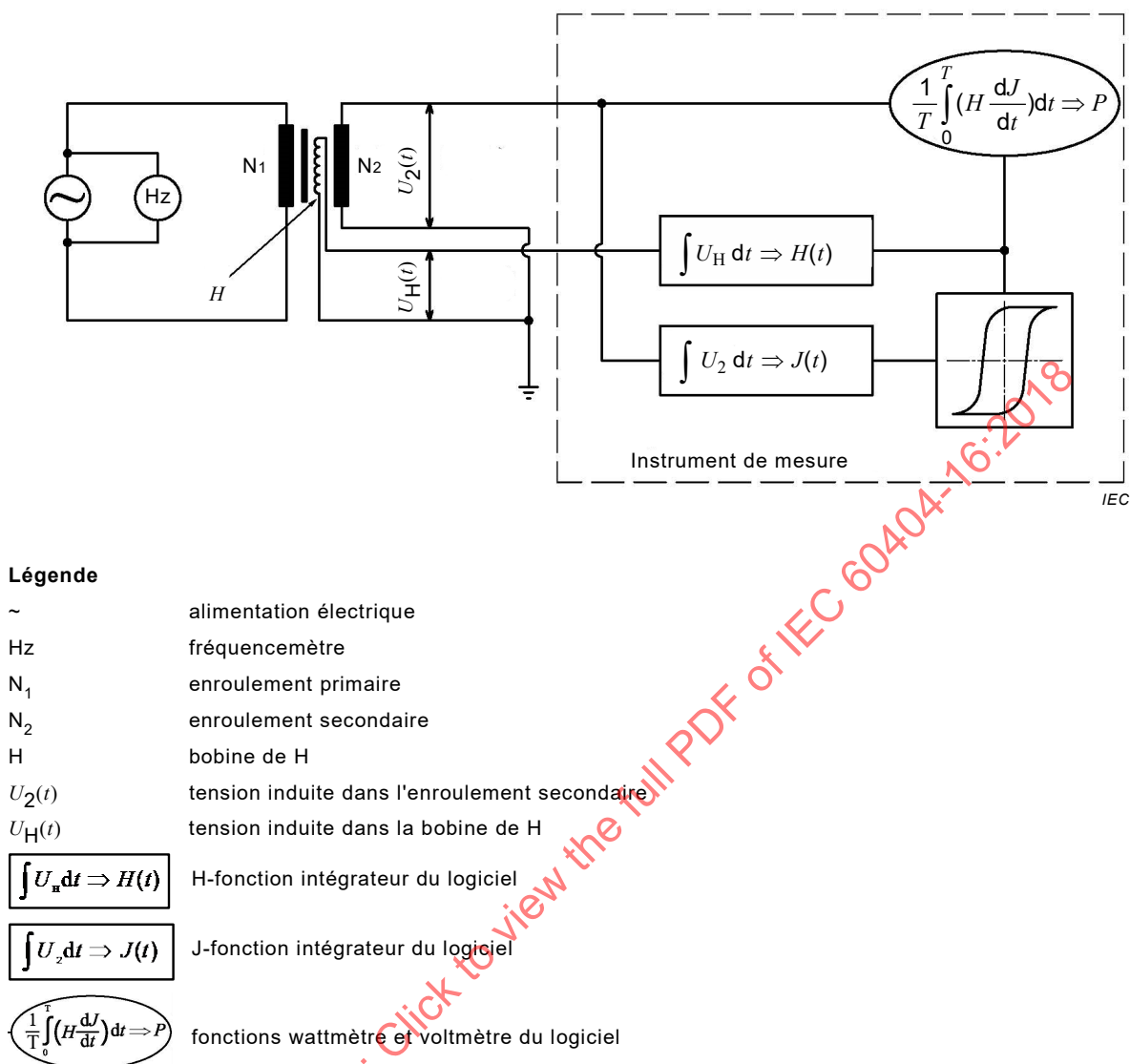


Figure 4 – Circuit de la méthode du wattmètre en mode bobine de H exploitant la technique d'échantillonnage numérique

NOTE 1 La compensation numérique du flux d'air, $J = B - \mu_0 \times H$, n'est pas représentée sur la Figure 4, mais est assurée par le logiciel (voir 4.3.4). La Figure 4 ne représente pas non plus le circuit de rétroaction analogique possible pour le contrôle de la forme d'onde de la tension secondaire induite (voir 4.4). Le contrôle de la forme d'onde peut également être géré par des moyens numériques (voir l'avant-dernier alinéa de 4.6 et l'Annexe C).

