

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials

Matériaux magnétiques –

Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

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

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

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

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

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

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

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60404-4

Edition 2.2 2008-11

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials

Matériaux magnétiques –

Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

CG

ICS 29.030; 17.220.20

ISBN 2-8318-1014-8

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope and object.....	6
2 Normative references	6
3 Determination of the magnetic characteristics by the ring method.....	7
3.1 Object	7
3.2 General	7
3.3 Effect of temperature on the measurements	7
3.4 Test specimen	7
3.5 Windings	8
3.6 Methods of measurement by the ring method	9
3.6.1 Magnetic field strength	9
3.6.2 Magnetic flux density	9
3.6.3 Connection of apparatus.....	10
3.6.4 Determination of normal magnetization curve	10
3.6.5 Determination of a complete hysteresis loop.....	11
3.6.6 Determination of remanent flux density.....	12
3.6.7 Determination of coercive field strength.....	12
3.7 Uncertainty by the ring method	12
4 Determination of the magnetic characteristics by the permeameter method	13
4.1 Object	13
4.2 Principle of the permeameter.....	13
4.3 Test specimen	14
4.4 Methods of measurement by the permeameter method.....	14
4.4.1 Measurement of magnetic field strength	14
4.4.2 Measurement of magnetic flux density	15
4.4.3 Connection of apparatus.....	16
4.4.4 Determination of the normal magnetization curve	17
4.4.5 Determination of a complete hysteresis loop.....	17
4.4.6 Determination of remanent flux density.....	18
4.4.7 Determination of coercive field strength.....	18
4.5 Uncertainty by the permeameter method	18
5 Test report.....	19
Annex A (normative) Calibration of search coils	25
Annex B (informative) Methods of calibrating the flux integrator	27
Annex C (informative) Requirements for the J-compensated coil system.....	30

Figure 1 – Circuit for the determination of the magnetic characteristics by the ring method	20
Figure 2 – Hysteresis loop	20
Figure 3 – Typical arrangement of a type A permeameter	21
Figure 4 – Typical arrangement of a type B permeameter	22
Figure 5 – Arrangement of search coils.....	24
Figure 6 – Circuit for the determination of the normal magnetization curve and hysteresis loop of bar specimens using a double yoke permeameter.....	24
Figure A.1 – Circuit for the calibration of search-coils	26
Figure B.1 – Circuit for calibration the flux integrator by the capacitor discharge method	29
Table 1 – Switching sequence to maintain the test specimen in a steady cyclic state	12

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials

FOREWORD

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

International Standard IEC 60404-4 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This consolidation version of IEC 60404-4 consists of the second edition (1995) [documents 68(CO)95 and 68/117/RVD], its amendment 1 (2000) [documents 68/215/FDIS and 68/217/RVD] and its amendment 2 (2008) [documents 68/363/CDV and 68/375/RVC].

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

It bears the edition number 2.2.

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

Annex A forms an integral part of this standard.

Annexes B and C are for information only.

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

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

MAGNETIC MATERIALS –**Part 4: Methods of measurement of d.c.
magnetic properties of magnetically soft materials****1 Scope and object**

This part of IEC 60404 specifies the methods of measuring the d.c. magnetic properties of magnetically soft materials in a closed magnetic circuit using either the ring or the permeameter methods. The ring method is suitable for use with laminated or solid ring specimens as well as ring specimens produced by sintering.

Two methods are used:

- a) the ring method, particularly for magnetic field strengths of up to 10 kA/m;
- b) the permeameter method for magnetic field strengths in the range 1 kA/m to 200 kA/m.

NOTE The measurement of coercivity in an open magnetic circuit is specified in IEC 60404-7.

2 Normative references

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

IEC 60404-7:1982, *Magnetic materials – Part 7: Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit*

IEC 60404-8-2:1985, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Two: Specification for cold-rolled magnetic alloyed steel strip delivered in the semi-processed state*

IEC 60404-8-3:1985, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Three: Specification for cold-rolled magnetic non-alloyed steel strip delivered in the semi-processed state*

IEC 60404-8-4:1986, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Four: Specification for cold-rolled non-oriented magnetic steel sheet and strip*

IEC 60404-8-6:1986, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Six: Soft magnetic metallic materials*
Amendment 1 (1992)

IEC 60404-8-7:1988, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section Seven: Specification for grain-oriented magnetic steel sheet and strip*
Amendment 1 (1991)

IEC 60404-8-8:1991, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 8: Specification for thin magnetic steel strip for use at medium frequencies*

3 Determination of the magnetic characteristics by the ring method

3.1 Object

This clause describes the ring method used to obtain the normal magnetization curve and the hysteresis loop.

3.2 General

This method is used particularly for magnetic field strengths of up to 10 kA/m. However, if care is taken to avoid heating the test specimen, this method may be used at higher magnetic field strengths.

3.3 Effect of temperature on the measurements

Care shall be taken to avoid unduly heating the test specimen. The measurements shall be made at an ambient temperature of $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. The temperature of the test specimen shall not exceed $50 ^\circ\text{C}$ which shall be monitored by means of a temperature sensor.

For materials which are particularly temperature sensitive, product standards may define lower or higher test specimen temperatures.

3.4 Test specimen

The test specimen is a homogeneous unwelded ring of rectangular or circular cross-section. The cross-sectional area of the ring is determined by the product dimensions, uniformity of magnetic properties, instrumentation sensitivity and space required for the test windings. Usually the cross-sectional area is in the range of 10 mm^2 to 200 mm^2 .

Care shall be taken in the preparation of the test specimen to avoid work hardening or heating of the material which might affect the magnetic characteristics. The test specimen can be prepared by turning and finished by light grinding with sufficient coolant to prevent heating the material. The edges of the rings shall be deburred.

To reduce the effect of radial variation of the magnetic field strength, the ring shall have dimensions such that the ratio of the outer to inner diameter shall be no greater than 1,4 and preferably less than 1,25. If the ratio approaches the value 1,4, there will be a greater radial variation in the magnetic field strength.

For a stack of laminations or a toroidal wound core, the cross-sectional area of the test specimen shall be calculated from the mass, density and the value of the inner and outer diameter of the ring. The density can be the conventional density for the material supplied by the manufacturer. The cross-sectional area shall be calculated from the following equation:

$$A = \frac{2m}{\rho \pi (D + d)} \quad (1)$$

where

- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- D is the outer diameter of the test specimen, in metres;
- d is the inner diameter of the test specimen, in metres;
- m is the mass of the test specimen, in kilograms;
- ρ is the density of the material, in kilograms per cubic metre.

The dimensions of the test specimen shall be determined by measuring the outside and inside diameters of the ring together with the height or diameter using a suitable micrometer or vernier gauge. The mean cross-sectional area shall be calculated with an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better.

The mean magnetic path length of the test specimen shall also be calculated with an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better from the relationship:

$$l = \pi \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

where

l is the mean magnetic path length of test specimen, in metres.

3.5 Windings

Before winding, a connection shall be made to the core in order to check subsequently the insulation of the windings, a temperature sensor shall be attached to the test specimen and then the ring shall be overlaid with a thin layer of insulating material.

Firstly, a secondary winding of insulated copper wire shall be wound evenly round the core. The dimensions of the secondary winding shall be determined and the mean cross-sectional area, A_c , of the secondary winding shall be calculated.

A magnetizing winding of wire capable of carrying the maximum magnetizing current and of a sufficient number of turns to produce the maximum required magnetic field strength shall be evenly wound in one or more layers on the core. The magnetizing winding can consist of:

- a) a large number of turns of a single conductor applied closely and uniformly round the whole ring, or
- b) a smaller number of turns of a multicore cable applied closely and uniformly round the whole ring, the ends of the conductor in the individual cores being interconnected to give the effect of one multilayer winding, or
- c) an arrangement of rigid, or part rigid and part flexible, conductors which can be opened to admit the ring (carrying the secondary winding and insulation) and then closed to form a uniformly wound toroid round the ring.

If necessary, the wound ring is immersed in an oil bath or subjected to an air blast in order to cool it.

NOTE If the above arrangements are used with a uniformly distributed secondary winding, an error, which may be present in any ring test, is liable to be magnified and to become of considerable importance. This error arises because, in winding a ring specimen toroidally, an effective circular turn of diameter equal to the mean diameter of the ring is produced.

The flux between the effective mutually inductive circular turns of the magnetizing winding and secondary winding, associated with flux parallel to the axis of the ring, is added to, or subtracted from the circumferential flux. When a multiconductor cable is used for the magnetizing winding, the number of turns in the primary of the supplementary mutual inductance is increased in proportion to the number of cores, and the error from this source, particularly at high field-strengths where the permeability of the test specimen is reduced, may amount to several per cent. To eliminate this error a turn should be wound back on the secondary winding along the mean circumference of the ring, or, preferably, the magnetizing cable should be wound in pairs of layers, alternate layers being wound clockwise and anti-clockwise around the ring.

3.6 Methods of measurement by the ring method

3.6.1 Magnetic field strength

The magnetizing current shall be measured with an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better. The magnetic field strength shall be calculated from the following relationship:

$$H = \frac{N_1 I}{l} \quad (3)$$

where

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

N_1 is the number of turns of magnetizing winding of the ring;

l is the mean magnetic path length, in metres;

I is the magnetizing current, in amperes.

3.6.2 Magnetic flux density

The secondary winding N_2 (B coil) shall be connected to a flux integrator (electronic integrator, ballistic galvanometer or fluxmeter) the calibration of which shall be established in accordance with one of the procedures given in annex B with an uncertainty of ± 1 % or better.

The changes of the magnetic flux density shall be calculated from the following relationship:

$$\Delta B = \frac{K_B \alpha_B}{N_2 A} \quad (4)$$

where

ΔB is the measured change of the magnetic flux density, in teslas;

K_B is the flux integrator calibration constant, in volts seconds;

α_B is the reading of the flux integrator;

N_2 is the number of turns on the secondary winding of the ring;

A is the cross-sectional area of the ring, in square metres.

For direct reading of the ΔB , the flux integrator may be adjusted so that $K_B/(N_2 A)$ becomes a power of 10.

Provided that the secondary winding is wound closely on the test specimen, the air flux included in the secondary winding over the range of magnetic field strength 0 to 4 kA/m will be insignificant and no correction need be applied. At higher values of magnetic field strength, an air flux correction shall be applied in accordance with equation (8).

3.6.3 Connection of apparatus

The apparatus is connected as shown in figure 1.

A source of direct current E (stabilized d.c. supply with a ripple content of less than 0,1 %, or a battery) is connected through a current-measuring device A and a reversing switch S_1 to the magnetizing winding N_1 on the ring specimen. If a bipolar current source is used, reversing switch S_1 is not required. With switch S_2 closed, the current in the magnetizing circuit is controlled by resistor R_1 . If a stabilized supply with a continuously controllable output is used, resistor R_1 is not required. This is the arrangement of the magnetizing circuit for the determination of the normal magnetization curve and for the measurement of the tip points of hysteresis loops. Switch S_2 , together with resistor R_2 are necessary in some arrangements for the determination of the complete hysteresis loop. The secondary circuit comprises the secondary winding N_2 (B coil) connected to the flux integrator.

3.6.4 Determination of normal magnetization curve

The test specimen shall be carefully demagnetized from a magnetic field strength of not less than 5 kA/m by the repeated reversals of a gradually reducing demagnetizing field. Test specimens which have been subjected to a higher magnetic field strength shall be demagnetized from a suitably high field before test (for example, when machined using a magnetic chuck).

NOTE In order that the magnetic field may completely penetrate the test specimen, the dwell time after each reversal should be greater than 2 s for a cross-section 10 mm × 10 mm, and 10 s for a cross-section 20 mm × 20 mm.

The flux integrator shall be calibrated by one of the methods described in annex B. With S_2 closed, the normal magnetization curve shall then be determined by one of the following methods.

Method A: continuous recording method

To utilize this method, the output from the flux integrator shall be connected to the Y axis of an X-Y recorder, plotter or computer interface. A low value (e.g. 0,1 Ω or 1 Ω) calibrated resistor with two current and two voltage terminals shall be connected in series with the magnetizing winding. The potential terminals of this resistor shall be connected to the X axis of the recorder, plotter or computer interface. The system can be calibrated overall to give direct readings of magnetic flux density and magnetic field strength on the recorder, plotter or computer interface.

The magnetizing current shall be steadily increased from zero to the value to produce the required maximum magnetic field strength. The magnetization curve is then produced on the X-Y recorder, plotter or computer interface.

Method B: point-by-point method

A low current corresponding to a low magnetic field strength (see equation 3) shall be passed through the magnetizing winding N_1 . The current shall be reversed about 10 times by means of reversing switch S_1 to bring the material into a steady cyclic state. Switch S_3 shall be closed during this operation to maintain the flux integrator at zero. With switch S_3 open, the flux integrator reading corresponding to the reversal of the magnetizing field shall be recorded and the corresponding magnetic flux density calculated.

By successively increasing the magnetizing current and repeating this procedure, corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density are obtained from which the normal magnetization curve can be plotted.

The magnetizing current shall never be decreased during the measurements, otherwise the test specimen shall be demagnetized before resuming measurements.

3.6.5 Determination of a complete hysteresis loop

The test specimen shall be demagnetized in accordance with 3.6.4 and the hysteresis loop shall be determined by one of the following methods.

Method A: continuous recording method

The additional equipment specified in method A of 3.6.4 is required. The flux integrator shall be zeroed and then a current of value sufficient to produce the maximum magnetic field strength required shall be passed through the magnetizing winding N_1 . This current shall be slowly reduced to zero, reversed, increased to its maximum negative value, reduced to zero, reversed again and increased to its maximum positive value.

NOTE The cycle should be completed in a time between 30 s to 60 s, although some materials, e.g. pure iron, may require longer, in order to allow time for the magnetization of the test specimen to follow the applied magnetic field and yet avoid significant drift of the flux integrator zero with time.

Method B: point-by-point method

The test specimen shall be demagnetized and a current sufficient to produce the maximum magnetic field strength required shall be passed through the magnetizing winding N_1 . The tip points of the hysteresis loop shall be determined by measuring the corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density in accordance with method B of 3.6.4.

Portion PQ of the hysteresis loop (see figure 2) is then determined with switch S_1 closed in position 1, by opening switch S_2 , and measuring the corresponding magnetic field strength and change in magnetic flux density. By adjusting resistor R_2 a number of points on the curve PQ can be obtained. The point Q is obtained with switch S_2 closed and measuring the change in magnetic flux density when opening switch S_1 .

The value of the magnetic field strength at each point is calculated from the corresponding measured value of current flowing (see equation (3)).

The value of the magnetic flux density at each point is calculated from the following relationship:

$$B_{P'} = B_P - \Delta B \quad (5)$$

where

$B_{P'}$ is the flux density at the point P' of curve PQ, in teslas;

B_P is the magnetic flux density at tip of hysteresis loop, in teslas;

ΔB is the change in magnetic flux density measured when switch S_2 is opened, switch S_1 being closed in position 1, in teslas.

Portion QS of the hysteresis loop is determined, with switch S_2 open, by closing switch S_1 . Changes in magnetic field strength and magnetic flux density are measured starting with switch S_1 in the open position and closing it to position 2.

The value of the magnetic field strength at each point is calculated from the measured value of the current flowing when S_1 is closed in position 2 (see equation (3)).

The value of the magnetic flux density at each point is calculated from the following relationship:

$$B_{Q'} = B_Q - \Delta B \quad (6)$$

where

$B_{Q'}$ is the magnetic flux density at the point Q' on curve QS, in teslas;

B_Q is the magnetic flux density at the point Q, in teslas;

ΔB is the change in magnetic flux density measured when switch S_1 is closed in position 2 with the switch S_2 open, in teslas.

To obtain the complete hysteresis loop, the switching sequence shall be in accordance with the arrangement given in table 1 to maintain the test specimen in a steady cyclic state.

Table 1 – Switching sequence to maintain the test specimen in a steady cyclic state

	Switch- S_1	Switch S_2	Point on loop
1	Closed (1)	Closed	P
2	Closed (1)	Open	P'
3	Open	Open	Q
4	Closed (2)	Open	Q'
5	Closed (2)	Closed	S
6	Closed (2)	Open	S'
7	Open	Open	T
8	Closed (1)	Open	T'
9	Closed (1)	Closed	P

Resistors R_1 and R_2 respectively are adjusted to obtain:

- resistor R_1 : values of magnetic field strength $+H$ or $-H$, that is point P or point S on the loop (figure 2);
- resistor R_2 : values of magnetic field strength $+H'$ or $-H'$, that is points P' and T' or points Q' and S' on the loop (figure 2).

It is desirable to make measurements on the complete hysteresis loop, to eliminate drift errors in the flux integrator. However, since portion STUP of the loop is symmetrical with portion PQRS, measurements may be made for only one-half of the hysteresis loop.

