

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties

Matériaux magnétiques –

Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 60 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 60 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties

Matériaux magnétiques –

Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20; 29.030

ISBN 978-2-8322-2593-6

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD	3
INTRODUCTION	5
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Electromagnet and conditions for magnetization	6
4.1 General	6
4.2 Geometrical conditions	8
4.3 Electromagnetic conditions	8
5 Test specimen	9
6 Determination of the magnetic flux density	10
7 Determination of the magnetic polarization	10
8 Measurement of the magnetic field strength	11
9 Determination of the demagnetization curve	12
9.1 General	12
9.2 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in the electromagnet	12
9.3 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in a superconducting coil or pulse magnetizer	13
10 Determination of the principal characteristics	14
10.1 Remanent flux density	14
10.2 $(BH)_{\max}$ product	14
10.3 Coercivities H_{CB} and H_{CJ}	14
10.4 Determination of the recoil line and the recoil permeability	14
11 Reproducibility	15
12 Test report	15
Annex A (normative) Influence of the air-gap between the test specimen and the pole pieces	17
Annex B (informative) Influence of the ambient temperature on measurement results	18
Bibliography	19
Figure 1 – Demagnetization curve showing $(BH)_{\max}$ point	7
Figure 2 – Schematic diagram of electromagnet	8
Figure 3 – Measuring circuit (schematic)	13
Figure 4 – Demagnetization curve and recoil loop	15
Figure A.1 – Air-gap	17
Table 1 – Reproducibility of the measurement of the magnetic characteristics of permanent magnet materials	15
Table A.1 – d/I ratios	17
Table B.1 – Temperature coefficients of B_r and H_{CJ} of permanent magnet materials	18

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

**Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials –
Methods of measurement of magnetic properties**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60404-5 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1993 and Amendment 1:2007. This edition constitutes a technical revision.

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

- adaption of the measurement methods and test conditions to newly introduced magnetically hard materials with coercivity values H_{cJ} higher than 2 MA/m;
- update of the temperature conditions to allow the measurement of new materials with high temperature coefficients.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
68/497/FDIS	68/505/RVD

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

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

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

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015

INTRODUCTION

The previous edition of IEC 60404-5 was issued in October 1993 and amended in 2007. Since then, new applications of NdFeB sintered magnetic materials with intrinsic coercivity, H_{cJ} , higher than 2 MA/m for hybrid electric vehicles and fully electric vehicles have appeared. Thus, IEC TC68 decided in 2011 at their meeting in Ghent to revise IEC 60404-5.

For the measurement of the coercivity relating to polarization, H_{cJ} , at values higher than 2 MA/m and the measurement of magnetic properties at elevated temperatures, the methods described in the non-normative Technical Reports IEC TR 61807 and IEC TR 62331 can be considered.

The ambient temperature previously recommended was $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. However, for permanent magnet materials such as NdFeB and hard ferrites that have large temperature coefficients, it is strongly recommended that the ambient temperature should be controlled within this range to $\pm 1 ^\circ\text{C}$ or better. It is desirable to apply this temperature recommendation for other hard magnet materials. This recommendation was already included in IEC 60404-5:1993/AMD1:2007.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015

MAGNETIC MATERIALS –

Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties

1 Scope

The purpose of this part of IEC 60404 is to define the method of measurement of the magnetic flux density, magnetic polarization and the magnetic field strength and also to determine the demagnetization curve and recoil line of permanent magnet materials, such as those specified in IEC 60404-8-1 [1]¹, the properties of which are presumed homogeneous throughout their volume.

The performance of a magnetic system is not only dependent on the properties of the permanent magnet material but also on the dimensions of the system, the air-gap and other elements of the magnetic circuit. The methods described in this part of IEC 60404 refer to the measurement of the magnetic properties in a closed magnetic circuit.

2 Normative references

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

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-121, IEC 60050-151 and IEC 60050-221 apply.

4 Electromagnet and conditions for magnetization

4.1 General

For permanent magnet materials, this part of IEC 60404 deals with both the coercivity H_{CB} (the coercivity relating to the magnetic flux density) and the intrinsic coercivity H_{cJ} (the coercivity relating to the magnetic polarization).

The measurements specified in this part of IEC 60404 are for both the magnetic flux density, B , and the magnetic polarization, J , as a function of the magnetic field strength, H . These quantities are related by the following equation:

$$B = \mu_0 H + J \quad (1)$$

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

where

- B is the magnetic flux density, in teslas;
 μ_0 is the magnetic constant $= 4\pi \times 10^{-7}$, in henry per metre;
 H is the magnetic field strength, in amperes per metre;
 J is the magnetic polarization, in teslas.

Using this relationship H_{cB} values can be obtained from the $B(H)$ hysteresis loop and H_{cJ} values from the $J(H)$ hysteresis loop. The point represented by H_a and B_a at which the modulus of the product BH has a maximum value is called the point of maximum energy product for $(BH)_{\max}$ (see Figure 1).

The term “squareness” of the demagnetization curve described in this part of IEC 60404 specifies roughly the characteristic shape of the demagnetization curve between the remanent flux density and the coercivity relating to the magnetic polarization in the $J-H$ curve.

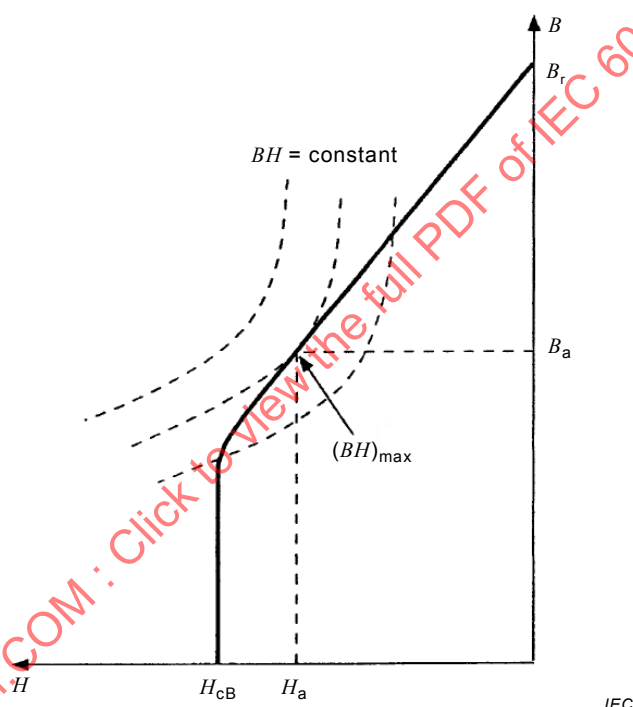


Figure 1 – Demagnetization curve showing $(BH)_{\max}$ point

The measurements are carried out in a closed magnetic circuit consisting of an electromagnet made of soft magnetic material and the test specimen. The construction of the yokes shall be symmetrical; at least one of the poles shall be movable to minimize the air-gap between the test specimen and the pole pieces (see Figure 2). The end faces of both pole pieces shall be ground as nearly as possible parallel to each other and as nearly as possible perpendicular to the pole axis to minimize the air-gap (see Figure A.1).

NOTE For certain measurements, the yoke and the poles can be laminated to decrease eddy currents. The coercivity of the material is normally not more than 100 A/m.

To obtain a sufficiently uniform magnetizing field in the space occupied by the test specimen, the conditions described in 4.2 and 4.3 below shall be fulfilled simultaneously.