Les signaux suivants doivent être mesurés:

- la tension induite dans l'enroulement secondaire, $U_2(t)$;
- la tension induite dans la bobine de H, $U_H(t)$.

Le jeu de données des signaux $U_H(t)$ et $U_2(t)$ échantillonnés sur une période d'excitation constitue l'ensemble de données complet pour une mesure.

Le champ magnétique $H(t)$, la polarisation magnétique $J(t)$, les pertes totales massiques P_s et la puissance apparente massique S_s doivent être calculés à partir de $U_H(t)$ et de $U_2(t)$ par la fonction des dispositifs de mesure du champ et du wattmètre de l'instrument de mesure, voir Article 6.

L'instrument de mesure appliquant la technique d'échantillonnage numérique comprend des préamplificateurs étalonnés pour chaque voie de signal, un convertisseur numérique étalonné

et un processeur de signal numérique. L'instrument de mesure est doté de deux voies de signaux correspondant à $U_2(t)$ et $U_H(t)$, qui travaillent simultanément avec une horloge d'échantillonnage synchronisée sur l'horloge de lecture du générateur de signaux arbitraires. L'échantillonnage non synchronisé est également utilisé; il est cependant nécessaire d'appliquer une vitesse d'échantillonnage supérieure pour obtenir la même précision (voir Annexe B).

Les voies de signaux doivent avoir une impédance d'entrée suffisamment élevée (typiquement $> 1 \text{ M}\Omega$ en parallèle avec environ 100 pF) afin de ne pas surcharger l'enroulement secondaire. Le déphasage entre les voies doit être suffisamment faible, même au facteur de puissance le plus faible.

Le processeur de signal numérique calcule les propriétés magnétiques par l'intermédiaire du logiciel d'évaluation.

Le processeur de signal numérique peut créer le signal de rétroaction numérique pour alimenter le générateur de signaux arbitraires, afin de contrôler la forme d'onde sinusoïdale de la polarisation magnétique par des moyens numériques (voir Annexe C).

Les spécifications des instruments définies en 4.5 doivent également s'appliquer à la technique d'échantillonnage numérique.

NOTE 2 Pour les détails techniques et les exigences applicables à la technique d'échantillonnage numérique, se reporter à l'Annexe B.

5 Procédure de mesure

5.1 Principe de mesure

L'appareillage et les enroulements doivent être reliés conformément à la Figure 2 ou à la Figure 4, selon le cas.

Si la technique d'échantillonnage numérique est utilisée, la tension induite dans l'enroulement secondaire $U_2(t)$ et la tension induite dans la bobine de H $U_H(t)$ doivent être mesurées en tant que signaux temporels.

Le champ magnétique $H(t)$, la polarisation magnétique $J(t)$, les pertes totales massiques P_s et la puissance apparente massique S_s doivent être calculés à partir de $U_H(t)$ et de $U_2(t)$.

NOTE Pour les détails techniques et les exigences applicables à la technique d'échantillonnage numérique, se reporter à l'Annexe B.

5.2 Préparation de la mesure

La longueur et la masse de l'éprouvette d'essai doivent être mesurées avec une précision de $\pm 0,1 \%$. L'éprouvette d'essai doit être chargée et centrée sur les axes longitudinaux et transversaux des enroulements.

La section de l'éprouvette d'essai doit être calculée à l'aide de la Formule (1).

$$A = \frac{m}{l\rho_m} \quad (1)$$

où

A est la section de l'éprouvette d'essai, en mètres carrés;

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

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

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

Avant la mesure, l'éprouvette d'essai doit être soigneusement désaimantée à partir d'une valeur de champ magnétique bien supérieure, en ramenant lentement l'amplitude correspondante du courant magnétisant alternatif à zéro.

5.3 Réglage de l'alimentation électrique

Dans la pratique, les valeurs de crête simples ou groupées de la polarisation magnétique $\hat{J}$ et du champ magnétique $\hat{H}$ sont définies pour une fréquence spécifique.