3.6.6 Determination of remanent flux density

For a given hysteresis loop, the remanent flux density of the material is the value of the magnetic flux density, in teslas, when the magnetic field strength is zero. It shall be determined from the position of point Q on the hysteresis loop or the symmetrical point T.

3.6.7 Determination of coercive field strength

For a given hysteresis loop, the coercive field strength of the material is the value of the magnetic field strength, in amperes per metre, when the magnetic flux density is zero. It shall be determined from point R on the hysteresis loop or the symmetrical point U.

3.7 Uncertainty by the ring method

The total uncertainty in the measurement of the magnetic flux density or the magnetic field strength normally expected is less than or equal to, ± 2 % when using measuring instruments

whose estimated uncertainty is less than, or equal to, $\pm 1\%$ for measurements by the point by point method. Where a complete magnetization curve or hysteresis loop is determined by the continuous recording method, the overall uncertainty may be increased by the uncertainty and resolution of the recorder system or computer interface.

As the result of the measurements is affected by changes in temperature, precautions must be taken to avoid heating the test specimen (see 3.3).

4 Determination of the magnetic characteristics by the permeameter method

4.1 Object

Clause 4 describes the permeameter method for determining the normal magnetization curve and the hysteresis loop.

4.2 Principle of the permeameter

The principle of the instrument is illustrated in figures 3 and 4. The test specimen is clamped between two massive steel yokes which provide a flux closure path for the test specimen. The yokes are formed from either:

- a) two strip-wound C-cores of grain-oriented steel as specified in IEC 60404-8-7, or
- b) two strip-wound C-cores of nickel iron as specified in IEC 60404-8-6, or
- c) two stacks of laminations cut from electrical steel as specified in IEC 60404-8-2, IEC 60404-8-3, IEC 60404-8-4, IEC 60404-8-7 or IEC 60404-8-8, or
- d) two yokes machined from solid low carbon steel or soft iron.

For tests on round or square bars, pole pieces shall be fabricated from two pairs of low carbon steel or soft iron blocks, each pair being machined to accommodate the test specimen to provide as close a fit as possible (see figures 3c and 3d). The pole pieces should have a permeability sufficiently high to produce a low reluctance path for the magnetic flux passing between the test specimen and yokes.

Two types of permeameter are shown in figures 3 and 4 having the following properties:

<i>Type A:</i>	range of magnetic field strength:	1 kA/m to 200 kA/m;
	magnetizing coil:	on former around test specimen;
	minimum length of test specimen:	250 mm;
	<i>H</i> measuring systems:	search coil or Hall probe.
<i>Type B:</i>	range of magnetic field strength:	1 kA/m to 50 kA/m;
	magnetizing coil:	wound around yoke;
	minimum length of test specimen:	100 mm;
	<i>H</i> measuring system:	Rogowski-Chattock potentiometer.

The requirements of 3.3 shall also apply to the permeameter methods.

4.3 Test specimen

Unless otherwise specified in the product standards, the test specimen shall have a minimum length of 250 mm for the type A permeameter, or 100 mm for the type B permeameter, a minimum cross-sectional area of 10 mm² and a maximum cross-sectional area of 500 mm². It shall consist of either:

- a) a round, square, rectangular or hexagonal bar of uniform cross-section.

Where it is necessary to machine the test specimen to minimize the air gap between the sample and the pole pieces, the surface of the test specimen in contact with the pole pieces shall be turned or ground using sufficient coolant to prevent heating the material; or

- b) for material cut from sheet or coil, one strip of width 30 mm shall be cut parallel to the direction of rolling and one strip cut at right angles to the direction of rolling, and measured separately.

The cross-sectional area of the test specimen shall be determined from a number of measurements of each necessary dimension, equally spaced over the test length. The transverse dimensions shall be measured by means of a micrometer at approximately every 10 mm along the test length. The mean cross-sectional area shall be computed as the mean of the areas determined from these measurements with an uncertainty of $\pm 0,5$ %. The difference between the greatest and smallest of the cross-sectional areas shall not exceed 0,5 % of the mean area.

4.4 Methods of measurement by the permeameter method

4.4.1 Measurement of magnetic field strength

The magnetic field strength shall be measured with an uncertainty of ± 1 % or better by one of the following methods:

Type A permeameters:

- a) a search-coil of length between 10 mm and 50 mm (see figure 5c) connected to a magnetic flux integrator which shall be calibrated in accordance with one of the methods given in annex B.

The search-coil usually comprises two coils connected in series addition and mounted one coil on each of two opposite sides of the test specimen or two coils coaxial with the test specimen wound in series opposition. The coils shall be wound on non-magnetic, non-conducting formers. The effective area-turns product of the search-coil shall be determined with an uncertainty of $\pm 0,5$ % by one of the methods in annex A;

NOTE The number of turns on the search-coils depends upon the sensitivity of the flux integrator used, and also upon the range of magnetic field strength to be measured.

- b) a Hall effect device or other passive means of directly sensing a magnetic field having an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better. These devices can be calibrated either in a suitable solenoid of known field to current constant or in a uniform magnetic field using an appropriate nuclear magnetic resonance probe.

Type B permeameters:

- c) Using one of the methods described for type A permeameters, provided the variation of the magnetic field strength in the radial direction can be demonstrated to be insignificant, or
- d) a Rogowski-Chattock potentiometer (a C-shape H-potentiometer coil, see figure 5e) connected to a magnetic flux integrator.

The H-potentiometer coil shall comprise a continuously wound coil whose axis lies on a semicircle of 40 mm maximum diameter or a combination of discrete series connected coils with their axes arranged similarly but not so as to introduce significant discontinuities in the integration of the magnetic potential. The end faces of the coil system shall lie within 0,5 mm of the surface of the test specimen.

The effective area-turns product of the H-coils shall be determined with an uncertainty of $\pm 0,5$ % by one of the methods given in annex A.

Using one of the coil arrangements described in a) or d) above, the changes of the magnetic field strength shall be calculated from the relationship:

$$\Delta H = \frac{K_H \alpha_H}{\mu_0 (NA)} \quad (7)$$

where

ΔH is the change of magnetic field strength, in amperes per metre;

K_H is the calibration constant of the flux integrator (H), in volts seconds;

α_H is the reading of the flux integrator (H);

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

(NA) is the effective area turns product of the H-coil, in square metres.

For direct reading of the values, the flux integrator may be adjusted so that $K_H/[\mu_0(NA)]$ becomes a power of 10.

4.4.2 Measurement of magnetic flux density

The magnetic flux density shall be measured with an uncertainty of ± 1 % or better by one of the following methods:

- a) a flux-sensing coil (B-coil, see figure 5a), of length between 10 mm and 50 mm, shall be connected to a flux integrator. The calibration of the flux integrator shall be established by the method given in annex B.

Depending on the level of the magnetic field strength and the relative cross-sectional areas of the test specimen and flux-sensing coil, it may be necessary to make a correction to the magnetic flux density for the air flux enclosed by the flux-sensing coil.

The corrected value of the magnetic flux density is given by the following relationship:

$$B_{\text{corrected}} = B - \mu_0 H \frac{A_c - A}{A} \quad (8)$$

where

B is the measured value of magnetic flux density, in teslas;

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

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

A_c is the cross-sectional area of the flux-sensing coil, in square metres;

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

Alternatively, a compensating coil of effective area equivalent to that of the air section between the winding and the test specimen may be connected in series opposition with the flux-sensing coil.

The changes in magnetic flux density shall be calculated from the relationship:

$$\Delta B = \frac{K_B \alpha_B}{(N_2 A)} \quad (9)$$

where

ΔB is the change of the magnetic flux density, in teslas;

K_B is the calibration constant of the flux integrator (B), in volts seconds;

α_B is the reading of the flux integrator (B);

N_2 is the number of turns of the flux-sensing coil;

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

b) by measuring the magnetic polarization with an uncertainty of ± 1 % or better and calculating the magnetic flux density from this value and the magnetic field strength from the relationship:

$$B = \mu_0 H + J \quad (10)$$

where

B is the magnetic flux density, in teslas;

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

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

J is the measured magnetic polarization, in teslas.

The magnetic polarization, J , shall be measured by means of compensated polarization coils (J-coils, see annex C) connected to a flux integrator, calibrated by one of the methods given in annex B. A correction for air flux is not necessary.

The changes of the magnetic polarization shall be calculated from the relationship:

$$\Delta J = \frac{K_J \alpha_J}{(N_2 A)} \quad (11)$$

where

ΔJ is the change of the magnetic polarization, in teslas;

K_J is the calibration constant of the flux integrator (J), in volt seconds;

α_J is the reading of flux integrator (J);

N_2 is the number of turns on the polarization sensing coil;

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

For direct reading of the values, the flux integrator can be adjusted so that $K_J/(N_2 A)$ becomes a power of 10.

4.4.3 Connection of apparatus

The apparatus is connected as shown in figure 6.

A source of direct current, E , (stabilized d.c. supply with a ripple content of less than 0,1 % or a battery) is connected through reversing switch S_1 to the magnetizing winding N_1 . If a bipolar current source is used, reversing switch S_1 is not required. With switch S_2 closed, the current in the magnetizing circuit is controlled by resistor R_1 .

If a stabilized power supply is used with adequate control of the output current, resistor R_1 is not required. This is the arrangement for the measurement of the normal magnetization curve and hysteresis loops by the continuous recording method. For the point-by-point method, switch S_2 and resistor R_2 are required to determine the hysteresis loop. The secondary circuit comprises a search-coil wound around the test specimen and connected to a flux integrator.

4.4.4 Determination of the normal magnetization curve

The test specimen shall be demagnetized in accordance with 3.6.4.

The magnetic flux integrator for the measurement of the magnetic field strength and the magnetic flux density or polarization shall be calibrated in accordance with annex B. The normal magnetization curve shall then be determined by one of the following methods.

Method A: continuous recording method

To utilize this method, the output from the magnetic flux integrator connected to the magnetic field strength measuring coils system shall be connected to the X input of an X-Y recorder, plotter or computer interface and the output from the magnetic flux integrator measuring the magnetic flux density or polarization shall be connected to the Y input of the X-Y recorder, plotter or computer interface. The system shall be calibrated overall to give direct readings of magnetic field strength and magnetic flux density.

The magnetizing current shall then be increased from zero to the value required to produce the maximum magnetic field strength. The magnetization curve will then be produced on the X-Y recorder, plotter or computer interface.

Method B: point-by-point method

A small current shall be passed through the magnetizing winding N_1 and shall be reversed about 10 times by means of reversing switch S_1 to bring the material into a steady cyclic state. Switches S_3 and S_4 shall be closed during this operation to maintain the flux integrator at zero. With switches S_3 and S_4 open, the flux integrator readings shall be recorded for corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux-density or polarization.

By successively increasing the magnetizing current and repeating this procedure the normal magnetization curve can be plotted.

The magnetizing current shall never be decreased during the measurements, otherwise the test specimen shall be demagnetized before resuming measurements.

4.4.5 Determination of a complete hysteresis loop

The test specimen shall be demagnetized in accordance with 3.6.4 and the hysteresis loop shall be determined by one of the following methods.

Method A: continuous recording method

The additional equipment specified in method A of 4.4.4 is required. The flux integrator shall be zeroed and then a current of value sufficient to produce the maximum magnetic field strength required shall be passed through the magnetizing winding N_1 . This current shall slowly be reduced to zero, reversed, increased to its maximum negative value, reduced to zero, reversed again and increased to its maximum positive value. The cycle should be completed in a time between 30 s and 60 s (although some materials, e.g. pure iron, may require longer) in order to allow time for the magnetization of the test specimen to follow the applied magnetic field, and yet avoid significant drift of the sensing device zero with time.

Method B: point-by-point method

A current sufficient to produce the maximum magnetic field strength required shall be passed through the magnetizing winding N_1 . The tip points of the hysteresis loops shall be determined by measuring the corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density or polarization in accordance with method B of 4.4.4.

Portion PQ of the hysteresis loop (see figure 2) is then determined with switch S_1 closed in position 1 by opening switch S_2 and measuring the corresponding magnetic field strength and change in magnetic flux density or polarization. By adjusting resistor R_2 a number of points on curve PQ can be obtained by successive measurements. The point Q is obtained with switch S_2 closed, and by measuring the change in magnetic flux density or polarization when opening switch S_1 .

To obtain the complete hysteresis loop, the switching sequence shall be in accordance with table 1 in 3.6.5.

Resistors R_1 and R_2 respectively are adjusted to obtain:

- resistor R_1 : values of magnetic field strength $+H$ or $-H$, that is point P or point S on the loop (figure 2).
- resistor R_2 : values of magnetic field strength $+H'$ or $-H'$, that is points P' and T' or Q' and S' on the loop (figure 2).

It is desirable to make measurements on the complete hysteresis loop, to eliminate drift errors in the flux integrator. However, since portion STUP of the loop is symmetrical with portion PQRS, measurements may be made for only one-half of the hysteresis loop.

4.4.6 Determination of remanent flux density

For a given hysteresis loop, the remanent flux density of the material is the value of the magnetic flux density, in teslas, when the magnetic field strength is zero. It shall be determined from the position of point Q on the hysteresis loop or the symmetrical point T.

4.4.7 Determination of coercive field strength

For a given hysteresis loop, the coercive field strength of the material is the value of the magnetic field strength, in amperes per metre, when the magnetic flux density is zero. It shall be determined from the position of point R on the hysteresis loop or the symmetrical point U.

4.5 Uncertainty by the permeameter method

The total uncertainty in the measurement of the magnetic flux density or the magnetic field strength normally expected for the different methods is less than or equal to $\pm 3\%$ when using measuring instruments whose estimated uncertainty is less than or equal to $\pm 1\%$ for the measurement of individual points. Where a complete magnetization curve or hysteresis loop is determined by the continuous recording method, the overall uncertainty may be increased by the uncertainty and resolution of the recorder system.

As the result of the measurements is affected by changes in temperature, precautions shall be taken to avoid heating the test specimen (see 3.3).

NOTE The ultimate uncertainty of the test equipment is a complex function dependent upon measuring instruments and other characteristics of measuring conditions and equipment. It is therefore not always possible to state the absolute accuracy that is attainable. Shape parameters, end effects, corner effects, variations in path length and cross-section, as well as hysteresis characteristics of the yokes can cause substantially different test results to be obtained when specimens from the same batch of material are prepared and tested in different permeameters. The best use of any apparatus is where these error factors can be limited to tolerable values. Usually that occurs where coercivity is reasonably large (> 1 kA/m) or at inductions above those corresponding to maximum permeability in the test specimen.

5 Test report

The test report shall include as applicable:

- type and identification mark of material;
- shape and dimensions of the test specimen;
- method and/or type of permeameter;
- type of H and B or J sensor;
- in the case of results obtained parallel and perpendicular to the rolling direction, the mean of the values of the magnetic flux density or polarization for the same specified values of magnetic field strength;
- ambient temperature during the measurement;
- temperature of the test specimen during the measurement;
- estimated uncertainty of the measurements.