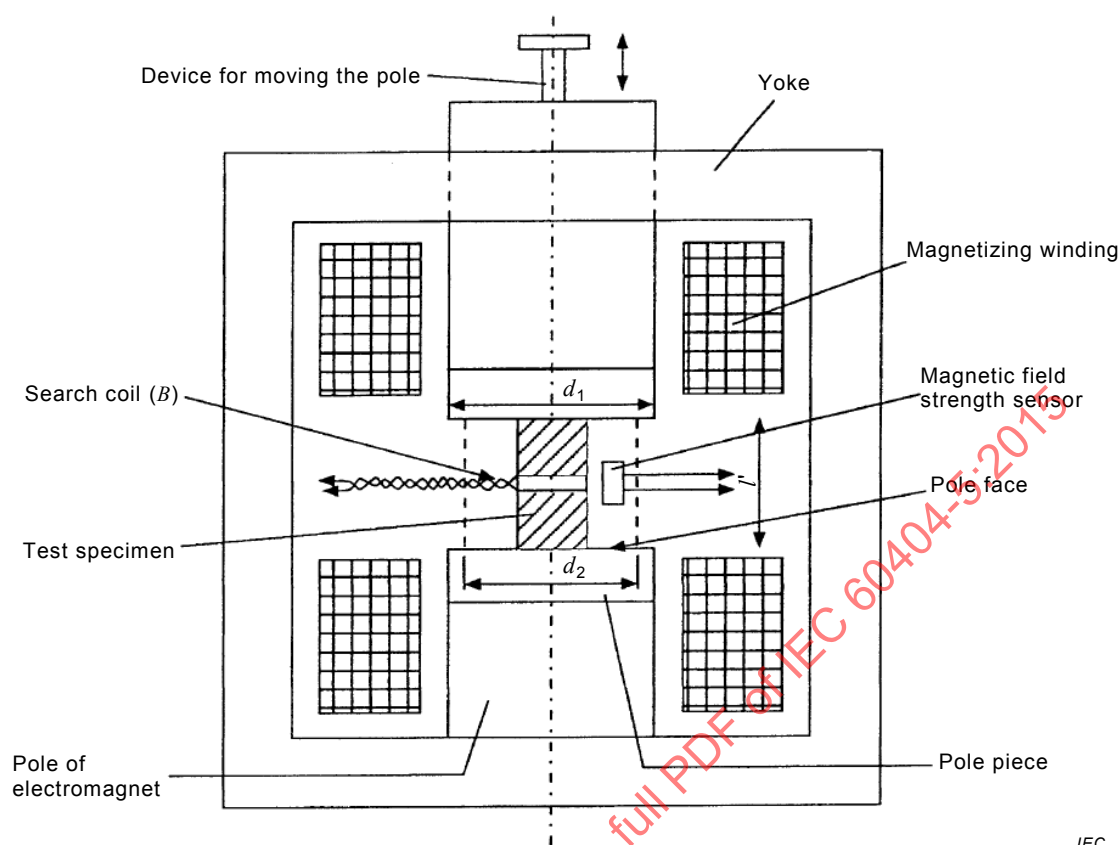


Figure 2 – Schematic diagram of electromagnet

4.2 Geometrical conditions

Referring to Figure 2;

$$d_1 \geq d_2 + 1,2 l' \quad (2)$$

$$d_1 \geq 2,0 l' \quad (3)$$

where

d_1 is the diameter of a circular pole or the dimension of the smallest side of a rectangular pole piece, in millimetres;

l' is the distance between the pole pieces, in millimetres;

d_2 is the maximum diameter of the cylindrical volume with a homogeneous field, in millimetres.

With reference to the magnetic field strength at the centre of the air-gap, condition (2) ensures that the maximum field decrease at a radial distance of $d_2/2$ is 1 % and condition (3) ensures that the maximum field increase along the axis of the electromagnet at the pole faces is 1 %.

4.3 Electromagnetic conditions

During the measurement of the demagnetization curve, the flux density in the pole pieces shall be kept substantially lower than the saturation magnetic polarization so that the pole faces shall be brought as near as possible to an equipotential. In practice, the magnetic flux density shall be less than 1 T in iron and less than 1,2 T in iron alloy containing 35 % to 50 % cobalt.

The yoke is excited by magnetizing coils which are arranged symmetrically as near as possible to the test specimen (see Figure 2). The axis of the test specimen shall be coincident with the axis of the pole pieces.

Before measurement, the test specimen shall be magnetized in a magnetic field $H_{\max}$ intended to bring the test specimen to saturation. The determination of the demagnetization curve shall then be made in a magnetic field with the direction opposite to that used for the initial magnetization.

If it is not possible to magnetize the test specimen to near saturation within the yoke (for instance if the requirements of formulae (4) and (5) cannot be met), the test specimen shall be magnetized outside the electromagnet in a superconducting coil or pulse magnetizer.

Recommended values for $H_{\max}$ for various permanent magnet materials can be found in IEC TR 62517 [2].

Where the product standard or the manufacturer does not specify the value of the magnetizing field strength, $H_{\max}$, it is recommended that before the measurement of the demagnetization curve, the test specimen is magnetized to saturation. The test specimen will be considered to be saturated if the following relationships hold for two values of magnetizing field strength H_1 and H_2 :

$$P_2 \leq P_1 \cdot (H_2/H_1)^{0,02454} \quad (4)$$

$$\text{and} \quad H_2 \geq 1,2 H_1 \quad (5)$$

where

P_2 is the maximum attainable value of $(BH)_{\max}$ in joules per cubic metre, or of coercivity H_{CB} , in amperes per metre;

P_1 is the lower value of $(BH)_{\max}$, in joules per cubic metre or of coercivity H_{CB} , in amperes per metre;

H_2 is the magnetizing field strength corresponding to P_2 , in amperes per metre;

H_1 is the magnetizing field strength corresponding to P_1 , in amperes per metre.

In the special case of $H_2/H_1=1,5$, relationship (4) becomes $P_2 \leq 1,01 P_1$.

In all cases, the magnetization process shall not cause the test specimen to be heated excessively.

5 Test specimen

The test specimen shall have a simple shape (for example a right cylinder or parallelepiped). The length l of the test specimen shall be not less than 5 mm and its other dimensions shall be a minimum of 5 mm and shall be such that the test specimen and the sensing devices shall be within the diameter d_2 as defined in 4.2.

NOTE As a consequence of the high $(BH)_{\max}$ values exhibited by rare earth permanent magnet materials, the length l in the direction of magnetization can be less than 5 mm. When measuring test specimens with such a length, the homogeneity of the magnetic field between the pole pieces of the electromagnet deteriorates. The effect of this on the measurements was reported by Chen et al. [3]. It can be considered when evaluating the results and, if necessary, a contribution included in the measurement uncertainty. At these thicknesses, the influence of air-gap is also increased. Therefore the air-gap is carefully minimized. Since the magnetic properties of machined surfaces of sintered REFeB have poorer properties, the magnetic properties of specimens that have a thickness of less than 5 mm and/or higher S/V ratio are carefully evaluated (where S is the surface area of the test specimen and V is the volume). In this case, a poor squareness of the demagnetization curves is usually observed.

The end faces of the test specimen shall be made as nearly as possible parallel to each other and perpendicular to the test specimen axis to reduce the air-gap (see Annex A).

The cross-sectional area of the test specimen shall be as uniform as possible along its length; any variation shall be less than 1 % of its minimum cross-sectional area. The mean cross-sectional area shall be determined to within 1 %.

The test specimen shall be marked with the direction of magnetization.

6 Determination of the magnetic flux density

The changes in magnetic flux density in the test specimen are determined by integrating the voltages induced in a search coil.