Pour les mesures des pertes totales massiques P_s , de la puissance apparente massique S_s , de la valeur efficace du champ magnétique $\tilde{H}$ et de la valeur de crête du champ magnétique $\hat{H}$, la valeur de crête de la polarisation magnétique $\hat{J}$ doit être définie en ajustant l'alimentation électrique.

Pour mesurer la valeur de crête de la polarisation magnétique $\hat{J}$, la valeur de crête du champ magnétique $\hat{H}$ doit être définie.

Les valeurs de $\hat{H}$ et $\hat{J}$ doivent être calculées à partir de $U_H(t)$ et de $U_2(t)$, mesurées respectivement sur une ou plusieurs périodes d'excitation, en utilisant les formules correspondant aux Formules (2) et (3), respectivement.

La sortie de l'alimentation électrique doit être augmentée lentement, jusqu'à ce que $\hat{J}$ ou $\hat{H}$ atteigne la valeur souhaitée. La sortie de l'alimentation électrique ne doit pas diminuer pendant la mesure.

Il convient de vérifier la forme d'onde de la tension secondaire $U_2(t)$ afin de s'assurer que seule la composante fondamentale est présente. Par ailleurs, il convient de vérifier la forme du cycle d'hystérésis composé de $H(t)$ et de $J(t)$ pour s'assurer que le cycle est symétrique.

6 Détermination des caractéristiques

6.1 Détermination de la polarisation magnétique

La polarisation magnétique $J(t)$ doit être calculée à l'aide de la Formule (2).

$$J(t) = \frac{1}{N_2 A} \left\{ \int_0^t U_2(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^t U_2(\tau) d\tau \right) dt \right\} \quad (2)$$

où

$J(t)$ est la polarisation magnétique, en teslas;

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

A est la section de l'éprouvette d'essai, en mètres carrés;

$U_2(t)$ est la tension secondaire induite, en volts;

τ est une variable de temps auxiliaire.

Le second terme entre crochets de la Formule (2) est la moyenne dans le temps sur une période qui compense la constante d'intégration.

6.2 Détermination du champ magnétique

La puissance apparente massique $H(t)$ doit être calculée à l'aide de la Formule (3).

$$H(t) = \frac{1}{\mu_0 (N_H A_H)} \left\{ \int_0^t U_H(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_0^t U_H(\tau) d\tau \right) dt \right\} \quad (3)$$

où

$H(t)$ est le champ magnétique, en ampères par mètre;

μ_0 est la constante magnétique, à savoir $4 \pi \times 10^{-7}$ henrys par mètre;

$(N_H A_H)$ est la bobine de H, en mètres carrés;

$U_H(t)$ est la tension induite dans la bobine de H, en volts;

τ est une variable de temps auxiliaire.

Le second terme entre crochets de la Formule (3) est la moyenne dans le temps sur une période qui compense la constante d'intégration.

NOTE Pour la détermination de la bobine de H, voir 4.3.3.

6.3 Détermination des pertes totales massiques

Les pertes totales massiques P_s correspondent à l'aire du cycle d'hystérésis formé par le champ magnétique $H(t)$ et la polarisation magnétique $J(t)$. Elles doivent être calculées à l'aide de la Formule (4).

$$P_s = \frac{f}{\rho_m} \int_0^T H(t) \frac{dJ(t)}{dt} dt = \frac{f}{\rho_m N_2 A} \int_0^T H(t) U_{2c}(t) dt \quad (4)$$

où

P_s sont les pertes totales massiques de l'éprouvette d'essai, en watts par kilogramme;

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

f est la fréquence d'excitation, en hertz;

T est la période d'excitation où $T = 1/f$, en secondes;

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

A est la section de l'éprouvette d'essai, en mètres carrés;

$H(t)$ est le champ magnétique, en ampères par mètre;

$J(t)$ est la polarisation magnétique, en teslas;

$U_{2c}(t)$ est la tension secondaire induite après compensation du flux d'air, en volts.

NOTE 1 Pour la compensation du flux d'air, $J = B - \mu_0 \times H$, voir 4.3.4.

NOTE 2 Dans la première intégrale de la Formule (4), $\int_0^T H(t) \frac{dJ(t)}{dt} dt$, B a été remplacé par J , car la

contribution du flux d'air, l'intégrale $\int_0^T H(t) \frac{\mu_0 dH(t)}{dt} dt$, est nulle.