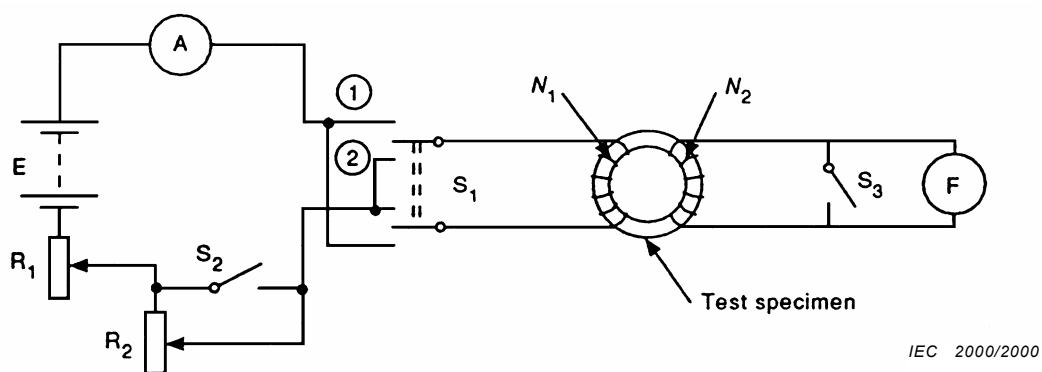


Figure 1 – Circuit for the determination of the magnetic characteristics by the ring method

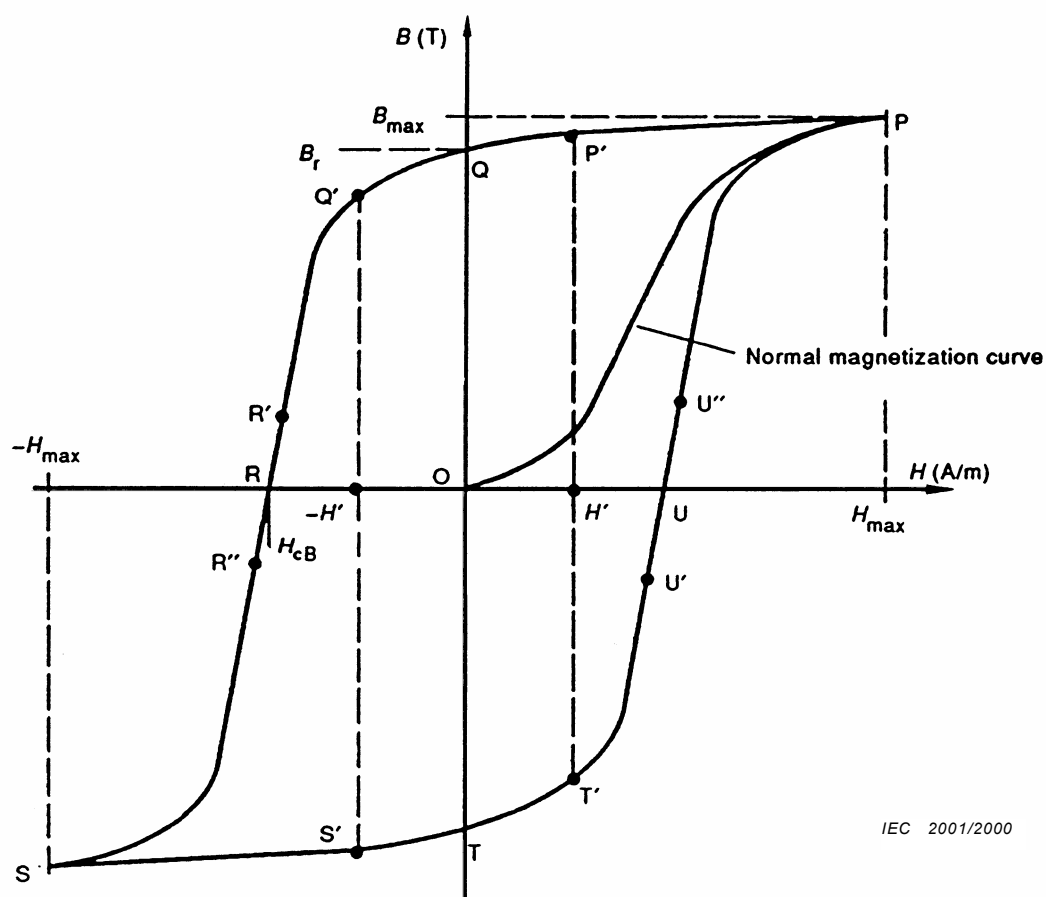
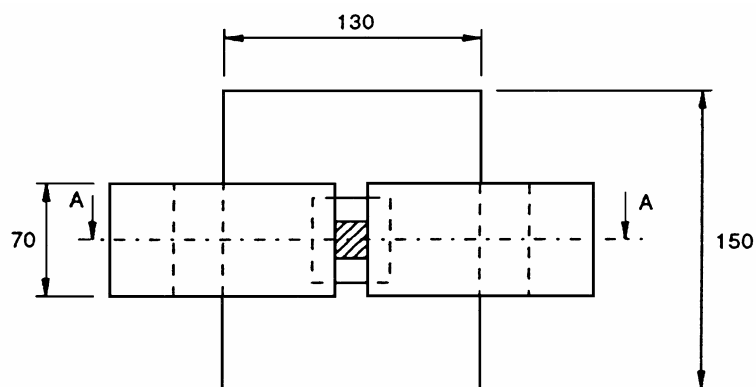
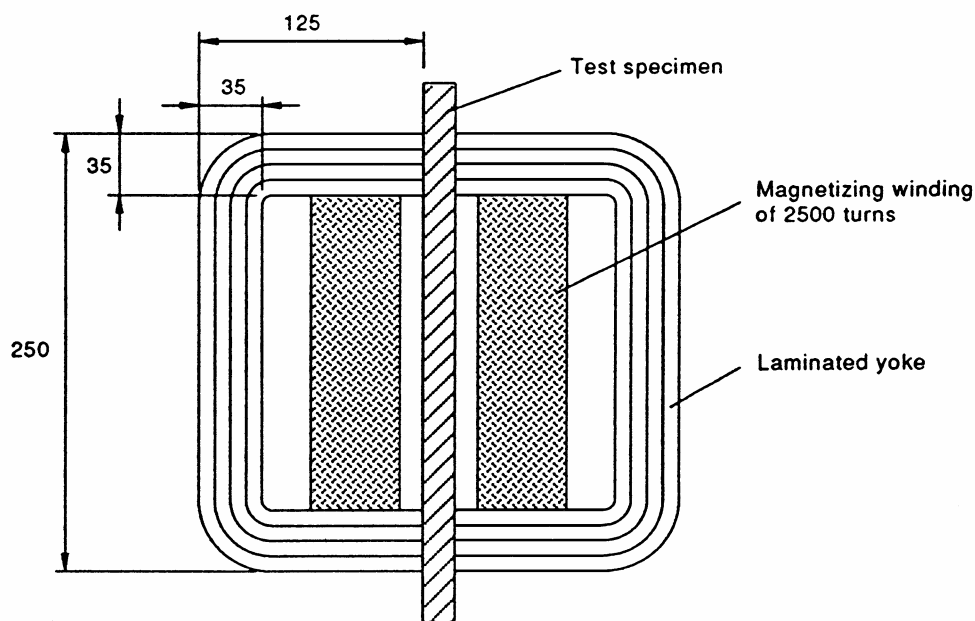


Figure 2 – Hysteresis loop



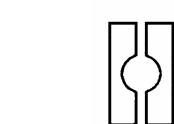
IEC 2002/2000

Figure 3a – Side elevation



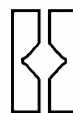
IEC 2003/2000

Figure 3b – Section A-A of the permeameter



IEC 2004/2000

Diagram of pole pieces



IEC 2005/2000

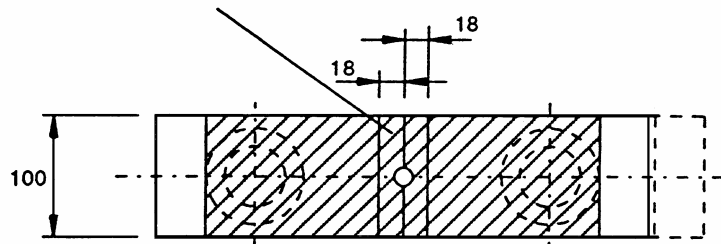
Dimensions in millimetres

Figure 3c

Figure 3d

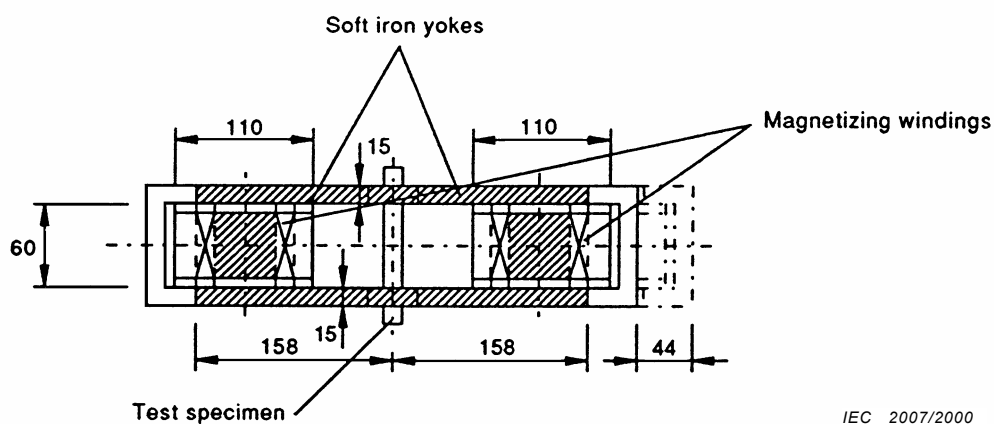
Figure 3 – Typical arrangement of a type A permeameter

Pole pieces for samples of round cross-section (example)



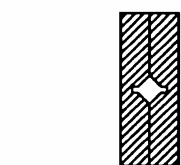
IEC 2006/2000

Figure 4a – Side elevation



IEC 2007/2000

Figure 4b – Plan view



Pole pieces for sample of square cross-section (example)



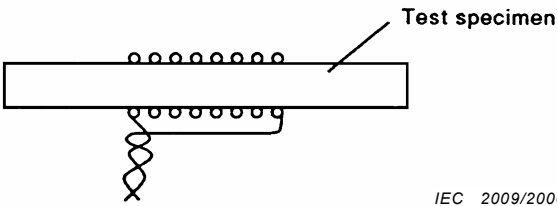
Pole pieces for strip samples

IEC 2008/2000

Figure 4c – Alternative pole pieces

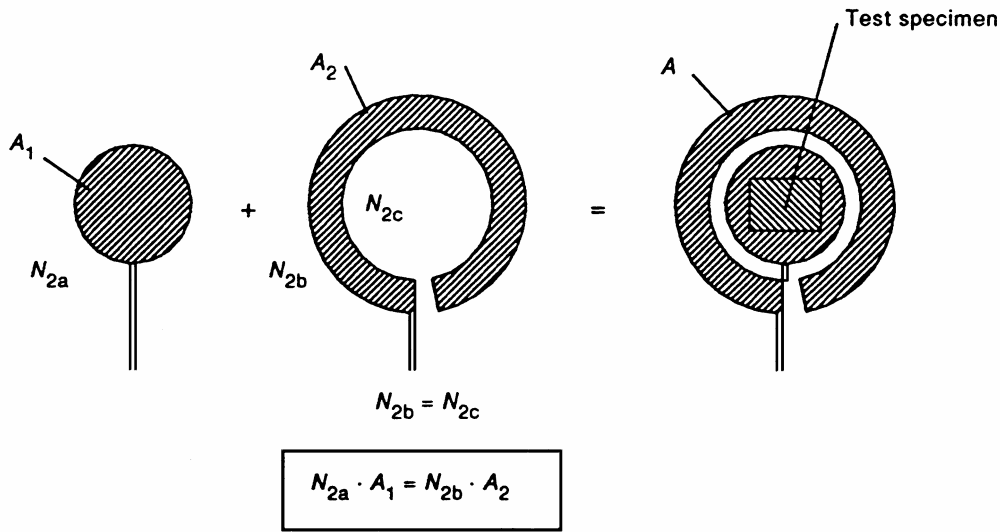
Dimensions in millimetres

Figure 4 – Typical arrangement of a type B permeameter



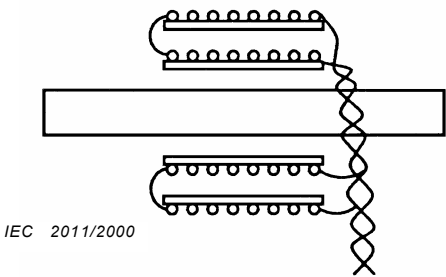
IEC 2009/2000

Figure 5a – Flux-sensing coil (B-coil), wound around the test specimen

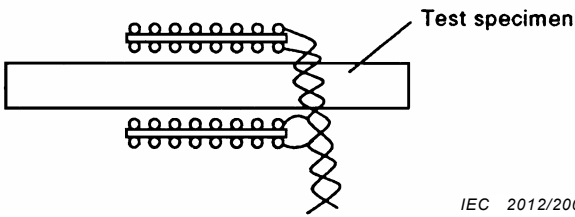


IEC 2010/2000

Figure 5b – Principle of the compensated J-sensing coil



IEC 2011/2000



IEC 2012/2000

Figure 5c – Field-sensing coils (H-coils), concentric type – outer and inner coils connected in series opposition

Figure 5d – Field-sensing coils (H-coils), flat type – two coils connected in series addition

Dimensions in millimetres

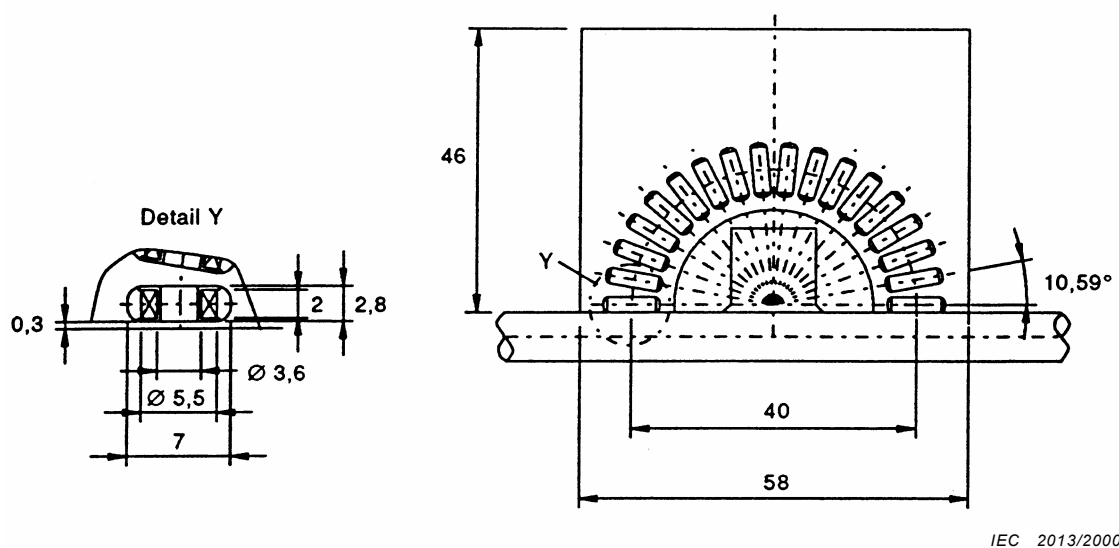


Figure 5e – Rogowski-Chattock potentiometer discrete coil system
for H measurement

Figure 5 – Arrangement of search coils

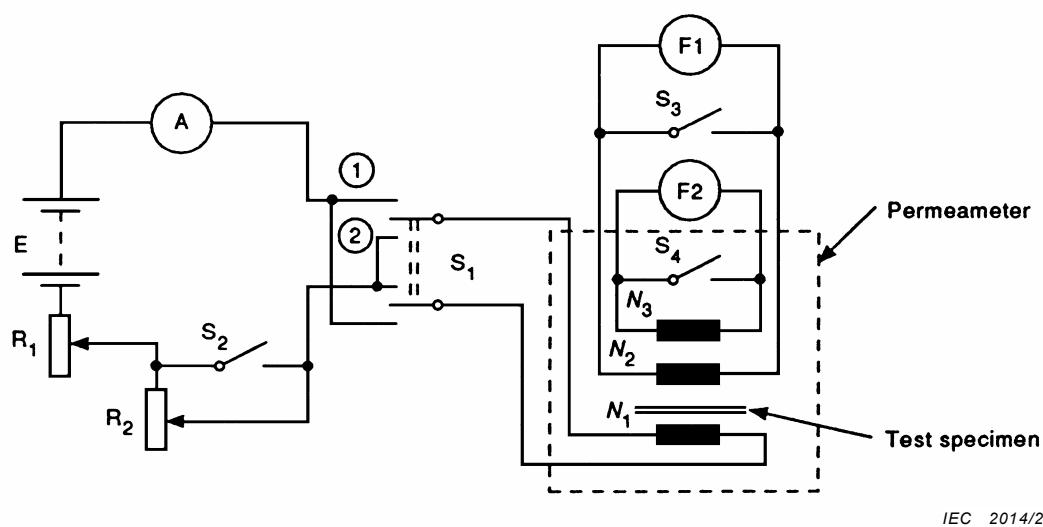


Figure 6 – Circuit for the determination of the normal magnetization curve and
hysteresis loop of bar specimens using a double yoke permeameter

Annex A (normative)

Calibration of search coils

The calibration of search-coils shall be established by one of the following means.

- a) The search-coil can be submitted to a mutually approved standards laboratory for calibration.
- b) The effective area-turns product of a search-coil can be determined by comparing it with a standard search-coil using the circuit shown in figure A.1.

A supply of frequency of the order of 20 Hz, at which capacitive currents in the various circuit elements are low, is derived from an oscillator and a power amplifier. The search coil and secondary winding of the mutual inductor are connected in series opposition and the mutual inductance varied until the detector indicates balance. A high gain frequency selective amplifier together with a cathode ray oscilloscope can be used as the detector.

A standard search-coil, the effective area-turns product of which is known to an accuracy of $\pm 0,2$ % from metrological measurements, is placed in the centre of a coil system which provides a uniform field over the volume of the search-coil being tested. The variable mutual inductor, M , is adjusted to give balance.