The search coil shall be wound as closely as possible to the test specimen and symmetrical with respect to the pole faces. The leads shall be tightly twisted to avoid errors caused by voltages induced in loops in the leads.

The total error of measuring the magnetic flux density shall be not greater than ± 2 %.

The variation of the apparent magnetic flux density ΔB_{ap} uncorrected for air flux, between the two instants t_1 and t_2 is given by:

$$\Delta B_{ap} = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (6)$$

where

B_2 is the magnetic flux density at the instant t_2 , in teslas;

B_1 is the magnetic flux density at the instant t_1 , in teslas;

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

N is the number of turns on the search coil;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ is the integrated induced voltage, expressed in webers, for the time interval of integration $(t_2 - t_1)$, in seconds.

This change in the apparent magnetic flux density ΔB_{ap} shall be corrected to take into account the air flux included in the search coil. Thus, the change in magnetic flux density ΔB in the test specimen is given by:

$$\Delta B = \Delta B_{ap} - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (7)$$

where

μ_0 is the magnetic constant $= 4\pi \times 10^{-7}$, in henry per metre;

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

A_t is the average cross-sectional area of the search coil, in square metres.

7 Determination of the magnetic polarization

The changes in magnetic polarization in the test specimen are determined by integrating the induced voltages at the terminals of a two-search-coil device composed of COIL 1 and COIL 2 where the test specimen is contained in COIL 2, while COIL 1 is empty. If each of the individual coils has the same product of cross-sectional area and the number of turns, and if both are connected electrically in opposition, the output of COIL 1 compensates for the output

of COIL 2 except the magnetic polarization J of the test specimen. The change of magnetic polarization ΔJ in the test specimen is given by:

$$\Delta J = J_2 - J_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (8)$$

where

J_2 is the magnetic polarization at the instant t_2 , in teslas;

J_1 is the magnetic polarization at the instant t_1 , in teslas;

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

N is the number of turns on the search coil;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ is the integrated induced voltage, expressed in webers, for the time interval of integration $(t_2 - t_1)$, expressed in seconds.

Thus, the output of COIL 1 compensates for the output of COIL 2 except for J within the test specimen.

Because no individual air flux correction is needed, test specimens having a range of cross-sectional areas may be measured with the same two-search-coil device.

The two-search-coil device shall be located totally within the area limited by the diameter d_2 . Referring to conditions (2) and (3), this will provide the required field homogeneity.

The integrator and B coil (or J coil) used for the determination of the magnetic flux density (or the magnetic polarization) shall be calibrated using a traceable source of magnetic flux.

The total error of measuring the magnetic polarization shall not be greater than $\pm 2 \%$.

8 Measurement of the magnetic field strength

The magnetic field strength at the surface of the test specimen is equal to the magnetic field strength inside the test specimen only in that part of the space where the magnetic field strength vector is parallel to the side surface of the test specimen. Therefore, a magnetic field strength sensor is placed in the homogeneous field zone as near as possible to the test specimen and symmetrical with respect to the end faces (see Figure 2).

To determine the magnetic field strength, a flat search coil, a magnetic potentiometer or a Hall probe is used together with suitable instruments. The dimensions of the magnetic field sensor and its location shall be such that it shall be within the area limited by the diameter d_2 (see conditions (2) and (3)).

To reduce the measurement error, the air-gap between the test specimen and the pole pieces shall be small. The influence of the air-gap is considered in Annex A.

The magnetic field strength measuring system shall be calibrated. The effective area turns, NA (N is the number of turns and A the effective area), of the flat search coil shall be calibrated. For the magnetic potentiometer the length of the potential coil is also required. The Hall probe shall be calibrated using a suitable method such as NMR (Nuclear Magnetic Resonance).

The total measuring error shall be not greater than $\pm 2 \%$.

NOTE The pole faces of the electromagnet are normally magnetically equipotential surfaces (see Clause 4). In some permanent magnet materials with high remanent flux density, high coercivity, or both, magnetic flux densities higher than 1,0 T or 1,2 T can occur. These can then cause magnetic saturation in parts of the pole pieces adjacent to the test specimen. In such cases the pole faces are no longer equipotential surfaces and increased errors can occur.

9 Determination of the demagnetization curve

9.1 General

The demagnetization curve can be produced as a $B(H)$ or a $J(H)$ graph. Conversion of an originally obtained B -signal into a J -signal and vice versa can be performed electrically or numerically by subtracting or adding, respectively, $\mu_0 H$ according to Equation (1).

The determination of $B(H)$ curves is described in 9.2 and 9.3. In the case of $J(H)$ curves, an analogous reasoning holds if the magnetic flux density B is replaced by the magnetic polarization J in the relevant formulae and curves.

The measurements shall be carried out at an ambient temperature of $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$. For permanent magnet materials that are known to have a significant temperature coefficient $\alpha(H_{\text{cJ}})$, a specimen temperature of 19°C to 27°C shall be controlled within this range to $\pm 1^\circ\text{C}$ or better during the measurements (see Annex B). The temperature of the test specimen shall be measured by a non-magnetic temperature sensor affixed to the pole pieces of the electromagnet. Any temperature dependence of the measuring instruments (e.g. Hall probe) shall be taken into account.

NOTE 1 For measurement of $H_{\text{cJ}} \geq 1,6 \text{ MA/m}$, saturation effects in the pole pieces can lead to significant measurement errors.

NOTE 2 Further information about the method (non-normative) of measurements at elevated temperatures is provided in IEC TR 61807 [4].

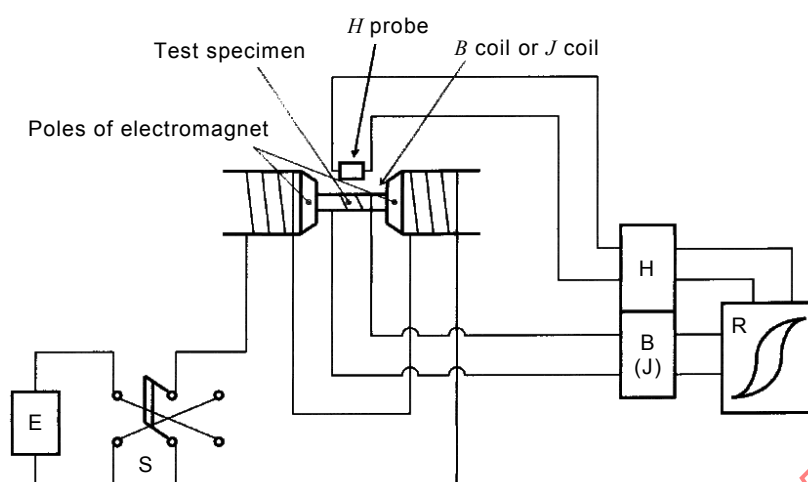
9.2 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in the electromagnet

The search coil device to be used for measuring B or J is connected to a calibrated flux integrator which is adjusted to zero. The test specimen is inserted into the search coil and assembled into the electromagnet and magnetized to saturation. The magnetizing current is then reduced to a very low level, zero, or reversed if necessary, to produce zero magnetic field strength. The corresponding value of magnetic flux density or polarization is recorded (see Figure 3).

With the current in the reverse direction to that used for magnetization, the current level is slowly increased until the magnetic field strength has passed the coercivity H_{cB} or H_{cJ} . With some materials there is a significant delay between the change in the magnetic flux density and the change in magnetic field strength. In this case, the time constant of the flux integrator shall be long enough and the zero drift sufficiently low to ensure accurate integration.

The speed of variation of the magnetic field strength during the reversal of the polarization shall be sufficiently slow to avoid significant magnetic viscosity and eddy current effects.