6.4 Détermination de la puissance apparente massique

Le champ magnétique S_s doit être calculé à l'aide de la Formule (5).

$$S_s = 2\pi f \frac{1}{\rho_m} \tilde{H} \cdot \tilde{J} \quad (5)$$

où

S_s est la puissance apparente massique de l'éprouvette d'essai, en voltampères par kilogramme;

f est la fréquence d'excitation, en hertz;

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

$\tilde{H}$ est la valeur efficace du champ magnétique, $H(t)$ en ampères par mètre;

$\tilde{J}$ est la valeur efficace de la polarisation magnétique, $J(t)$ en teslas.

7 Reproductibilité

La reproductibilité de cette méthode utilisant l'appareillage d'essai défini ci-dessus est caractérisée par un écart-type relatif inférieur ou égal à 3 % pour les pertes totales massiques à 1,3 T et 1,4 T, d'environ 1 % pour la valeur de crête de la polarisation magnétique à 80 A/m, et d'environ 6 % pour la puissance apparente massique à 1,3 T et 1,4 T.

Annexe A (informative)

Exigences relatives au dispositif d'essai sur tôle unique des bandes en alliage amorphe à base de fer

A.1 Forme de l'éprouvette d'essai

Il convient de maintenir l'éprouvette d'essai à plat dans l'appareillage d'essai. Les propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer peuvent se détériorer de façon significative avec une légère déformation de leur forme du fait de la haute sensibilité magnéto-élastique du matériau.

La méthode d'essai utilisant une éprouvette d'essai toroïdale conformément à l'IEC 60404-6 [2] ne convient pas, car une légère variation du diamètre de l'éprouvette d'essai est généralement inévitable, ce qui peut entraîner une détérioration des propriétés magnétiques.

A.2 Méthode de la bobine de H

La méthode du wattmètre, avec la détermination du champ magnétique à partir du courant magnétisant ("méthode MC"), mesure les propriétés magnétiques, y compris les effets de la culasse. Ainsi, cette combinaison ne convient pas aux matériaux fins et à faibles pertes tels que les bandes en alliage amorphe à base de fer. En revanche, la méthode du wattmètre en mode bobine de H ("méthode de la bobine de H") ne permet de mesurer que les propriétés magnétiques de l'éprouvette d'essai sur la zone en dehors des faces polaires de la culasse. Par conséquent, les valeurs de pertes mesurées par la méthode MC se révèlent généralement supérieures aux valeurs obtenues avec la méthode de la bobine de H.

Pour appliquer la méthode de la bobine de H, un élément clé consiste à relier une borne du signal de la bobine de H et une borne du signal de l'enroulement secondaire (voir Figure 4). Il en résulte une réduction efficace du bruit haute fréquence sur le signal de la bobine de H. Un produit "surface x nombre de spires" plus important de la bobine de H et une amplification du signal de la bobine de H par un préamplificateur de haute qualité à faible bruit, avec une faible différence de phase, constituent également des éléments essentiels. Il est préférable d'utiliser un préamplificateur alimenté par une source d'alimentation en courant continu propre afin d'éviter des perturbations dues au bruit de la fréquence du réseau.

Un moyennage synchrone des signaux sur plusieurs périodes est une solution efficace pour éliminer le bruit des signaux, à l'exception du bruit de la fréquence du réseau lorsque la fréquence d'excitation est égale à la fréquence du réseau.

A.3 Culasse

Le matériau de la culasse possède une faible rémanence magnétique et de faibles valeurs de pertes totales massiques à faible aimantation pour réduire la polarisation continue de l'aimantation de l'éprouvette d'essai. Les ferrites doux sont des matériaux adéquats pour la culasse.

Une culasse simple convient mieux que des culasses doubles. Les propriétés magnétiques des bandes en alliage amorphe à base de fer sont très sensibles aux contraintes. La culasse supérieure appliquera une contrainte sur les parties de l'éprouvette d'essai situées à proximité des faces polaires de la culasse, et il en résultera une détérioration des propriétés magnétiques. De plus, la forte magnétostriction de l'alliage amorphe à base de fer engendre une contrainte de compression dans le matériau si les deux extrémités de l'éprouvette d'essai sont serrées entre les faces polaires des culasses. Ces effets sont considérés comme étant plus importants que l'augmentation des pertes dues aux courants de Foucault surfaciques qui