By substituting the standard search-coil for one of unknown value and re-balancing the circuit, the effective area-turns product of the second coil can be determined from the two mutual inductor readings according to the following relationship:

$$(NA) = \frac{M_t (NA)_s}{M_s} \quad (A1)$$

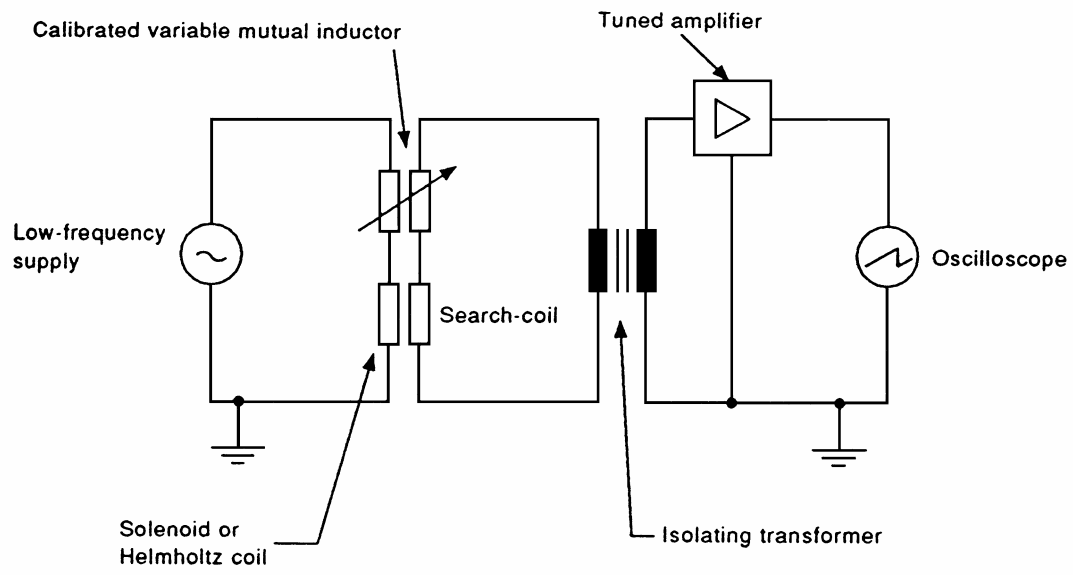
where

(NA) is the effective area-turns product of the unknown coil, in square metres;

$(NA)_s$ is the effective area-turns product of the standard coil, in square metres;

M_t is the mutual inductor reading for the bridge balance, using the unknown coil, in henrys;

M_s is the mutual inductor reading for the bridge balance using the standard coil, in henrys.



IEC 2015/2000

Figure A.1 – Circuit for the calibration of search-coils

Annex B (informative)

Methods of calibrating the flux integrator

One of the following four methods of calibrating the flux integrator is normally used:

- changing a current in a calibrated mutual inductor;
- discharging a calibrated capacitor;
- using a reference magnet in conjunction with a calibrated search-coil;
- a volts seconds source traceable to the fundamental units of voltage and time.

B.1 Mutual inductance method

The primary winding of a mutual inductor of known value is connected in place of the primary winding of the ring core or the magnetizing winding of the permeameter. The secondary winding of the mutual inductor is connected in series with:

- the secondary winding of the ring or the B coil when measuring the magnetic flux density;
- the H coil when measuring the magnetic field strength.

To calibrate, a suitable change, ΔI , is made in the value of the current passing through the primary winding of the inductor, and the flux integrator reading α_c is recorded.

The calibration constant of the flux integrator shall be calculated from the relationship:

$$K = \frac{M \Delta I}{\alpha_c} \quad (B1)$$

where

K is the calibration constant of the flux integrator, in volts seconds;

M is the mutual inductance, in henrys;

ΔI is the change in primary current, in amperes;

α_c is the reading of the flux integrator.

For the subsequent measurements of the magnetic flux density and the magnetic field strength, the secondary winding of the mutual inductor shall be short-circuited.

If a resistor in series with the integrator is used, this resistor shall be adjusted. If no series resistor is used, a correction shall be applied to the flux integrator calibration constant according to the following relationship:

$$K_{\text{corr}} = K = \frac{R_F + R}{R_F + R + R_M} \quad (B2)$$

where

R_F is the input resistance of the flux integrator, in ohms;

R is the internal resistance of the sensing coil, in ohms;

R_M is the resistance of the secondary winding of the mutual inductor, in ohms.

B.2 Capacitor discharge method

The flux integrator shall be connected in accordance with the circuit of figure B.1 comprising:

- a voltmeter of high precision, V ;
- a calibrated capacitor of value C ;
- a shunt resistor of value S ;
- a control resistor of value r ;
- a search-coil of resistance R ;
- a two-position change-over switch (a = charge, b = discharge);
- a battery E ;
- a flux integrator of internal resistance R_F .

The calibration of the flux integrator is carried out as follows.

- 1) Measure the voltage U to which the calibrated capacitor C is charged by means of a calibrated voltmeter, the change-over switch being in position a .
- 2) The switch is changed to position b , causing the capacitor to discharge. A quantity of electricity $Q = CU$ flows through the entire circuit. Only the quantity

$$q = Q \frac{S}{R + r + S + R_F} \quad (B3)$$

flows through the flux integrator, producing a deflection α .

- 3) The charge sensitivity is given by:

$$\sigma_q = \frac{q}{\alpha} = \frac{Q}{\alpha} \cdot \frac{S}{R + r + S + R_F} \quad (B4)$$

- 4) A variation of the magnetic flux $\Delta\phi$ in one turn of the search-coil causes the circulation of a charge Δq :

$$\Delta q = \frac{\Delta\phi}{\text{résistance of circuit}} = \frac{\Delta\phi}{R + r + S + R_F} \quad (B5)$$

From this statement the relationship between the flux integrator calibration constant, K , and the charge sensitivity may be deduced as:

$$K = \sigma_q (R + r + S + R_F) \quad (B6)$$

- 5) The flux integrator calibration constant, K , is given by:

$$K = \frac{Q}{\alpha} \cdot \frac{S(R + r + S + R_F)}{R + r + S + R_F} = \frac{QS}{\alpha} = \frac{CUS}{\alpha} \quad (B7)$$

where

- K is the calibration constant of the flux integrator, in volts seconds;
- C is the capacitance, in farads;
- U is the potential difference across capacitor, in volts;
- S is the shunt resistance, in ohms;
- α is the flux integrator reading.

B.3 Reference magnet method

A reference magnet, preferably of AlNiCo permanent magnet material, is first calibrated using a magnetic resonance probe.

A calibrated search-coil is connected to the input of the flux integrator. The coil is introduced into the region of homogeneous magnetic flux density in the reference magnet and the flux integrator reading recorded.

The calibration constant K of the flux integrator can be calculated from:

$$K = \frac{B (NA)}{\alpha} \quad (B8)$$

where

K is the calibration constant of the flux integrator, in volts seconds;

B is the magnetic flux density in the gap of the reference magnet in teslas;

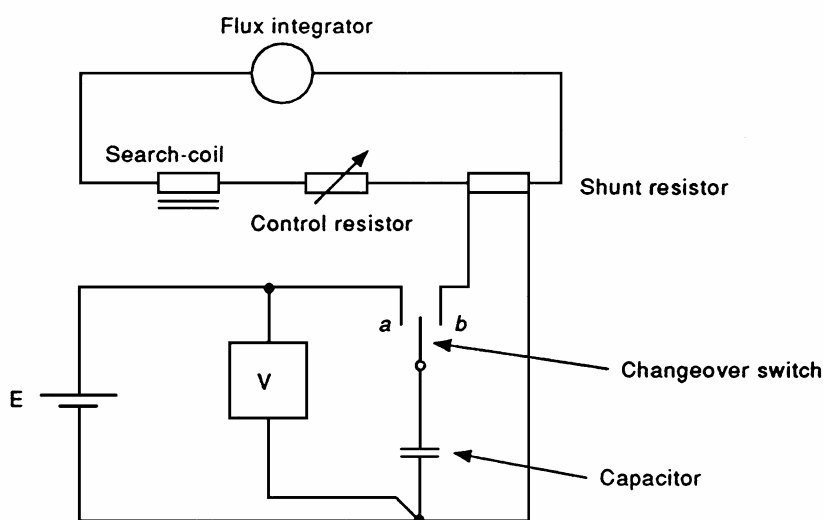
α is the flux integrator reading;

(NA) is the effective area of search-coil, in square metres.

NOTE The effective area of the search-coil can be determined either by comparison with a standard search-coil in accordance with annex A, or, provided it is fabricated with high precision, from its dimensions and number of turns.

B.4 A volts seconds source

The flux integrator shall be connected to a volts seconds source which shall be traceable to the fundamental units of voltage and time.



IEC 2016/2000

Figure B.1 – Circuit for calibration the flux integrator by the capacitor discharge method

Annex C (informative)

Requirements for the J-compensated coil system

The J-compensated coil system can be made from a combination of three concentric coils (see figure 5b). A flux-sensing coil with N_{2a} turns is connected in series opposition with a pair of coils each with N_{2b} turns which are themselves connected in series opposition. This pair of coils serves to compensate for the air flux in the flux-sensing coil. The area, A_2 , between the two air flux compensating coils is chosen in accordance with the following relationship:

$$N_{2a} A_1 = N_{2b} A_2 \quad (C1)$$

where

A_1 is the cross-sectional area of the flux-sensing coil, in square metres.

In practice, it may not be possible to choose N_{2b} and A_2 so that the above equation holds exactly. In this case the product $N_{2b} A_2$ should be chosen to be slightly greater than $N_{2a} A_1$. By the addition of a resistance in parallel to the air flux compensation coils, their sensitivity can be reduced to be the same as that of the flux-sensing coil. With no test specimen present, the complete coil system should give no output when withdrawn from a uniform magnetic field or for a change in the surrounding magnetic field strength.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	34
1 Domaine d'application et objet	36
2 Références normatives	36
3 Détermination des caractéristiques magnétiques par la méthode du tore	37
3.1 Objet	37
3.2 Généralités.....	37
3.3 Influence de la température sur les mesures	37
3.4 Epreuve.....	37
3.5 Enroulements	38
3.6 Méthodes de mesure par la méthode du tore	39
3.6.1 Intensité du champ magnétique d'excitation.....	39
3.6.2 Induction magnétique	39
3.6.3 Branchement des appareils	39
3.6.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale.....	40
3.6.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet	40
3.6.6 Détermination de l'induction rémanente	42
3.6.7 Détermination du champ coercitif.....	42
3.7 Incertitude par la méthode du tore	42
4 Détermination des caractéristiques magnétiques par la méthode du perméamètre	43
4.1 Objet	43
4.2 Principe du perméamètre	43
4.3 Epreuve.....	43
4.4 Méthodes de mesure par la méthode du perméamètre	44
4.4.1 Mesure de l'intensité du champ magnétique d'excitation	44
4.4.2 Mesure de l'induction magnétique.....	45
4.4.3 Branchement des appareils	46
4.4.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale.....	46
4.4.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet	47
4.4.6 Détermination de l'induction rémanente	48
4.4.7 Détermination du champ coercitif.....	48
4.5 Incertitude par la méthode du perméamètre	48
5 Procès-verbal d'essai.....	49
 Annex A (normative) Etalonnage des bobines de mesures	 55
Annex B (informative) Méthodes d'étalonnage de l'intégrateur de flux.....	57
Annex C (informative) Conditions à remplir par un système de bobines compensées pour la mesure de J	60

Figure 1 – Circuit pour la détermination des caractéristiques magnétiques par la méthode du tore	50
Figure 2 – Cycle d'hystérésis	50
Figure 3 – Configuration typique d'un perméamètre de type A	51
Figure 4 – Configuration typique d'un perméamètre de type B	52
Figure 5 – Configuration des bobines de mesure	54
Figure 6 – Circuit pour la détermination de la courbe d'aimantation normale et du cycle d'hystérésis à l'aide d'un perméamètre à double culasse (échantillon en barreau)	54
Figure A.1 – Circuit pour l'étalonnage des bobines de mesure	56
Figure B.1 – Circuit d'étalonnage de l'intégrateur de flux par la méthode de la décharge d'un condensateur étalon.....	59
Tableau 1 – Séquence des commutations nécessaires au maintien de l'éprouvette dans un état cyclique stable.....	42

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60404-4 a été établie par le comité d'études 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

La présente version consolidée de la CEI 60404-4 comprend la deuxième édition (1995) [documents 68(BC)95 et 68/117/RVD], son amendement 1 (2000) [documents 68/215/FDIS et 68/217/RVD] et son amendement 2 (2008) [documents 68/363/CDV et 68/375/RVC].

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

Elle porte le numéro d'édition 2.2.

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

L'annexe A fait partie intégrante de cette norme.

Les annexes B et C sont données uniquement à titre d'information.

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

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

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux

1 Domaine d'application et objet

Cette partie de la CEI 60404 traite des méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement doux, en circuit magnétique fermé, en utilisant la méthode du tore ou celle du perméamètre. L'utilisation de la méthode du tore est adaptée pour les éprouvettes constituées d'un tore monobloc ou formé de feuilles, de même que pour les éprouvettes constituées d'un tore obtenues par frittage.

Deux méthodes sont utilisées:

- a) la méthode du tore, en particulier pour des intensités de champ d'excitation magnétique pouvant aller jusqu'à 10 kA/m;
- b) la méthode du perméamètre pour des intensités de champ d'excitation magnétique allant de 1 kA/m à 200 kA/m.

NOTE La mesure de la coercitivité en circuit magnétique ouvert fait l'objet de la CEI 60404-7.

2 Références normatives

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

CEI 60404-7:1982, *Matériaux magnétiques – Septième partie: Méthode de mesure du champ coercitif des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert*

CEI 60404-8-2:1985, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section deux: Spécification des bandes magnétiques en acier allié, laminées à froid et livrées à l'état semi-fini*

CEI 60404-8-3:1985, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section trois: Spécification des bandes magnétiques en acier non allié, laminées à froid et livrées à l'état semi-fini*

CEI 60404-8-4:1986, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section quatre: Spécification des tôles magnétiques en acier à grains non orientés, laminées à froid*

CEI 60404-8-6:1986, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section six: Matériaux métalliques magnétiquement doux*
Amendement 1 (1992)

CEI 60404-8-7:1988, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section sept: Spécification des tôles magnétiques en acier à grains orientés*
Amendement 1 (1991)

CEI 60404-8-8:1991, *Matériaux magnétiques – Partie 8: Spécifications pour matériaux particuliers – Section 8: Spécification des tôles magnétiques extra-minces en acier pour utilisation à moyennes fréquences*

3 Détermination des caractéristiques magnétiques par la méthode du tore

3.1 Objet

Cet article décrit la méthode du tore utilisée pour déterminer la courbe d'aimantation normale et le cycle d'hystérésis.

3.2 Généralités

Cette méthode est utilisée en particulier pour les intensités du champ magnétique d'excitation jusqu'à 10 kA/m. Toutefois, à condition de prendre des précautions pour éviter d'échauffer l'éprouvette, cette méthode reste valable pour des champs magnétiques plus intenses.

3.3 Influence de la température sur les mesures

Des précautions doivent être prises pour éviter tout échauffement excessif de l'éprouvette. Les mesures doivent être faites à une température ambiante de $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$. La température de l'éprouvette ne doit pas dépasser 50°C . Elle doit être contrôlée par une sonde de température.

Pour des matériaux qui sont particulièrement sensibles à la température, les normes de produits peuvent définir des températures limites de l'éprouvette plus hautes ou plus basses.

3.4 Eprouvette

L'éprouvette est constituée par un tore homogène, sans soudure, de section rectangulaire ou circulaire. L'aire de la section du tore est déterminée par les dimensions du produit, l'uniformité de ses propriétés magnétiques, la sensibilité des instruments de mesure, et l'espace requis pour les enroulements. Généralement, l'aire de la section est de l'ordre de 10 mm^2 à 200 mm^2 .

Des précautions doivent être prises dans la préparation de l'éprouvette pour éviter un écrouissage ou un échauffement du matériau qui pourraient en altérer les caractéristiques magnétiques. L'éprouvette peut être usinée par tournage, suivi d'une légère rectification, avec assez de liquide de refroidissement pour prévenir tout échauffement du matériau. Les bords des tores doivent être ébavurés.

Pour réduire l'effet de la variation radiale du champ magnétique d'excitation, le tore doit avoir des dimensions telles que le rapport du diamètre extérieur sur le diamètre intérieur ne doit pas être supérieur à 1,4 et de préférence inférieur à 1,25. Si le rapport approche la valeur 1,4, la variation radiale dans le champ magnétique d'excitation sera plus importante.