Corresponding values of H and B or H and J on the demagnetization curve shall be obtained either from a continuous curve produced by a recorder connected to the outputs of the magnetic field strength measurement device and the flux integrator or from point-by-point measurements of the magnetic field strength and the magnetic flux density or magnetic polarization.

**Key**

H H measuring equipment
 B B measuring equipment
 J J measuring equipment
 R X-Y recording equipment

E power supply to magnetize the specimen
 S switching equipment

Figure 3 – Measuring circuit (schematic)

9.3 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in a superconducting coil or pulse magnetizer

The test specimen is magnetized to saturation in either a superconducting coil or by using a pulse magnetizer in accordance with Clause 4. The magnetic field strength required for saturation depends on the magnetization process involved. For more information see IEC TR 62517 [2].

The search coil device to be used for measuring B or J is connected to a calibrated flux integrator which is adjusted to zero. The test specimen is inserted into the search coil and assembled into the electromagnet and magnetized towards saturation in the same direction as previously magnetized in the superconducting coil or pulse magnetizer.

The magnetizing current is then reduced to a very low level, zero or reversed if necessary, to produce zero magnetic field strength. The corresponding value of magnetic flux density or magnetic polarization is recorded.

The current in the electromagnet is then slowly increased further in the reverse direction in accordance with 9.2 until the magnetic field strength has passed the coercivity H_{cB} or H_{cJ} .

The magnetic field strength that can be achieved using an electromagnet may not be sufficient to measure very high values of the coercivity relating to the polarization, H_{cJ} . In such a case, the measurement can be carried out using other methods such as a superconducting solenoid or a pulsed field magnetometer (for the latter see IEC TR 62331 [5]). Generally, to determine the magnetic properties of permanent magnet materials with a coercivity higher than 2 MA/m, the method described in this standard is used for B_r , H_{cB} and $(BH)_{max}$, and a magnetometer that uses a superconducting solenoid or a pulsed field is used for H_{cJ} . However, these methods are not normative.

Corresponding values of H and B or H and J on the demagnetization curve shall be obtained in accordance with 9.2.

10 Determination of the principal characteristics

10.1 Remanent flux density

The remanent flux density is given by the intercept of the demagnetization curve with the B or J axis.

10.2 $(BH)_{\max}$ product

The $(BH)_{\max}$ product is the maximum value of the modulus of the product of corresponding values of B and H for the demagnetization curve.

The following are examples of methods by which it can be determined:

- evaluation by direct reading or interpolation from a family of curves of $B \times H = \text{constant}$ (see Figure 1);
- calculation of the $B \cdot H$ for a number of points of the demagnetization curve and ensuring that the maximum value has been covered;
- evaluation by multiplying B and H electronically and plotting the product as a function of H or B .

10.3 Coercivities H_{CB} and H_{cJ}

The coercivity H_{CB} is given by the intercept of the demagnetization curve with the straight line $B = 0$. The coercivity H_{cJ} is given by the intercept of the demagnetization curve with the line $J = 0$.

10.4 Determination of the recoil line and the recoil permeability

For the starting point B_{rec} , H_{rec} of the recoil line (Figure 4), the test specimen shall be previously magnetized by a magnetic field strength H_{max} . Operating in the second quadrant of the hysteresis loop, the demagnetization current is increased to the value corresponding to H_{rec} . Then, the magnetic field strength is reduced by a value ΔH and the corresponding change in magnetic flux density ΔB is measured. The relative recoil permeability μ_{rec} is calculated from the equation:

$$\mu_{\text{rec}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (9)$$

where

μ_{rec} is the recoil permeability;

ΔB is the change in magnetic flux density corresponding to the change ΔH , in teslas;

ΔH is the change in magnetic field strength from H_{rec} , in amperes per metre;

μ_0 is the magnetic constant $= 4\pi \times 10^{-7}$, in henry per metre.

Since the recoil permeability is not usually constant along the demagnetization curve, the values H_{rec} , B_{rec} , and ΔH shall be indicated.

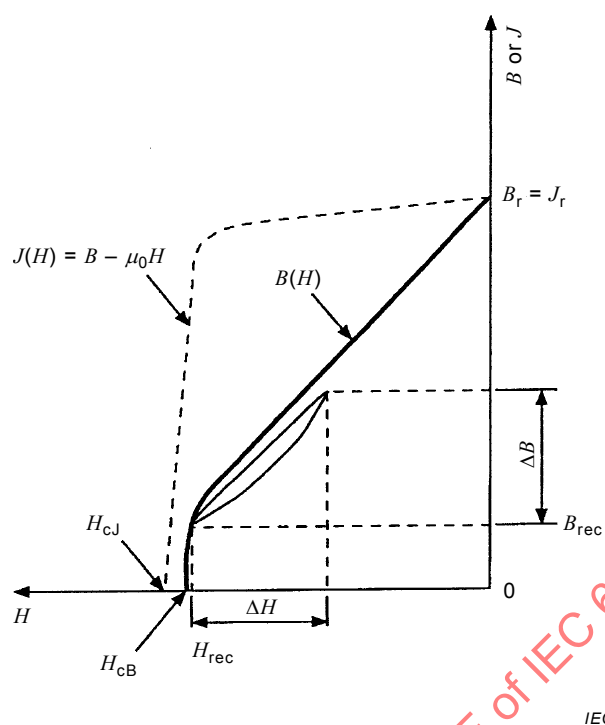


Figure 4 – Demagnetization curve and recoil loop

11 Reproducibility

The reproducibility of the measurements is characterized by a standard deviation given in the following Table 1.

Table 1 – Reproducibility of the measurement of the magnetic characteristics of permanent magnet materials

Quantity	AlNiCo	Hard ferrites, RECo, REFeB
B_r	1 %	2 %
H_{cB}	1 %	2 %
H_{cJ}	1 %	2 %
$(BH)_{max}$	1,5 %	3 %

12 Test report

The test report shall contain, as applicable:

- type and identification mark of the material;
- shape and dimensions of the test specimen;
- temperature of the test specimen during measurement;
- the ambient temperature;
- the value of the magnetizing field strength H_{max} ;
- demagnetization curve;
- remanent flux density B_r or J_r ;
- coercivity H_{cB} and H_{cJ} ;

- $(BH)_{\max}$ product;
- values of B and H for $(BH)_{\max}$, that is B_a and H_a (see Figure 1);
- recoil permeability μ_{rec} and the values B_{rec} , H_{rec} and ΔH ;
- in the case of anisotropic material: the direction of magnetization with respect to the preferred axis of the material if this angle differs from zero degrees;
- estimated uncertainty of the measurement;
- type of H , and B or J sensor;
- statement of SI traceability of the measuring system.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015

Annex A (normative)

Influence of the air-gap between the test specimen and the pole pieces

The relative maximum error of the measurement of the magnetic field strength, $\Delta H/H$, due to the air-gap, can be calculated approximately from the equation:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{2dB}{\mu_0 l H} \quad (\text{A.1})$$

where

B, H are the values of magnetic flux density (expressed in teslas) and magnetic field strength (expressed in amperes per metre), respectively, at a given point of the demagnetization curve;

l is the length of the test specimen, in metres (Figure A.1);

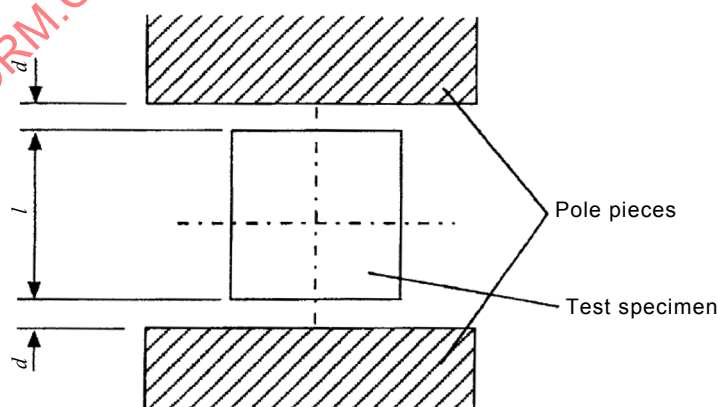
d is the length of the air-gap between the face of the test specimen and the pole piece, in metres;

μ_0 is the magnetic constant = $4\pi \times 10^{-7}$, in henry per metre.