Pour un noyau sous forme de tôles empilées ou de tore enroulé, l'aire de la section de l'éprouvette doit être calculée à partir de la masse, de la masse volumique et de la valeur du diamètre intérieur et extérieur du tore. La masse volumique peut être la masse volumique conventionnelle pour le matériau fourni par le fabricant. L'aire de la section doit être calculée d'après la relation suivante:

$$A = \frac{2m}{\rho \pi (D + d)} \quad (1)$$

où

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

D est le diamètre extérieur de l'éprouvette, en mètres;

d est le diamètre intérieur de l'éprouvette, en mètres;

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

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

Les dimensions de l'éprouvette doivent être déterminées par la mesure des diamètres extérieur et intérieur du tore, ainsi que sa hauteur ou son diamètre, à l'aide d'un micromètre ou d'une jauge à vernier appropriés. L'aire de la section moyenne doit être calculée avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou meilleure.

La longueur moyenne du circuit magnétique de l'éprouvette doit être également calculée avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou meilleure à partir de la relation:

$$l = \pi \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

où

l est la longueur moyenne du circuit magnétique de l'éprouvette, en mètres.

3.5 Enroulements

Avant réalisation des bobinages, une liaison électrique avec l'éprouvette doit être mise en place afin de vérifier ultérieurement l'isolation des enroulements, une sonde thermique doit être fixée à l'éprouvette, et ensuite une couche mince d'isolant doit être déposée sur le tore.

En premier lieu, un enroulement secondaire constitué d'un fil de cuivre isolé doit être bobiné régulièrement tout au long de l'anneau. On doit déterminer les dimensions, et calculer la section moyenne, A_c , de cet enroulement secondaire.

Un enroulement d'excitation constitué par un fil de section suffisante pour supporter le courant maximal d'excitation doit être ensuite bobiné régulièrement sur l'anneau, en une ou plusieurs couches, avec un nombre de spires suffisant pour permettre d'appliquer l'intensité spécifiée du champ magnétique d'excitation. L'enroulement d'excitation peut comporter:

- a) un grand nombre de spires d'un fil unique, disposées au plus près et réparties uniformément tout au long du tore, ou
- b) un nombre de spires plus réduit, d'un câble multifils, ces spires étant disposées au plus près et réparties uniformément tout au long du tore et les extrémités de chaque fil étant reliées entre elles de façon à produire l'effet d'un enroulement multicouches, ou
- c) un système de conducteurs rigides, ou un système constitué de conducteurs en partie rigides et en partie flexibles, qui peut être ouvert pour permettre la mise en place du tore (comportant l'enroulement secondaire et l'isolation) et refermé ensuite pour constituer un enroulement torique régulièrement réparti.

Si nécessaire, le tore bobiné est immergé dans un bain d'huile ou soumis à un courant d'air pour assurer son refroidissement.

NOTE Quand on utilise les dispositifs décrits ci-dessus avec un enroulement secondaire uniformément réparti, une erreur peut être présente dans tout essai sur tore, erreur susceptible d'être amplifiée et de prendre une importance considérable. Cette erreur provient du fait qu'en bobinant sur un anneau une couche toroïdale, on ajoute en fait une spire circulaire effective de diamètre égal au diamètre moyen du tore.

Le flux d'induction mutuelle entre ces spires circulaires effectives qui appartiennent à l'enroulement d'excitation et à l'enroulement secondaire, et qui circule parallèlement à l'axe du tore, s'ajoute ou se retranche au flux circonférenciel principal. Quand un câble multiconducteur est utilisé pour l'enroulement d'excitation, le nombre de spires effectives dans le primaire de l'inductance mutuelle supplémentaire est augmenté proportionnellement au nombre de conducteurs, et l'erreur qui en résulte peut atteindre plusieurs pour cent, en particulier dans les champs intenses où la perméabilité de l'éprouvette est réduite. Pour éliminer cette erreur, il convient d'ajouter une spire appartenant à l'enroulement secondaire en retour le long de la circonférence moyenne du tore, ou, mieux, il convient que le câble d'excitation soit réparti en un nombre pair de couches alternativement enroulées en tournant sur l'anneau dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire.

3.6 Méthodes de mesure par la méthode du tore

3.6.1 Intensité du champ magnétique d'excitation

L'intensité du courant d'excitation doit être mesurée avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou meilleure. L'intensité du champ magnétique d'excitation doit être calculée à partir de la relation suivante:

$$H = \frac{N_1 I}{l} \quad (3)$$

où

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

N_1 est le nombre de spires de l'enroulement d'excitation du tore;

l est la longueur moyenne du circuit magnétique, en mètres;

I est l'intensité du courant d'excitation, en ampères.

3.6.2 Induction magnétique

L'enroulement secondaire N_2 (bobine B) doit être relié à un intégrateur de flux (intégrateur électronique, galvanomètre balistique ou fluxmètre) étalonné en suivant l'une des procédures définies à l'annexe B avec une incertitude de ± 1 % ou meilleure.

Les variations de l'induction magnétique doivent être calculées à partir de la relation suivante:

$$\Delta B = \frac{K_b \alpha_b}{N_2 A} \quad (4)$$

où

ΔB est la variation mesurée de l'induction magnétique, en teslas;

K_B est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux, en volts secondes;

α_B est l'indication de l'intégrateur de flux;

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

A est la section du tore, en mètres carrés.

Pour obtenir ΔB en lecture directe, l'intégrateur de flux peut être réglé de telle façon que $K_B/(N_2 A)$ soit une puissance de 10.

A condition que l'enroulement secondaire soit bobiné étroitement sur l'éprouvette, le flux d'induction dans l'air que le bobinage secondaire prend en compte sera négligeable dans la gamme des champs d'excitation allant de 0 à 4 kA/m et aucune correction n'apparaît nécessaire. Pour des champs d'excitation plus importants, une correction de flux dans l'air doit être effectuée selon l'équation (8).

3.6.3 Branchement des appareils

Les appareils sont branchés comme indiqué à la figure 1.

Une source de courant continu E (une alimentation continue stabilisée avec une dérive inférieure à 0,1 %, ou une batterie) est reliée à l'enroulement d'excitation N_1 du tore, à travers un dispositif de mesure du courant A, et un interrupteur-inverseur S_1 . Si on utilise une source de courant bipolaire, l'interrupteur-inverseur S_1 n'est pas nécessaire. Quand l'interrupteur S_2 est fermé, le courant dans le circuit d'excitation est contrôlé par la résistance R_1 . Si on utilise une alimentation stabilisée avec un niveau de sortie continuellement réglable, la résistance R_1 n'est pas nécessaire. Ce schéma du circuit d'excitation est celui qu'on utilise pour déterminer la courbe d'aimantation normale et les pointes du cycle d'hystérésis. L'interrupteur S_2 , et conjointement la résistance R_2 sont nécessaires dans certains cas pour déterminer le

cycle d'hystérésis complet. Le circuit secondaire comprend l'enroulement secondaire N_2 (bobine B) relié à l'intégrateur de flux.

3.6.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale

L'éprouvette doit être soigneusement désaimantée à partir d'un champ d'excitation d'au moins 5 kA/m par une série de renversements successifs du champ magnétique d'excitation, d'intensités régulièrement décroissantes. Les éprouvettes qui ont été soumises à un champ plus intense doivent être désaimantées avant l'essai à partir d'un champ suffisant (par exemple si elles ont été usinées en utilisant un plateau magnétique).

NOTE Afin que le champ magnétique d'excitation pénètre complètement l'éprouvette, il convient que le temps de maintien du courant après chaque inversion soit supérieur à 2 s pour une section de 10 mm × 10 mm et 10 s pour une section de 20 mm × 20 mm.

L'intégrateur de flux doit être étalonné conformément à l'une des méthodes décrites à l'annexe B. L'interrupteur S_2 étant fermé, la courbe d'aimantation normale doit être déterminée par l'une des méthodes suivantes.

Méthode A: méthode d'enregistrement continu

Pour utiliser cette méthode, la sortie de l'intégrateur de flux doit être branchée aux bornes Y d'un enregistreur X-Y de type continu, ou point par point, ou d'une interface d'ordinateur. Une résistance étalonnée de faible valeur (par exemple 0,1 Ω ou 1 Ω) avec deux bornes d'amenée de courant et deux bornes de prise de potentiel doit être branchée en série avec l'enroulement d'excitation. Les bornes de prise de potentiel doivent être raccordées à l'entrée X de l'enregistreur de type continu, point par point, ou l'interface d'ordinateur. Le montage doit être étalonné globalement pour fournir en lecture directe les valeurs enregistrées de l'induction magnétique et du champ d'excitation.

Le courant d'excitation doit être progressivement augmenté depuis zéro jusqu'à la valeur nécessaire à l'obtention du champ magnétique d'excitation maximal. L'enregistreur X-Y de type continu, ou point par point, ou l'interface d'ordinateur fournit alors la courbe d'aimantation de l'éprouvette.

Méthode B: méthode point par point

Un courant faible, correspondant à une faible intensité du champ magnétique d'excitation (voir équation 3) doit parcourir l'enroulement d'excitation N_1 . Ce courant doit être inversé environ 10 fois au moyen de l'inverseur S_1 de façon à stabiliser le cycle du matériau. L'interrupteur S_3 doit être fermé pendant cette opération pour maintenir l'intégrateur de flux au repos. L'interrupteur S_3 étant ensuite ouvert, l'indication de l'intégrateur de flux correspondant à une inversion du champ magnétique d'excitation doit être enregistrée et l'induction magnétique correspondante calculée.

En augmentant plusieurs fois de suite le courant d'excitation et en répétant cette procédure on obtient les valeurs correspondantes de l'intensité du champ magnétique d'excitation et de l'induction magnétique à partir desquelles on trace la courbe normale d'aimantation.

Le courant d'excitation ne doit jamais décroître au cours des mesures sous peine de devoir désaimanter à nouveau l'éprouvette avant de reprendre les mesures.

3.6.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet

L'éprouvette doit être désaimantée comme indiqué en 3.6.4 et le cycle d'hystérésis déterminé en utilisant l'une des méthodes suivantes.

Méthode A: méthode d'enregistrement continu

L'équipement supplémentaire spécifié dans la méthode A du 3.6.4 est nécessaire. L'intégrateur doit être remis à zéro et ensuite un courant est envoyé dans l'enroulement d'excitation N_1 avec une intensité suffisante pour produire le champ magnétique d'excitation maximum demandé. Ce courant doit être ensuite ramené lentement à zéro, inversé, augmenté jusqu'à sa valeur maximale négative, ramené à zéro, inversé à nouveau et augmenté jusqu'à sa valeur maximale positive.

NOTE Il convient que le cycle soit parcouru en un temps compris entre 30 s et 60 s, bien que certains matériaux, le fer pur par exemple, puissent demander une durée supérieure, cela afin de laisser à l'aimantation de l'éprouvette un temps suffisant pour suivre le champ magnétique d'excitation appliqué, tout en évitant une dérive significative du zéro de l'intégrateur au cours du temps.

Méthode B: méthode point par point

L'éprouvette doit être désaimantée et l'enroulement d'excitation N_1 doit être parcouru par un courant suffisant pour produire le champ magnétique d'excitation maximum demandé. Les pointes du cycle d'hystérésis doivent être déterminées en mesurant les valeurs correspondantes de l'intensité du champ magnétique d'excitation et de l'induction magnétique en accord avec la méthode B du 3.6.4.

L'interrupteur-inverseur S_1 étant fermé en position 1, la branche PQ du cycle d'hystérésis (voir figure 2) est déterminée en ouvrant l'interrupteur S_2 et en mesurant l'intensité du champ magnétique d'excitation et la variation d'induction correspondante. En modifiant la résistance R_2 on accède aux différents points de la branche PQ. Le point Q est obtenu pour l'interrupteur S_2 fermé en mesurant la variation d'induction magnétique à l'ouverture de l'interrupteur S_1 .

Pour chaque point du cycle, la valeur du champ magnétique d'excitation est calculée à partir de la valeur mesurée du courant d'excitation (voir équation (3)).

Pour chaque point du cycle, la valeur de l'induction magnétique est calculée à partir de la relation suivante:

$$B_{P'} = B_P - \Delta B \quad (5)$$

où

$B_{P'}$ est l'induction magnétique au point P' de la branche PQ, en teslas;

B_P est l'induction magnétique à la pointe du cycle, en teslas;

ΔB est la variation d'induction magnétique mesurée quand on ouvre l'interrupteur S_2 , l'interrupteur-inverseur S_1 étant maintenu fermé en position 1, en teslas.

La branche QS du cycle d'hystérésis est déterminée avec l'interrupteur S_2 ouvert, par fermeture de l'interrupteur-inverseur S_1 . Les variations du champ magnétique d'excitation et de l'induction magnétique sont mesurées en partant avec l'interrupteur-inverseur S_1 en position ouverte et en le refermant en position 2.

La valeur du champ magnétique d'excitation en chaque point est calculée à partir du courant d'excitation mesuré quand S_1 est fermé en position 2 (voir équation (3)).

La valeur de l'induction magnétique en chaque point est calculée à partir de la relation suivante:

$$B_{Q'} = B_Q - \Delta B \quad (6)$$

où

$B_{Q'}$ est l'induction magnétique au point Q' sur la branche QS, en teslas;

B_Q est l'induction magnétique au point Q, en teslas;

ΔB est la variation d'induction magnétique mesurée quand on ferme l'interrupteur-inverseur S_1 en position 2, l'interrupteur S_2 étant ouvert, en teslas.

Pour obtenir le cycle d'hystérésis complet, on doit utiliser la séquence des commutations indiquée au tableau 1 qui permet de maintenir l'éprouvette dans un état cyclique stable.

Tableau 1 – Séquence des commutations nécessaires au maintien de l'éprouvette dans un état cyclique stable

	Interrupteur-inverseur S_1	Interrupteur S_2	Point de cycle
1	Fermé (1)	Fermé	P
2	Fermé (1)	Ouvert	P'
3	Ouvert	Ouvert	Q
4	Fermé (2)	Ouvert	Q'
5	Fermé (2)	Fermé	S
6	Fermé (2)	Ouvert	S'
7	Ouvert	Ouvert	T
8	Fermé (1)	Ouvert	T'
9	Fermé (1)	Fermé	P

Les valeurs respectives des résistances R_1 et R_2 sont ajustées pour obtenir:

- résistance R_1 : les valeurs de l'intensité du champ magnétique d'excitation $+H$ ou $-H$, c'est-à-dire les points P ou S du cycle (figure 2);
- résistance R_2 : les valeurs du champ magnétique d'excitation $+H'$ ou $-H'$, c'est-à-dire les points P' et T' ou les points Q' et S' du cycle (figure 2).

Il est souhaitable d'effectuer les mesures sur le cycle d'hystérésis complet ce qui permet d'éliminer les erreurs de dérive du système de mesure du flux. Toutefois, comme la branche STUP du cycle est symétrique de la branche PQRS, les mesures peuvent se limiter à la moitié du cycle d'hystérésis seulement.

3.6.6 Détermination de l'induction rémanente

Pour un cycle d'hystérésis donné, l'induction rémanente du matériau est la valeur de l'induction magnétique, en teslas, obtenue en champ magnétique d'excitation nul. On doit la déterminer à partir de la position du point Q sur le cycle d'hystérésis, ou de son symétrique T.

3.6.7 Détermination du champ coercitif

Pour un cycle d'hystérésis donné, le champ coercitif du matériau est la valeur du champ magnétique d'excitation, en ampères par mètre, qui annule l'induction magnétique. On doit le déterminer à partir du point R sur le cycle d'hystérésis, ou de son symétrique U.

3.7 Incertitude par la méthode du tore

Dans les mesures d'induction magnétique ou d'intensité du champ magnétique d'excitation, l'incertitude totale normalement attendue est inférieure ou égale à $\pm 2\%$ quand on utilise des appareils de mesure pour lesquels l'incertitude propre est estimée inférieure ou égale à $\pm 1\%$ lors de la méthode de mesure point par point. Quand on détermine une courbe d'aimantation complète ou un cycle d'hystérésis par la méthode d'enregistrement continu, l'incertitude globale peut être augmentée par l'incertitude et la résolution du système d'enregistrement ou de l'interface avec l'ordinateur.

Comme des variations de température peuvent affecter le résultat des mesures, il faut que des précautions soient prises pour éviter tout échauffement de l'éprouvette (voir 3.3).

4 Détermination des caractéristiques magnétiques par la méthode du perméamètre

4.1 Objet

L'article 4 décrit la méthode du perméamètre utilisée pour déterminer la courbe d'aimantation normale et le cycle d'hystérésis.

4.2 Principe du perméamètre

Le principe de cet instrument est illustré sur les figures 3 et 4. L'éprouvette est maintenue entre deux culasses massives en acier par lesquelles se referme le flux d'induction magnétique parcourant l'éprouvette. On réalise les culasses à partir de:

- a) deux noyaux en C, en bande enroulée d'acier au silicium à grains orientés comme spécifié dans la CEI 60404-8-7, ou
- b) deux noyaux en C, en bande enroulée d'acier fer-nickel comme spécifié dans la CEI 60404-8-6, ou
- c) deux empilements de tôles découpées en acier magnétique comme spécifié dans la CEI 60404-8-2, la CEI 60404-8-3, la CEI 60404-8-4, la CEI 60404-8-7 ou la CEI 60404-8-8, ou
- d) deux culasses usinées à partir d'acier massif à bas carbone ou de fer doux.

Pour effectuer des essais sur des barres de section ronde ou carrée on doit fabriquer des pièces polaires à partir de deux paires de blocs d'acier à bas carbone ou de fer doux, chaque paire étant usinée pour assurer un contact aussi parfait que possible avec l'éprouvette (voir figures 3c et 3d). Il convient que les pièces polaires aient une perméabilité suffisamment élevée pour réaliser un circuit de faible réluctance pour le passage du flux d'induction magnétique entre l'éprouvette et les culasses.

Les figures 3 et 4 représentent deux types de perméamètres ayant les caractéristiques suivantes:

<i>Type A:</i>	plage de variation du champ magnétique d'excitation: bobine d'excitation: longueur minimale de l'éprouvette: systèmes de mesure de H :	1 kA/m à 200 kA/m; sur un support autour de l'éprouvette; 250 mm; bobine de détection ou sonde de Hall.
<i>Type B:</i>	plage de variation du champ magnétique d'excitation: bobine d'excitation: longueur minimale de l'éprouvette: systèmes de mesure de H :	1 kA/m à 50 kA/m; bobinage sur les culasses; 100 mm; potentiomètre de Rogowski-Chattock.

Les conditions indiquées en 3.3 doivent également s'appliquer aux mesures par la méthode du perméamètre.

4.3 Eprouvette

Sauf indication contraire dans les normes de produit, l'éprouvette doit avoir une longueur minimale de 250 mm pour le perméamètre de type A, ou de 100 mm pour le perméamètre de type B, une section minimale de 10 mm² et une section maximale de 500 mm². Elle doit consister en:

- a) une barre de section uniforme circulaire, carrée, rectangulaire ou hexagonale.

S'il apparaît nécessaire d'usiner l'éprouvette pour réduire au minimum l'entrefer entre l'échantillon et les pièces polaires, la surface de l'éprouvette en contact avec les pièces polaires doit être tournée ou rectifiée en utilisant suffisamment de liquide de refroidissement pour éviter d'échauffer le matériau; ou

- b) pour un matériau issu d'une tôle ou d'une bobine, deux bandes d'une largeur de 30 mm doivent être prélevées, l'une parallèlement à la direction de laminage et l'autre perpendiculairement à la direction de laminage, et elles doivent être mesurées séparément.

L'aire de la section de l'éprouvette doit être déterminée à partir d'un certain nombre de mesures de chacune des dimensions nécessaires, également réparties sur toute la longueur de l'éprouvette. Les dimensions transversales doivent être mesurées à l'aide d'un micromètre approximativement tous les 10 mm, tout au long de l'éprouvette. L'aire moyenne de la section doit être calculée comme la valeur moyenne des aires déterminées par ces mesures avec une incertitude de $\pm 0,5$ %. La différence entre la plus grande et la plus petite valeur des aires ne doit pas dépasser 0,5 % de l'aire moyenne.

4.4 Méthodes de mesure par la méthode du perméamètre

4.4.1 Mesure de l'intensité du champ magnétique d'excitation

L'intensité du champ magnétique d'excitation doit être mesurée avec une incertitude de ± 1 % ou meilleure par l'une des méthodes suivantes:

Perméamètres de type A:

- a) une bobine de détection de longueur comprise entre 10 mm et 50 mm (voir figure 5c) branchée à un dispositif de mesure de flux magnétique qui doit être étalonné en suivant l'une des méthodes décrites à l'annexe B.

La bobine de détection comprend habituellement deux bobines distinctes branchées en série addition et disposées chacune de part et d'autre de l'éprouvette, ou encore deux bobines coaxiales avec l'éprouvette montées en série opposition. Ces bobines doivent être réalisées sur des supports non magnétiques et non conducteurs. Le produit «surface $\times$ nombre de spires» caractéristique de la bobine de détection doit être déterminé avec une incertitude de $\pm 0,5$ % par l'une des méthodes indiquées à l'annexe A;

NOTE Le nombre de tours des bobines de détection utilisées dépend de la sensibilité des fluxmètres utilisés et aussi de la plage de variations de l'induction et du champ magnétique d'excitation à mesurer.

- b) un système à effet Hall, ou tout autre moyen passif de détection directe d'un champ magnétique avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou meilleure. Ces systèmes peuvent être étalonnés dans un solénoïde convenable dont on connaît le rapport champ/courant, ou dans un champ magnétique uniforme en utilisant une sonde à résonance magnétique nucléaire adaptée.

Perméamètres de type B:

- c) En utilisant l'une des méthodes décrites pour les perméamètres de type A, sous réserve qu'on démontre que la variation de l'intensité du champ d'excitation dans la direction radiale reste négligeable; ou
- d) en utilisant un potentiomètre de Rogowski-Chattock (un potentiomètre magnétique en forme de C, voir figure 5e) branché à un intégrateur de flux.

Le potentiomètre magnétique doit comprendre un bobinage continu dont l'axe décrit un demi cercle d'un diamètre maximum de 40 mm, ou une association de bobines discrètes branchées en série, dont les axes sont disposés de façon similaire pour ne pas introduire de discontinuités significatives dans l'intégration du potentiel magnétique. Les faces terminales du système des bobines doivent être situées à moins de 0,5 mm de la surface de l'éprouvette.

Le produit «surface $\times$ nombre de spires» des bobines de mesure de H doit être déterminé avec une incertitude de $\pm 0,5$ % par l'une des méthodes indiquées à l'annexe A.

En utilisant les systèmes de bobines décrits ci-dessus en a) ou d), les variations d'intensité du champ d'excitation magnétique doivent être calculées à partir de la relation:

$$\Delta H = \frac{K_H \alpha_H}{\mu_0 (NA)} \quad (7)$$

où

ΔH est la variation de l'intensité du champ d'excitation magnétique, en ampères par mètre;

K_H est la constante de l'intégrateur de flux (H), en volts secondes;

α_H est l'indication de l'intégrateur de flux (H);

μ_0 est la constante magnétique ($4 \pi 10^{-7}$ henrys par mètre);

(NA) est le produit «surface $\times$ nombre de spires» de la bobine de H, en mètres carrés.

Pour une lecture directe des valeurs mesurées, l'intégrateur de flux peut être réglé de telle sorte que $K_H/[\mu_0 (NA)]$ soit une puissance de 10.

4.4.2 Mesure de l'induction magnétique

L'induction magnétique doit être mesurée avec une incertitude de ± 1 % ou meilleure par l'une des méthodes suivantes:

- a) une bobine de détection de flux (bobine de B, voir figure 5a) d'une longueur comprise entre 10 mm et 50 mm, doit être branchée à un intégrateur de flux. L'étalonnage de cet intégrateur de flux doit être assuré par la méthode décrite à l'annexe B.

En fonction de l'intensité du champ magnétique d'excitation et des aires relatives des sections de l'éprouvette et de la bobine de mesure, il peut être nécessaire d'effectuer une correction de l'induction pour tenir compte du flux passant dans l'air embrassé par la bobine de mesure.

La valeur corrigée de l'induction magnétique est donnée par la relation suivante:

$$B_{\text{corrigé}} = B - \mu_0 H \frac{A_c - A}{A} \quad (8)$$

où

B est la valeur mesurée de l'induction magnétique, en teslas;

μ_0 est la constante magnétique ($4 \pi 10^{-7}$ henrys par mètre);

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

A_c est l'aire de la section de la bobine de mesure, en mètres carrés;

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

De façon équivalente, on peut brancher en série opposition avec la bobine de mesure une bobine de compensation dont la section est équivalente à la section d'air comprise entre l'enroulement de mesure et l'éprouvette.

Les variations d'induction magnétique doivent être calculées à partir de la relation:

$$\Delta B = \frac{K_B \alpha_B}{(N_2 A)} \quad (9)$$

où

ΔB est la variation d'induction magnétique, en teslas;

K_B est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux (B), en volts secondes;

α_B est l'indication de l'intégrateur de flux (B);

N_2 est le nombre de spires de la bobine de mesure;

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

- b) en mesurant la polarisation magnétique avec une incertitude de ± 1 % ou meilleure et en calculant l'induction magnétique à partir de cette valeur de la polarisation et de la valeur de l'intensité du champ magnétique d'excitation. On utilisera la relation:

$$B = \mu_0 H + J \quad (10)$$

où

B est l'induction magnétique, en teslas;

μ_0 est la constante magnétique ($4 \pi 10^{-7}$ henrys par mètre);

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

J est la polarisation magnétique mesurée, en teslas.

La polarisation magnétique, J , doit être mesurée au moyen de bobines de polarisation compensées (bobines de J , voir annexe C) reliées à un intégrateur de flux, lui-même étalonné par l'une des méthodes données à l'annexe B. Il n'est pas nécessaire d'effectuer une correction de flux passant dans l'air.

Les variations de polarisation magnétique doivent être calculées à partir de la relation:

$$\Delta J = \frac{K_J \alpha_J}{(N_2 A)} \quad (11)$$

où:

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

K_J est la constante de l'intégrateur de flux (J), en volts secondes;

α_J est l'indication de l'intégrateur de flux (J);

N_2 est le nombre de spires de la bobine de mesure de la polarisation;

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

Pour une lecture directe des valeurs mesurées, l'intégrateur de flux peut être réglé de telle sorte que $K_J/(N_2 A)$ soit une puissance de 10.

4.4.3 Branchement des appareils

Les appareils sont branchés comme indiqué à la figure 6.

Une source de courant continu E , (une alimentation continue stabilisée, avec une dérive inférieure à 0,1 % ou une batterie) est branchée à l'enroulement d'excitation N_1 à travers un interrupteur-inverseur S_1 . Si on utilise une source de courant bipolaire, l'interrupteur-inverseur S_1 n'est pas nécessaire. Quand l'interrupteur S_2 est fermé, le courant dans le circuit d'excitation est contrôlé par la résistance R_1 .

Si on utilise une résistance stabilisée avec un niveau de sortie continûment réglable, la résistance R_1 n'est pas nécessaire. Ce montage est utilisé pour déterminer la courbe d'aimantation normale et les cycles d'hystérésis par la méthode d'enregistrement continu. Pour déterminer le cycle d'hystérésis point par point, l'interrupteur S_2 et la résistance R_2 sont nécessaires. Le circuit secondaire comprend une bobine de détection entourant l'éprouvette et reliée à un intégrateur de flux.

4.4.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale

L'éprouvette doit être désaimantée conformément aux indications de 3.6.4.

Les intégrateurs de flux utilisés pour la mesure de l'intensité du champ magnétique d'excitation et celle de l'induction ou de la polarisation magnétique doivent être étalonnés conformément à l'annexe B. La courbe d'aimantation normale doit être alors déterminée par l'une des méthodes suivantes:

Méthode A: méthode d'enregistrement continu

Pour utiliser cette méthode, la sortie de l'intégrateur de flux branché aux bobines de mesure de l'intensité du champ magnétique d'excitation doit être reliée à l'entrée X d'un enregistreur X-Y, continu, point par point, ou d'une interface d'ordinateur, et la sortie de l'intégrateur de flux qui mesure l'induction ou la polarisation magnétique doit être reliée à l'entrée Y de l'enregistreur continu, point par point, ou de l'interface d'ordinateur. Le montage doit être étalonné complètement pour fournir en lecture directe l'intensité du champ magnétique d'excitation et l'induction magnétique.

Le courant d'excitation doit être alors progressivement augmenté depuis zéro jusqu'à la valeur nécessaire à l'obtention du champ magnétique d'excitation maximal. L'enregistreur X-Y, de type continu, ou point par point, ou l'interface d'ordinateur fournit alors la courbe d'aimantation de l'éprouvette.

Méthode B: méthode point par point

L'enroulement d'excitation N_1 doit être alimenté par un courant de faible intensité qu'on doit inverser environ 10 fois au moyen de l'inverseur S_1 de façon à stabiliser le cycle du matériau. Les interrupteurs S_3 et S_4 doivent être fermés pendant cette opération pour maintenir au repos les intégrateurs de flux. Les interrupteurs S_3 et S_4 étant ensuite ouverts, on doit noter les indications des intégrateurs de flux consécutives à une inversion du courant d'excitation et on en déduit les valeurs correspondantes pour l'intensité du champ magnétique d'excitation et pour l'induction ou la polarisation magnétique.

En augmentant plusieurs fois de suite le courant d'excitation et en répétant cette procédure, on peut tracer la courbe d'aimantation normale de l'éprouvette.

Le courant d'excitation ne doit jamais décroître au cours des mesures, sous peine de devoir désaimanter à nouveau l'éprouvette avant de reprendre les mesures.

4.4.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet

L'éprouvette doit être désaimantée comme indiqué en 3.6.4 et le cycle d'hystérésis déterminé en utilisant l'une des méthodes suivantes.

Méthode A: méthode d'enregistrement continu

L'équipement supplémentaire spécifié en méthode A de 4.4.4 est nécessaire. Les intégrateurs de flux doivent être remis à zéro et ensuite un courant doit être envoyé dans l'enroulement d'excitation N_1 avec une intensité suffisante pour produire le champ magnétique d'excitation maximum demandé. Ce courant doit être ensuite ramené à zéro, augmenté jusqu'à sa valeur maximale négative, réduit à zéro, inversé à nouveau, et augmenté jusqu'à sa valeur maximale positive. Il convient que le cycle soit parcouru en un temps compris entre 30 s et 60 s (bien que certains matériaux, le fer pur par exemple, puissent demander une durée supérieure) cela afin de laisser à l'aimantation de l'éprouvette un temps suffisant pour suivre le champ magnétique d'excitation appliqué, tout en évitant une dérive significative du zéro de l'intégrateur au cours du temps.

Méthode B: méthode point par point

L'enroulement d'excitation N_1 doit être parcouru par un courant suffisant pour produire le champ magnétique d'excitation maximum demandé. Les pointes du cycle d'hystérésis doivent être déterminées en mesurant les valeurs correspondantes de l'intensité du champ magnétique d'excitation et de l'induction magnétique ou de la polarisation magnétique en accord avec la méthode B de 4.4.4.

L'interrupteur-inverseur S_1 étant fermé en position 1, la branche PQ du cycle d'hystérésis (voir figure 2) est déterminée en ouvrant l'interrupteur S_2 et en mesurant l'intensité du champ magnétique d'excitation et la variation d'induction magnétique ou de polarisation magnétique correspondante. En modifiant la résistance R_2 on accède aux différents points de la branche PQ. Le point Q est obtenu pour l'interrupteur S_2 fermé, en mesurant la variation d'induction ou de polarisation magnétique à l'ouverture de l'interrupteur-inverseur S_1 .

Pour obtenir le cycle d'hystérésis complet, la séquence des commutations doit être conforme au tableau 1 du 3.6.5.

Les valeurs respectives des résistances R_1 et R_2 sont ajustées pour obtenir:

- résistance R_1 : les valeurs de l'intensité du champ magnétique d'excitation $+H$ ou $-H$ aux points P ou S du cycle (figure 2);
- résistance R_2 : les valeurs de l'intensité du champ magnétique d'excitation $+H'$ ou $-H'$, aux points P' et T' ou Q' et S' du cycle (figure 2).

Il est souhaitable d'effectuer les mesures sur le cycle d'hystérésis complet ce qui permet d'éliminer les erreurs de dérive du système de mesure de flux. Toutefois, comme la branche STUP du cycle est symétrique de la branche PQRS les mesures peuvent se limiter à la moitié du cycle d'hystérésis seulement.

4.4.6 Détermination de l'induction rémanente

Pour un cycle d'hystérésis donné, l'induction rémanente du matériau est la valeur de l'induction magnétique, en teslas, obtenue dans un champ magnétique d'excitation nul. On doit la déterminer à partir de la position du point Q sur le cycle d'hystérésis, ou de son symétrique T.

4.4.7 Détermination du champ coercitif

Pour un cycle d'hystérésis donné, le champ coercitif du matériau est la valeur du champ magnétique d'excitation, en ampères par mètre, qui annule l'induction magnétique. On doit le déterminer à partir du point R sur le cycle d'hystérésis, ou de son symétrique U.