For example, near the $(BH)_{\max}$ point, the error is 1 % for the d/l ratios given in Table A.1.

Table A.1 – d/l ratios

Material	d/l
AlNiCo 37/5	0,000 25
Hard ferrite 25/14	0,003
RECo 180/150	0,005
REFeB 340/130	0,005



IEC

Figure A.1 – Air-gap

Annex B (informative)

Influence of the ambient temperature on measurement results

Table B.1 shows the temperature coefficients of B_r and H_{cJ} of various kinds of permanent magnet materials.

Table B.1 – Temperature coefficients of B_r and H_{cJ} of permanent magnet materials

Material	$\alpha(B_r)$ %/°C	$\alpha(H_{cJ})$ %/°C
AlNiCo	–0,02	–0,07 to +0,03
CrFeCo	–0,05 to –0,03	–0,04
FeCoVCr	–0,01	0
RECo	–0,04 to –0,03	–0,3 to –0,25
REFeB	–0,12 to –0,09	–0,6 to –0,45
Hard ferrite	–0,2	+0,11 to +0,40

The ambient temperature recommended in this standard is (23 ± 5) °C. This temperature range is considered to be adequate in the case of AlNiCo, CrFeCo and FeCoVCr permanent magnet materials because the absolute value of temperature coefficient of H_{cJ} of these materials is smaller than 0,1 %/°C.

However, in the case of temperature sensitive magnet materials such as REFeB and hard ferrites, a temperature variation within the range of ± 5 °C may change the measured results significantly. For example, in the case of REFeB 240/200, the difference in the measured H_{cJ} values for a temperature of 18 °C (the lowest temperature in the range) to 28 °C (the highest temperature in the range) is estimated to be 0,1 MA/m assuming a H_{cJ} of 2 MA/m and a temperature coefficient of H_{cJ} of –0,50 %/°C.

When measuring magnet materials that are sensitive to temperature, it is strongly recommended that a test specimen temperature of 19 °C to 27 °C should be controlled within ± 1 °C or better.

Bibliography

- [1] IEC 60404-8-1, *Magnetic materials – Part 8-1: Specifications for individual materials – Magnetically hard materials*
 - [2] IEC TR 62517, *Magnetizing behaviour of permanent magnets*
 - [3] CHEN, C.H., et al. Verification by finite element modeling for the origin of the apparent image effect in closed-circuit magnetic measurements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011, 323(1), 108-114
 - [4] IEC TR 61807, *Magnetic properties of magnetically hard materials at elevated temperatures – Methods of measurement*
 - [5] IEC TR 62331, *Pulsed field magnetometry*
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	21
INTRODUCTION	23
1 Domaine d'application	24
2 Références normatives	24
3 Termes et définitions	24
4 Electroaimant et conditions d'aimantation	24
4.1 Généralités	24
4.2 Conditions géométriques	26
4.3 Conditions électromagnétiques	26
5 Specimen soumis aux essais	27
6 Détermination de l'induction magnétique	28
7 Détermination de la polarisation magnétique	29
8 Mesure de l'intensité du champ magnétique	29
9 Détermination de la courbe de désaimantation	30
9.1 Généralités	30
9.2 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, avec un specimen soumis aux essais aimanté dans l'électroaimant	30
9.3 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, avec un specimen soumis aux essais aimanté dans une bobine supraconductrice ou un banc d'aimantation à impulsion	31
10 Détermination des caractéristiques principales	32
10.1 Induction rémanente	32
10.2 Produit $(BH)_{\max}$	32
10.3 Champs coercitifs H_{CB} et H_{CJ}	32
10.4 Détermination de la droite de recul et de la perméabilité de recul	32
11 Reproductibilité	33
12 Rapport d'essai	34
Annexe A (normative) Influence de l'entrefer entre le specimen soumis aux essais et les pièces polaires	35
Annexe B (informative) Influence de la température ambiante sur les résultats de mesure	36
Bibliographie	37
Figure 1 – Courbe de désaimantation montrant le point $(BH)_{\max}$	25
Figure 2 – Schéma de principe de l'électroaimant	26
Figure 3 – Circuit de mesure (schéma)	31
Figure 4 – Courbe de désaimantation et boucle de recul	33
Figure A.1 – Entrefer	35
Tableau 1 – Reproductibilité des mesures des caractéristiques magnétiques des matériaux pour aimants permanents	33
Tableau A.1 – Rapports d/I	35
Tableau B.1 – Coefficients de température de B_r et H_{CJ} de matériaux pour aimants permanents	36

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

**Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) –
Méthodes de mesure des propriétés magnétiques**

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 60404-5 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 1993 et l'Amendement 1:2007. Cette édition constitue une révision technique.

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

- adaptation des méthodes de mesure et des conditions d'essai aux matériaux magnétiquement durs récemment introduits possédant un champ coercitif H_{CJ} supérieur à 2 MA/m;

- mise à jour des conditions de température, afin de permettre la mesure de nouveaux matériaux avec des coefficients de température élevés.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
68/497/FDIS	68/505/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015

INTRODUCTION

L'édition précédente de l'IEC 60404-5 a été publiée en octobre 1993 et modifiée en 2007. Depuis, de nouvelles applications des matériaux magnétiques au NdFeB fritté présentant un champ coercitif intrinsèque, H_{cJ} , supérieur à 2 MA/m destinés aux véhicules électriques hybrides et aux véhicules entièrement électriques sont apparues. Ainsi, lors de la réunion de Gand en 2011, le CE 68 de l'IEC a décidé de réviser l'IEC 60404-5.

Pour la mesure du champ coercitif se rapportant à la polarisation, H_{cJ} , de valeur supérieure à 2 MA/m et pour la mesure des propriétés magnétiques à des températures élevées, on peut utiliser les méthodes décrites dans les rapports techniques non normatifs IEC TR 61807 et IEC TR 62331.

Auparavant, la température ambiante recommandée était $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Toutefois, pour les matériaux pour aimants permanents tels que le NdFeB et les ferrites dures de coefficients de température élevés, il est fortement recommandé que la température ambiante soit contrôlée dans les limites de cette plage avec une précision de $\pm 1 ^\circ\text{C}$ ou plus. Il est souhaitable d'appliquer cette recommandation de température pour d'autres matériaux pour aimants durs. Cette recommandation figurait déjà dans l'IEC 60404-5:1993/AMD1:2007.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-5:2015

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 a pour objectif de définir la méthode de mesure de l'induction magnétique, de la polarisation magnétique et l'intensité du champ magnétique, mais aussi de déterminer la courbe de désaimantation et la droite de recul des matériaux pour aimants permanents, comme ceux qui sont spécifiés dans l'IEC 60404-8-1 [1]¹, dont les propriétés sont supposées homogènes dans tout leur volume.

Les performances d'un système magnétique ne dépendent pas seulement des propriétés du matériau pour aimant permanent, mais aussi des dimensions du système, de l'entrefer et des autres éléments du circuit magnétique. Les méthodes décrites dans la présente partie de l'IEC 60404 se rapportent aux mesures des propriétés magnétiques en circuit magnétique fermé.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Électrotechnique International* (disponible sous: www.electropedia.org)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-121, l'IEC 60050-151 et l'IEC 60050-221 s'appliquent.

4 Electroaimant et conditions d'aimantation

4.1 Généralités

Concernant les matériaux pour aimants permanents, la présente partie de l'IEC 60404 distingue le champ coercitif H_{CB} (représentatif de la coercitivité de l'induction magnétique) et le champ coercitif intrinsèque H_{CJ} (représentatif de la coercitivité de la polarisation magnétique).

Les mesures spécifiées dans la présente partie de l'IEC 60404 sont relatives à la fois à l'induction magnétique, B , et à la polarisation magnétique, J , en fonction de l'intensité du champ magnétique, H . Ces grandeurs sont reliées par l'équation suivante:

$$B = \mu_0 H + J \quad (1)$$

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

où

B est l'induction magnétique, en teslas;

μ_0 est la constante magnétique $= 4\pi \times 10^{-7}$, en henry par mètre;

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

J est la polarisation magnétique, en teslas.

Compte tenu de cette relation, les valeurs de H_{CB} peuvent être déduites du cycle d'hystérésis $B(H)$ et les valeurs de H_{CJ} peuvent être déduites du cycle d'hystérésis $J(H)$. Le point représenté par H_a et B_a pour lequel le module du produit BH atteint sa valeur maximale est appelé point du produit d'énergie maximale pour $(BH)_{\max}$ (voir Figure 1).

Le terme "rectangularité" de la courbe de désaimantation décrite dans la présente partie de l'IEC 60404, spécifie grossièrement la forme de la caractéristique de la courbe de désaimantation entre l'induction rémanente et la coercitivité de la polarisation magnétique de la courbe $J(H)$.

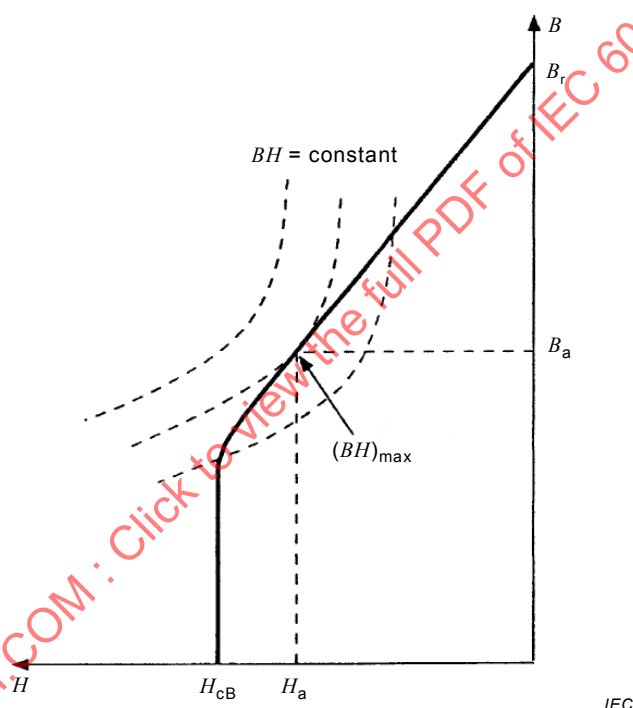


Figure 1 – Courbe de désaimantation montrant le point $(BH)_{\max}$

Les mesures sont effectuées dans un circuit magnétique fermé constitué d'un électroaimant réalisé en matériau magnétique doux et du spécimen soumis aux essais. La culasse doit être de forme symétrique par construction, un des pôles au moins doit être mobile afin de réduire l'entrefer à sa valeur minimale entre le spécimen soumis aux essais et les pièces polaires (voir Figure 2). Les faces d'extrémité des deux pièces polaires doivent être rectifiées aussi parallèles que possible l'une à l'autre et aussi perpendiculaires que possible à l'axe des pôles, afin de réduire l'entrefer à sa valeur minimale (voir Figure A.1).

NOTE Pour certaines mesures, la culasse et les pôles peuvent être feuilletés afin de diminuer les courants de Foucault. La coercitivité du matériau ne dépasse normalement pas 100 A/m.

Pour obtenir un champ d'excitation magnétique suffisamment uniforme dans l'espace occupé par le spécimen soumis aux essais, les conditions décrites en 4.2 et 4.3 ci-dessous doivent être satisfaites simultanément.

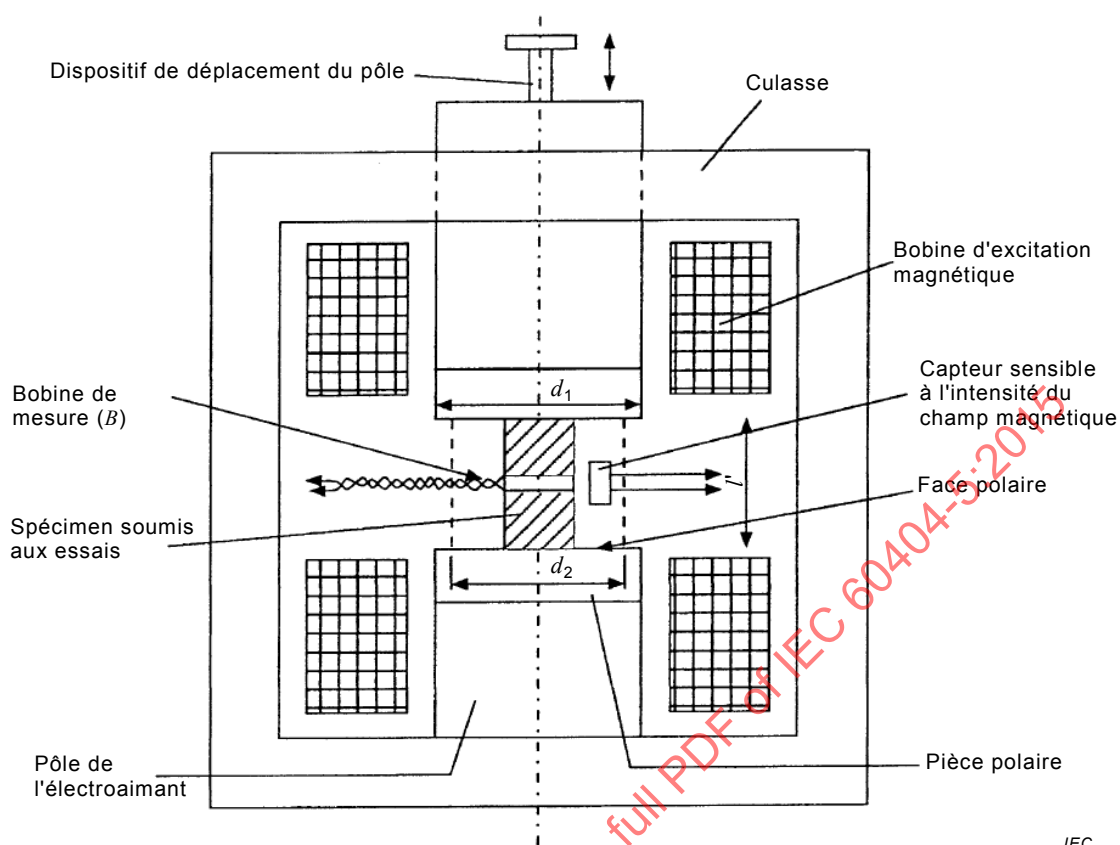


Figure 2 – Schéma de principe de l'électroaimant

4.2 Conditions géométriques

En se référant à la Figure 2;

$$d_1 \geq d_2 + 1,2 l' \quad (2)$$

$$d_1 \geq 2,0 l' \quad (3)$$

où

d_1 est le diamètre d'un pôle circulaire, ou la dimension du plus petit côté d'une pièce polaire rectangulaire, en millimètres;

l' est la distance entre les pièces polaires, en millimètres;

d_2 est le diamètre maximal du volume cylindrique où le champ est homogène, en millimètres.