4.5 Incertitude par la méthode du perméamètre

Dans les mesures d'induction magnétique ou d'intensité du champ magnétique d'excitation, l'incertitude totale normalement attendue est inférieure ou égale à $\pm 3\%$, quand on utilise des appareils de mesure pour lesquels l'incertitude propre est estimée inférieure ou égale à $\pm 1\%$ lors de la mesure de grandeurs isolées. Quand on détermine une courbe d'aimantation complète ou un cycle d'hystérésis par la méthode d'enregistrement continu, l'incertitude globale peut être augmentée de l'incertitude et de la résolution du système d'enregistrement.

Des variations de température pouvant affecter le résultat des mesures, des précautions doivent être prises pour éviter tout échauffement de l'éprouvette (voir 3.3).

NOTE L'incertitude finale de l'appareillage d'essais est une fonction complexe qui dépend des instruments de mesure utilisés et d'autres caractéristiques du montage et des conditions de mesure. Il n'est pas toujours possible, dans ces conditions, d'établir quelle précision absolue on peut atteindre. Des paramètres de forme, des effets d'extrémités, des effets de coins, des variations de longueur et de section du circuit, aussi bien que l'hystérésis des culasses peuvent conduire à des résultats d'essais notablement divergents quand des éprouvettes issues d'un même lot de matériau sont préparées et mesurées sur différents perméamètres. La meilleure utilisation de tout appareillage est obtenue quand ces facteurs d'erreur sont limités à des valeurs acceptables. Ceci se produit habituellement quand le champ coercitif est raisonnablement grand (> 1 kA/m) ou à des inductions supérieures à l'induction qui correspond au maximum de perméabilité de l'éprouvette.

5 Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai doit comprendre, si cela s'applique:

- le type et la marque d'identification du matériau;
- la forme et les dimensions de l'éprouvette;
- la méthode et/ou le type de perméamètre utilisés;
- le type de capteur pour H et B ou J;
- Dans le cas de résultats obtenus parallèlement et perpendiculairement à la direction de laminage, la valeur moyenne de l'induction magnétique ou de la polarisation pour les mêmes valeurs spécifiées de l'intensité du champ magnétique d'excitation;
- la température ambiante pendant la mesure;
- la température de l'éprouvette pendant la mesure;
- l'incertitude estimée des mesures.

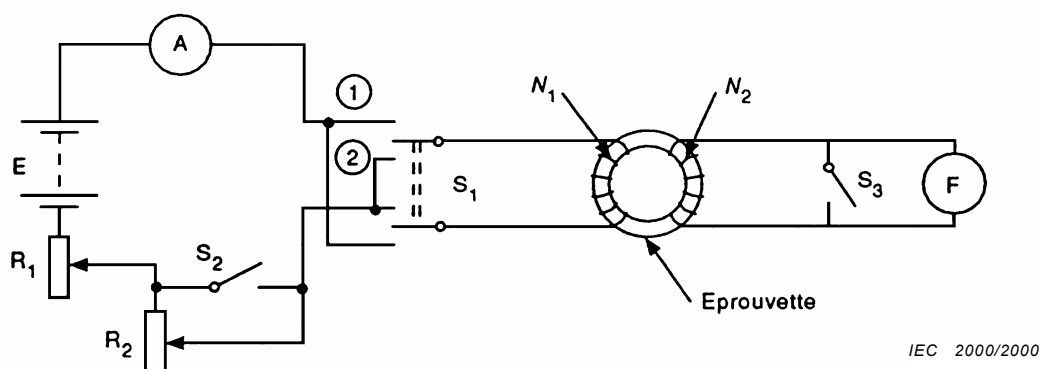


Figure 1 – Circuit pour la détermination des caractéristiques magnétiques par la méthode du tore

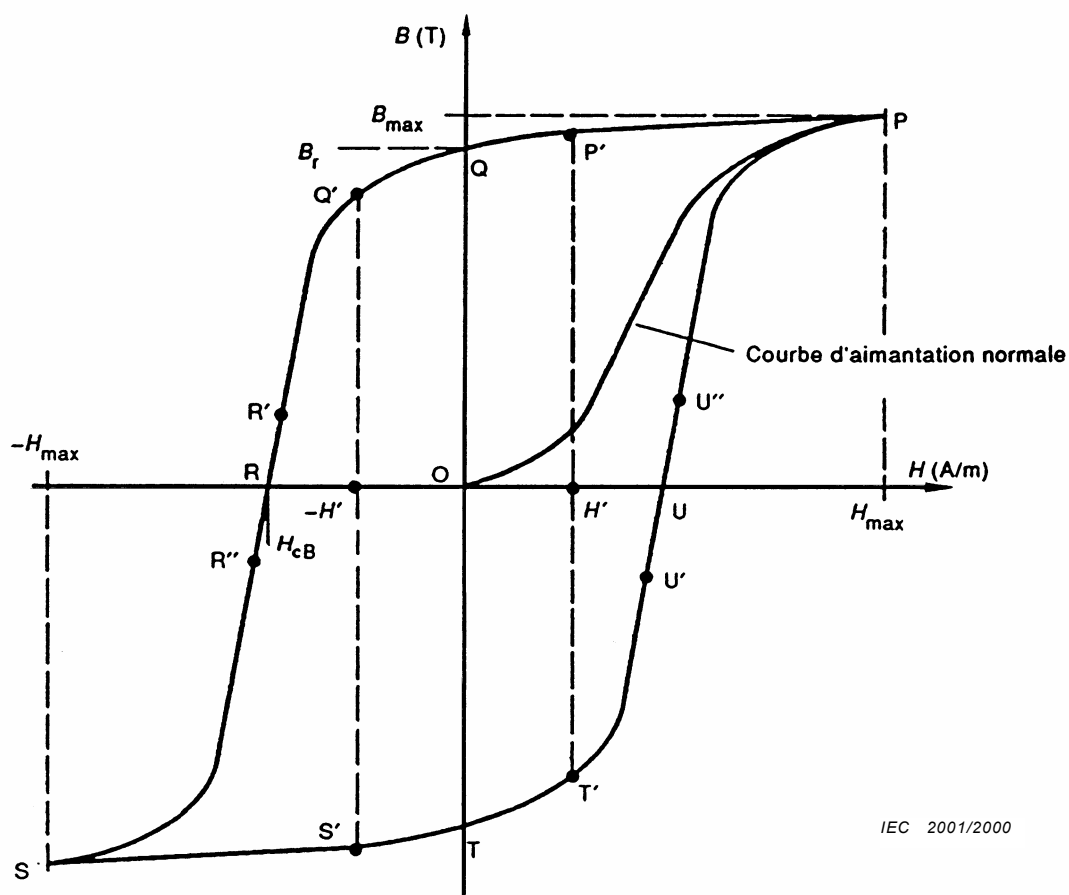
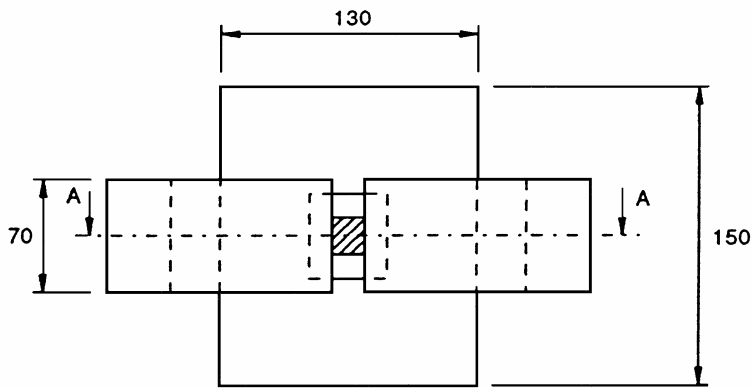
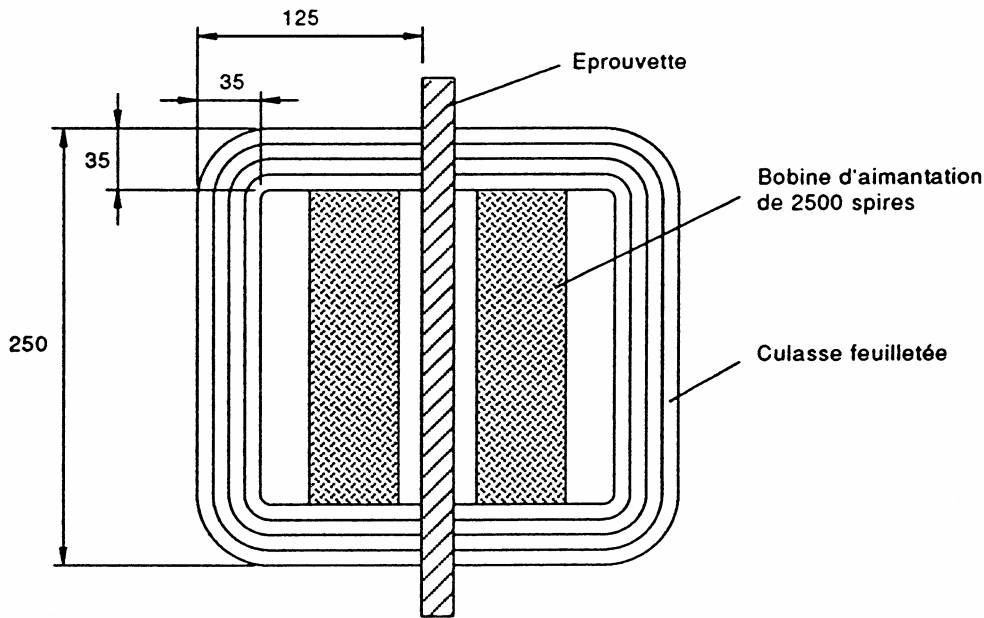


Figure 2 – Cycle d'hystérésis



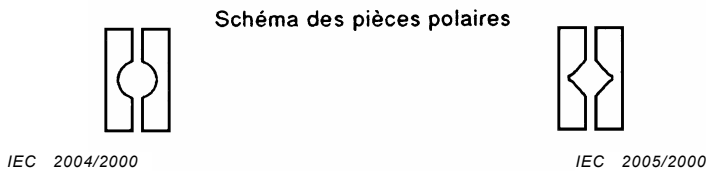
IEC 2002/2000

Figure 3a – Vue de côté



IEC 2003/2000

Figure 3b – Coupe A-A du perméamètre



IEC 2004/2000

IEC 2005/2000

Dimensions en millimètres

Figure 3c

Figure 3d

Figure 3 – Configuration typique d'un perméamètre de type A

Pièces polaires pour des échantillons de section circulaire (exemple)

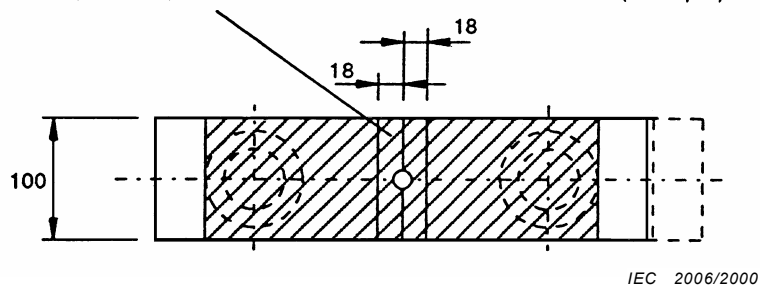


Figure 4a – Vue de côté

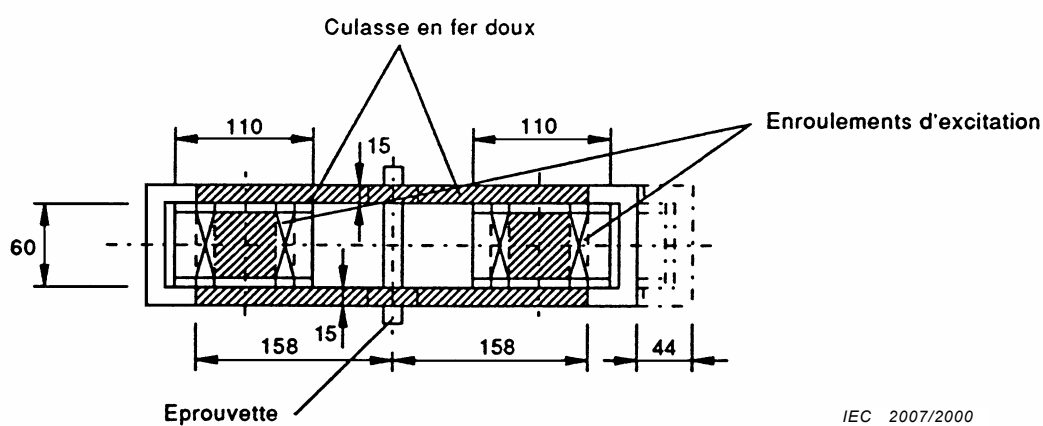


Figure 4b – Vue en plan

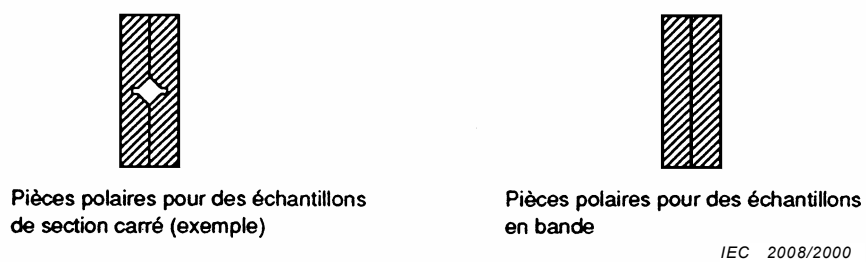
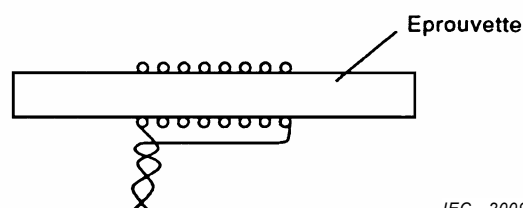


Figure 4c – Choix de pièces polaires

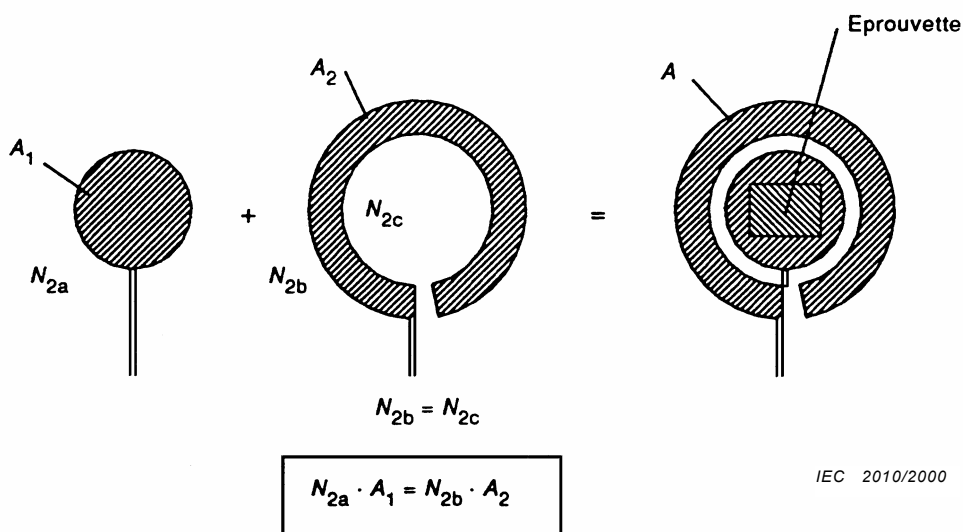
Dimensions en millimètres

Figure 4 – Configuration typique d'un perméamètre de type B



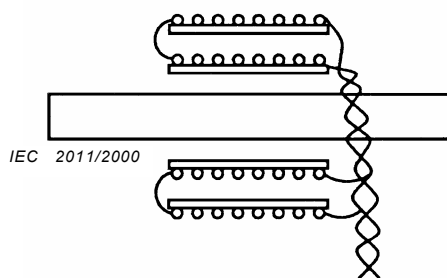
IEC 2009/2000

Figure 5a – Bobine de mesure de flux (bobine de B) enroulée autour de l'éprouvette

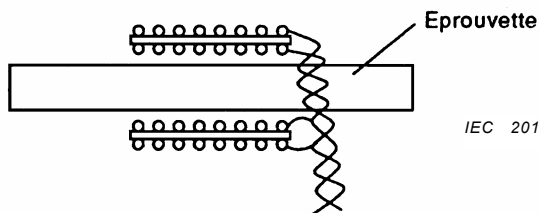


IEC 2010/2000

Figure 5b – Principe de bobines compensées pour la mesure de J



IEC 2011/2000



IEC 2012/2000

Figure 5c – Bobines de mesure du champ d'excitation (bobines de H) de type coaxial. La bobine intérieure et la bobine extérieure sont branchées en série opposition

Figure 5d – Bobines de mesure du champ d'excitation (bobines de H) de type plat. Les deux bobines sont branchées en série addition