Par rapport à l'intensité du champ magnétique existant au centre de l'entrefer, la condition (2) garantit que la décroissance du champ magnétique atteint au plus 1 % sur une distance radiale égale à $d_2/2$ et la condition (3) garantit que la croissance du champ atteint au plus 1 % au contact des faces polaires, le long de l'axe de l'électroaimant.

4.3 Conditions électromagnétiques

Pendant la mesure de la courbe de désaimantation, l'induction dans les pièces polaires doit être maintenue à des valeurs notablement inférieures à la polarisation magnétique à saturation, de telle sorte que les faces polaires doivent être assimilables autant que possible à des surfaces équipotentiellles. En pratique, l'induction magnétique ne doit pas dépasser 1 T dans le fer et 1,2 T dans un alliage de fer contenant 35 % à 50 % de cobalt.

La culasse est pourvue de bobines d'excitation magnétique disposées symétriquement, aussi près que possible du spécimen soumis aux essais (voir Figure 2). L'axe du spécimen soumis aux essais doit coïncider avec celui des pièces polaires.

Préalablement à la mesure, le spécimen soumis aux essais doit être aimanté dans un champ magnétique $H_{\max}$ pour l'amener à la saturation. La détermination de la courbe de désaimantation doit alors être faite en appliquant un champ magnétique de direction opposée à celui utilisé pour l'aimantation initiale.

S'il n'est pas possible d'aimanter le spécimen soumis aux essais au voisinage de l'état saturé à l'intérieur de la culasse (par exemple si les exigences des formules (4) et (5) ne peuvent pas être satisfaites), alors le spécimen soumis aux essais doit être aimanté à l'extérieur de l'électroaimant, dans une bobine supraconductrice ou un banc d'aimantation à impulsion.

Les valeurs recommandées pour $H_{\max}$ pour différents matériaux pour aimants permanents sont données dans l'IEC TR 62517 [2].

Si la norme de produit ou le fabricant ne spécifie pas la valeur de l'intensité du champ magnétique d'excitation $H_{\max}$, il est recommandé d'aimanter le spécimen soumis aux essais à saturation avant d'effectuer la mesure de la courbe de désaimantation. Le spécimen soumis aux essais sera considéré comme étant saturé si les relations suivantes sont satisfaites pour deux valeurs H_1 et H_2 de l'intensité du champ magnétique d'excitation:

$$P_2 \leq P_1 \cdot (H_2/H_1)^{0,02454} \quad (4)$$

$$\text{et} \quad H_2 \geq 1,2 H_1 \quad (5)$$

où

P_2 est la valeur maximale pouvant être atteinte de $(BH)_{\max}$ en joules par mètre cube, ou celle du champ coercitif H_{cB} en ampères par mètre;

P_1 est la valeur la moins élevée de $(BH)_{\max}$, en joules par mètre cube, ou celle du champ coercitif H_{cB} , en ampères par mètre;

H_2 est l'intensité du champ magnétique d'excitation correspondant à P_2 , en ampères par mètre;

H_1 est l'intensité du champ magnétique d'excitation correspondant à P_1 , en ampères par mètre.

Dans le cas particulier où $H_2/H_1 = 1,5$, la relation (4) entraîne $P_2 \leq 1,01 P_1$.

Dans tous les cas, le processus d'aimantation ne doit pas entraîner un échauffement exagéré du spécimen soumis aux essais.

5 Spécimen soumis aux essais

Le spécimen soumis aux essais doit être de forme simple (par exemple un cylindre droit ou un parallélépipède). La longueur l du spécimen soumis aux essais ne doit pas être inférieure à 5 mm et ses autres dimensions doivent être d'au moins 5 mm et doivent être telles que le spécimen soumis aux essais et les dispositifs de détection doivent être inclus dans le diamètre d_2 défini en 4.2.

NOTE En raison des valeurs élevées de $(BH)_{\max}$ des matériaux pour aimants permanents à terres rares, la longueur l dans la direction d'aimantation peut être inférieure à 5 mm. Lorsque des spécimens soumis aux essais d'une telle longueur sont mesurés, l'homogénéité du champ magnétique entre les pièces polaires de l'électroaimant se détériore. L'effet de cette détérioration sur les mesures a été rapporté par Chen et al. [3] et peut être pris en compte lors de l'évaluation des résultats et, si nécessaire, une contribution peut être incluse dans l'incertitude de mesure. A ces épaisseurs, l'influence de l'entrefer augmente également. Par conséquent, l'entrefer est réduit à sa valeur minimale avec précaution. Puisque les propriétés magnétiques des surfaces usinées du REFeB fritté sont

plus pauvres, les propriétés magnétiques des spécimens dont l'épaisseur est inférieure à 5 mm et/ou dont le rapport S/V est plus élevé, sont évaluées avec précaution (où S est la surface du spécimen soumis aux essais et V est le volume). Dans ce cas, on observe généralement une moins bonne rectangularité des courbes de désaimantation.

Les faces d'extrémité du spécimen soumis aux essais doivent être faites aussi parallèles que possible l'une à l'autre et aussi perpendiculaires que possible à l'axe du spécimen soumis aux essais, afin de réduire l'entrefer (voir Annexe A).

La section du spécimen soumis aux essais doit avoir une surface aussi constante que possible sur toute sa longueur; toute variation doit être inférieure à 1 % de sa section minimale. La section moyenne doit être déterminée avec une précision de 1 %.

La direction d'aimantation doit être indiquée sur le spécimen soumis aux essais.

6 Détermination de l'induction magnétique

Les variations de l'induction magnétique dans le spécimen soumis aux essais sont déterminées par intégration des tensions induites dans une bobine de mesure.

Les enroulements de la bobine de mesure doivent être placés aussi près que possible du spécimen soumis aux essais et symétriquement par rapport aux faces polaires. Les fils de connexion doivent être étroitement torsadés afin d'éviter toute erreur due aux tensions induites dans les boucles de ces fils.

L'erreur totale de mesure de l'induction magnétique ne doit pas dépasser ± 2 %.

La variation de l'induction magnétique apparente ΔB_{ap} , non corrigée du flux dans l'air, entre les deux instants t_1 et t_2 , est donnée par la relation:

$$\Delta B_{ap} = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (6)$$

où

B_2 est l'induction magnétique à l'instant t_2 , en teslas;

B_1 est l'induction magnétique à l'instant t_1 , en teslas;

A est la section du spécimen soumis aux essais, en mètres carrés;

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

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ est l'intégrale de la tension induite, en webers, étendue à l'intervalle de temps $(t_2 - t_1)$, en secondes.

Cette variation de l'induction magnétique apparente ΔB_{ap} doit être corrigée pour tenir compte du flux dans l'air dans la bobine de mesure. Ainsi, la variation d'induction magnétique corrigée dans le spécimen soumis aux essais ΔB est donnée par la relation:

$$\Delta B = \Delta B_{ap} - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (7)$$

où

μ_0 est la constante magnétique = $4\pi \times 10^{-7}$, en henry par mètre;

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

A_t est l'aire moyenne d'une spire de la bobine de mesure, en mètres carrés.