Dimensions en millimètres

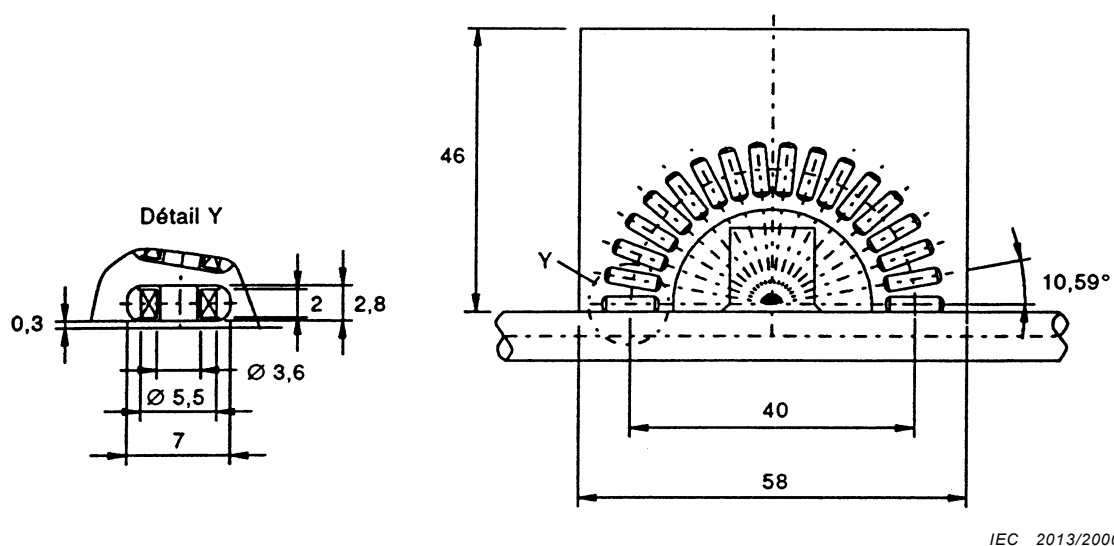


Figure 5e – Système de bobines séparées constituant un potentiomètre de Rogowski-Chattock pour la mesure de H

Figure 5 – Configuration des bobines de mesure

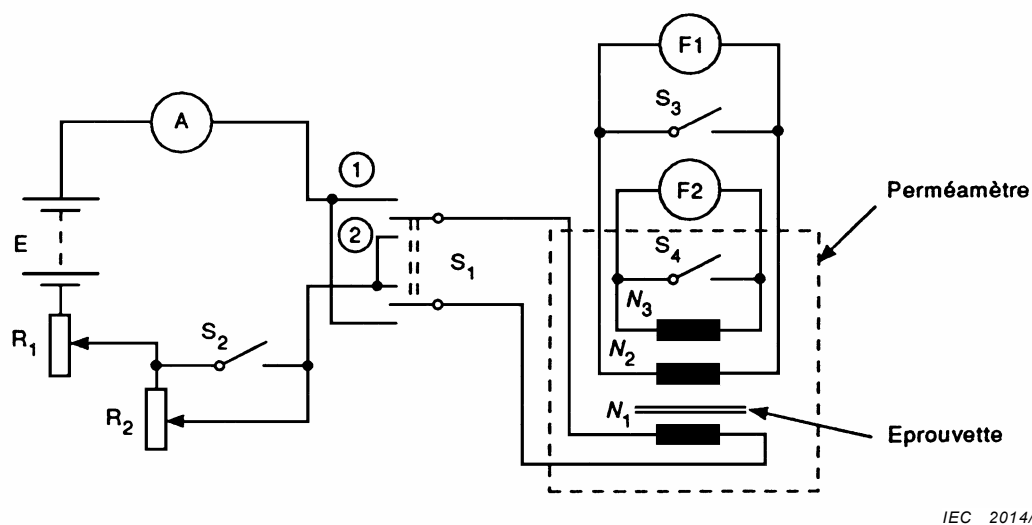


Figure 6 – Circuit pour la détermination de la courbe d'aimantation normale et du cycle d'hystérésis à l'aide d'un perméamètre à double culasse (échantillon en barreau)

Annex A (normative)

Etalonnage des bobines de mesures

L'étalonnage des bobines de mesures doit être établi par l'un des moyens suivants.

- a) La bobine de mesure peut être confiée pour étalonnage à un laboratoire agréé.
- b) Le produit «surface × nombre de spires» d'une bobine de mesure inconnue peut être déterminé par comparaison avec une bobine de mesure étalon en utilisant le circuit indiqué à la figure A.1.

Une source de fréquence voisine de 20 Hz, pour laquelle les courants capacitifs restent faibles dans les différents éléments du circuit, est constituée en associant un oscillateur et un amplificateur de puissance. La bobine de mesure et l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle sont branchées en série opposition, et l'inductance mutuelle est ajustée jusqu'à ce que le détecteur indique l'équilibre. Un amplificateur sélectif accordé de grand grain, associé à un oscilloscope, peut être employé comme détecteur.

Une bobine de mesure étalon, dont on connaît à une précision de $\pm 0,2$ % le produit «surface × nombre de spires» à partir de mesures de métrologie est mise en place au centre de bobines d'excitation, lesquelles créent un champ magnétique uniforme dans tout le volume occupé par la bobine de mesure testée. L'inductance mutuelle M est ajustée pour obtenir l'équilibrage.

En substituant à la bobine de mesure étalon, une bobine de valeur inconnue et en procédant au rééquilibrage du circuit, le produit effectif «surface × nombre de spires» de cette deuxième bobine peut être obtenu à partir des deux valeurs de l'inductance mutuelle, en accord avec la relation suivante:

$$(NA) = \frac{M_t (NA)_s}{M_s} \quad (A1)$$

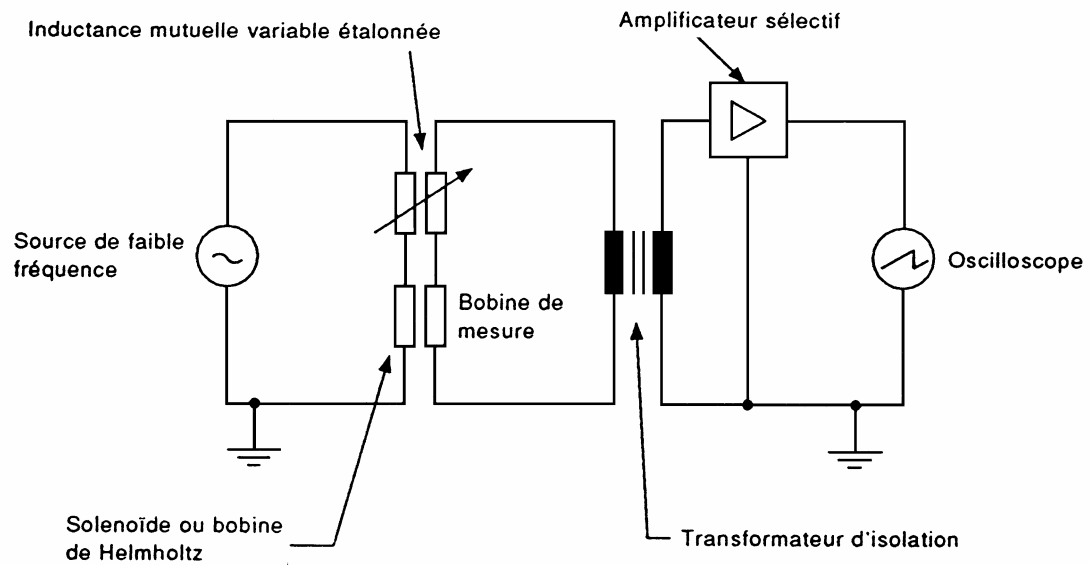
où

(NA) est le produit «surface × nombre de spires» de la bobine inconnue, en mètres carrés;

$(NA)_s$ est le produit «surface × nombre de spires» de la bobine étalon, en mètres carrés;

M_t est la valeur de l'inductance mutuelle à l'équilibre du pont, en utilisant la bobine inconnue, en henrys,

M_s est la valeur de l'inductance mutuelle à l'équilibre du pont, en utilisant la bobine étalon, en henrys.



IEC 2015/2000

Figure A.1 – Circuit pour l'étalonnage des bobines de mesure

Annex B (informative)

Méthodes d'étalonnage de l'intégrateur de flux

On utilise normalement l'une des quatre méthodes suivantes pour étalonner l'intégrateur de flux:

- une variation de courant dans une bobine d'inductance mutuelle étalonée;
- la décharge d'un condensateur étalon;
- l'utilisation d'un aimant étalon associé à une bobine de détection étalonée;
- une source de volts secondes raccordable aux unités fondamentales de tension et de temps.

B.1 Méthode de l'inductance mutuelle

L'enroulement primaire de l'inductance mutuelle de valeur connue est branché à la place de l'enroulement primaire du tore ou de l'enroulement d'excitation du perméamètre. L'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle est branché en série avec:

- l'enroulement secondaire du tore, ou la bobine B dans le cas de la mesure de l'induction magnétique;
- la bobine H dans le cas de la mesure du champ magnétique d'excitation.

Pour étalonner, on provoque une variation convenable de courant ΔI dans l'enroulement primaire de l'inductance mutuelle et on note l'indication α_c de l'intégrateur de flux.

La constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux doit être calculée à partir de la relation:

$$K = \frac{M \Delta I}{\alpha_c} \quad (B1)$$

où

K est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux, en volts secondes;

M est l'inductance mutuelle, en henrys;

ΔI est la variation du courant primaire, en ampères;

α_c est l'indication de l'intégrateur de flux.

Pour les mesures ultérieures de l'induction magnétique et de l'intensité du champ magnétique d'excitation, l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle doit être court-circuité.

Si on utilise une résistance en série avec l'intégrateur, cette résistance doit être ajustée. Si on n'utilise aucune résistance, une correction doit être appliquée à la constante de l'intégrateur de flux, conformément à la relation suivante:

$$K_{\text{corr}} = K = \frac{R_F + R}{R_F + R + R_M} \quad (B2)$$

où

R_F est la résistance d'entrée de l'intégrateur de flux, en ohms;

R est la résistance interne de la bobine de détection, en ohms;

R_M est la résistance de l'enroulement secondaire de l'inductance mutuelle, en ohms.

B.2 Méthode par décharge d'un condensateur étalon

L'intégrateur de flux doit être branché selon le circuit de la figure B.1 comprenant:

- un voltmètre de grande précision, V ;
- un condensateur étalon de capacité C ;
- une résistance shunt de valeur S ;
- une résistance de réglage de valeur r ;
- une bobine de mesure, de résistance R ;
- un interrupteur-inverseur à deux positions (a = charge, b = décharge);
- une batterie E ;
- un intégrateur de flux de résistance interne R_F .

Pour étalonner l'intégrateur de flux, on procède comme suit:

- 1) A l'aide du voltmètre étalonné, on procède à une mesure précise du potentiel U sous lequel le condensateur étalon C est chargé, l'interrupteur-inverseur étant en position a .
- 2) L'inverseur est basculé de a en b ce qui entraîne la décharge du condensateur. Une quantité d'électricité $Q = CU$ parcourt globalement le circuit, seule la quantité

$$q = Q \frac{S}{R + r + S + R_F} \quad (B3)$$

traverse l'intégrateur de flux, entraînant une déviation α .

- 3) La sensibilité de l'intégrateur à la charge est donnée par:

$$\sigma_q = \frac{q}{\alpha} = \frac{Q}{\alpha} \cdot \frac{S}{R + r + S + R_F} \quad (B4)$$

- 4) Une variation $\Delta\phi$ du flux d'induction magnétique dans une spire de la bobine induit la circulation d'une charge Δq :

$$\Delta q = \frac{\Delta\phi}{\text{résistance du circuit}} = \frac{\Delta\phi}{R + r + S + R_F} \quad (B5)$$

De ce fait, on en déduit la relation suivante entre la constante de l'intégrateur de flux, K , et sa sensibilité à la charge:

$$K = \sigma_q (R + r + S + R_F) \quad (B6)$$

- 5) La constante de l'intégrateur de flux K , est donnée par:

$$K = \frac{Q}{\alpha} \cdot \frac{S(R + r + S + R_F)}{R + r + S + R_F} = \frac{QS}{\alpha} = \frac{CUS}{\alpha} \quad (B7)$$

où

- K est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux, en volts secondes;
- C est la capacité, en farads;
- U est la différence de potentiel aux bornes de la capacité, en volts;
- S est la résistance du shunt, en ohms;
- α est l'indication de l'intégrateur de flux.

B.3 Méthode de l'aimant de référence

Un aimant de référence, réalisé de préférence en matériau AlNiCo pour aimant permanent, est d'abord étalonné en utilisant une sonde à résonance magnétique.

Une bobine de mesure calibrée est branchée à l'entrée de l'intégrateur de flux. La bobine est introduite dans la région où l'aimant étalon assure un champ d'induction magnétique uniforme et on note l'indication de l'intégrateur de flux.

La constante de l'intégrateur de flux K peut être calculée à partir de la relation:

$$K = \frac{B (NA)}{\alpha} \quad (B8)$$

où

K est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux, en volts secondes;

B est l'induction magnétique dans l'entrefer de l'aimant de référence, en teslas;

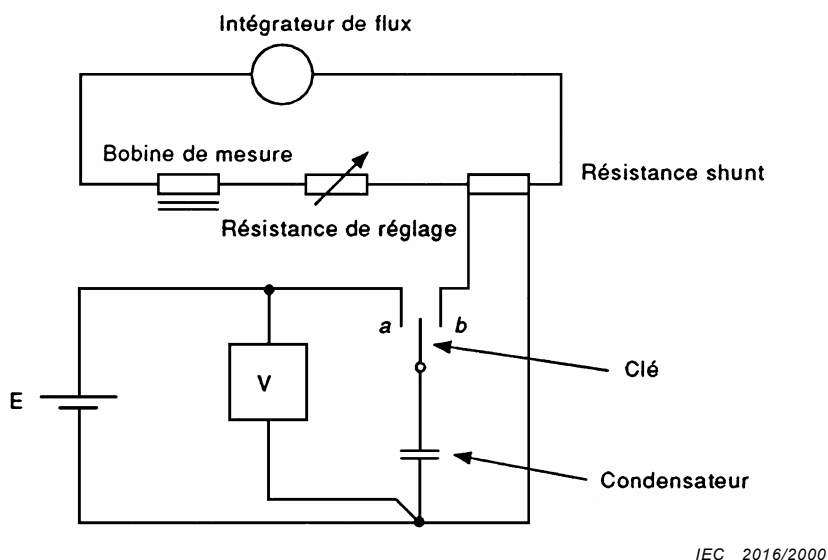
α est l'indication de l'intégrateur de flux;

(NA) est la surface effective de la bobine de détection, en mètres carrés.

NOTE La surface effective de la bobine de détection, peut être déterminée soit par comparaison avec une bobine étalon, en accord avec l'annexe A, soit, sous réserve qu'elle soit fabriquée avec une grande précision, à partir de ses dimensions et de son nombre de spires.

B.4 Une source de volts secondes

L'intégrateur de flux doit être relié à une source de volts secondes qui doit être raccordable aux unités fondamentales de tension et de temps.



IEC 2016/2000

Figure B.1 – Circuit d'étalonnage de l'intégrateur de flux par la méthode de la décharge d'un condensateur étalon

Annex C (informative)

Conditions à remplir par un système de bobines compensées pour la mesure de J

Le système de bobines compensées pour la mesure de J est réalisé à partir d'une combinaison de trois bobines concentriques (voir figure 5b). Une bobine de détection de B comprenant N_{2a} spires est branchée en série opposition avec une paire de bobines de N_{2b} spires chacune, branchées elles-mêmes en série opposition. Cette dernière paire de bobines sert à compenser le flux dans l'air embrassé par la bobine de B. La surface A_2 entre les deux bobines de compensation du flux dans l'air doit être choisie de façon à satisfaire la relation suivante:

$$N_{2a} A_1 = N_{2b} A_2 \quad (C1)$$

où

A_1 est la surface d'une spire de la bobine de B, en mètres carrés.

Il peut ne pas être possible en pratique de choisir N_{2b} et A_2 de telle sorte que l'équation ci-dessus soit exactement satisfaite. Dans ce cas, il convient que le produit $N_{2b} A_2$ soit choisi légèrement supérieur à $N_{2a} A_1$. En ajoutant une résistance en parallèle sur les bobines de compensation du flux dans l'air, leur sensibilité peut être réduite et ramenée à l'identique de celle des bobines de B. En l'absence d'éprouvette, il convient que le système complet des bobines ne délivre aucun signal quand il est extrait d'une région où règne un champ magnétique uniforme, ou encore quand on modifie le champ magnétique d'excitation environnant.

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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