7 Détermination de la polarisation magnétique

Les variations de la polarisation magnétique dans le spécimen soumis aux essais sont déterminées en intégrant les tensions induites aux bornes d'un dispositif constitué de deux bobines de mesure, la BOBINE 1 et la BOBINE 2, le spécimen soumis aux essais étant contenu dans la BOBINE 2, la BOBINE 1 étant vide. Si chacune des bobines individuelles est caractérisée par le même produit de la surface d'une spire par son nombre de tours, et si ces deux bobines sont branchées électriquement en opposition, la tension de sortie de la BOBINE 1 compense celle de la BOBINE 2, sauf pour la polarisation magnétique J du spécimen soumis aux essais. La variation de polarisation magnétique ΔJ dans le spécimen soumis aux essais est donnée par la relation:

$$\Delta J = J_2 - J_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (8)$$

où

J_2 est la polarisation magnétique à l'instant t_2 , en teslas;

J_1 est la polarisation magnétique à l'instant t_1 , en teslas;

A est la section du spécimen soumis aux essais, en mètres carrés;

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

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ est l'intégrale de la tension induite, en webers, étendue à l'intervalle de temps $(t_2 - t_1)$, en secondes.

Ainsi, la tension de sortie de la BOBINE 1 compense celle de la BOBINE 2, sauf pour J dans le spécimen soumis aux essais.

Puisqu'aucune correction de flux dans l'air n'est nécessaire, les spécimens soumis aux essais ayant une plage de sections peuvent être mesurés en utilisant le même dispositif constitué de deux bobines de mesure.

Le dispositif à deux bobines de mesure doit être entièrement contenu à l'intérieur de la surface limitée par le diamètre d_2 . En se référant aux conditions (2) et (3), ceci donnera l'homogénéité de champ requise.

L'intégrateur et la bobine B (ou la bobine J) utilisés pour déterminer l'induction magnétique (ou la polarisation magnétique) doivent être étalonnés en utilisant une source traçable de flux magnétique.

L'erreur totale de mesure de la polarisation magnétique ne doit pas dépasser $\pm 2 \%$.

8 Mesure de l'intensité du champ magnétique

L'intensité du champ magnétique à la surface du spécimen soumis aux essais n'est égale à l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du spécimen soumis aux essais que dans la partie de l'espace où le vecteur de l'intensité du champ magnétique est parallèle à la surface latérale du spécimen soumis aux essais. Par conséquent, un capteur d'intensité du champ magnétique est placé dans la zone de champ homogène aussi près que possible du spécimen soumis aux essais et symétriquement par rapport à ses faces d'extrémité (voir Figure 2).

Pour déterminer l'intensité du champ magnétique, on utilise une bobine de mesure plate, un potentiomètre magnétique, ou une sonde à effet Hall, avec les instruments appropriés. Les dimensions du capteur de champ magnétique et son positionnement doivent être tels que le capteur doive être contenu à l'intérieur de la surface limitée par le diamètre d_2 (voir les conditions (2) et (3)).

Afin de diminuer les erreurs de mesure, l'entrefer entre le spécimen soumis aux essais et les pièces polaires doit être petit. L'influence de l'entrefer est traitée à l'Annexe A.

Le système de mesure de l'intensité du champ magnétique doit être étalonné. Le produit du nombre de spires (N) par la surface effective (A), NA , de la bobine de mesure plate doit être étalonné. Pour le potentiomètre magnétique, la longueur de la bobine de tension est également requise. La sonde à effet Hall doit être étalonnée selon une méthode appropriée telle que la résonance magnétique nucléaire (NMR, *Nuclear Magnetic Resonance*).

L'erreur de mesure totale ne doit pas dépasser $\pm 2 \%$.

NOTE Les faces polaires de l'électroaimant sont normalement des surfaces magnétiquement équipotentielles (voir l'Article 4). Dans certains matériaux pour aimants permanents avec une induction rémanente importante, une grande coercitivité, ou ces deux caractéristiques, on peut rencontrer des inductions magnétiques supérieures à 1,0 T ou 1,2 T. De telles caractéristiques peuvent ainsi entraîner une saturation magnétique dans les régions des pièces polaires situées au voisinage du spécimen soumis aux essais. Dans de tels cas, les faces polaires cessent d'être des surfaces équipotentielles et des erreurs plus grandes peuvent en résulter.

9 Détermination de la courbe de désaimantation

9.1 Généralités

La courbe de désaimantation peut être représentée par un graphe $B(H)$ ou $J(H)$. Le passage d'un signal initial B à un signal J , et vice versa, peut être réalisé de manière électrique ou numérique en soustrayant ou en additionnant, respectivement, $\mu_0 H$ conformément à l'Equation (1).

La détermination des courbes $B(H)$ est décrite aux 9.2 et 9.3. Dans le cas des courbes $J(H)$, un raisonnement analogue peut être fait si l'induction magnétique B est remplacée par la polarisation magnétique J dans les formules et les courbes applicables.

Les mesures doivent être réalisées à une température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Pour les matériaux pour aimants permanents connus pour avoir un coefficient de température important $\alpha(H_{cJ})$, une température de spécimen de $19 ^\circ\text{C}$ à $27 ^\circ\text{C}$ doit être contrôlée dans cette plage avec une précision de $\pm 1 ^\circ\text{C}$ ou plus au cours des mesures (voir Annexe B). La température du spécimen soumis aux essais doit être mesurée à l'aide d'un capteur de température non magnétique fixé aux pièces polaires de l'électroaimant. Toutes les variations thermiques des instruments de mesure (par exemple les sondes à effet Hall) doivent être prises en compte.

NOTE 1 Pour la mesure de $H_{cJ} \geq 1,6 \text{ MA/m}$, les effets de saturation dans les pièces polaires peuvent entraîner d'importantes erreurs de mesure.

NOTE 2 De plus amples informations concernant la méthode de mesure (non normative) à des températures élevées sont fournies dans l'IEC TR 61807 [4].

9.2 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, avec un spécimen soumis aux essais aimanté dans l'électroaimant

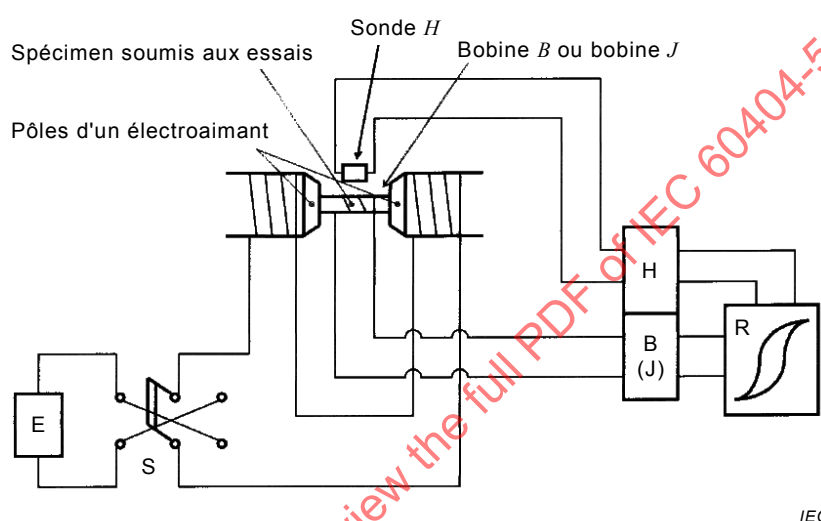
Le dispositif de bobines de mesure devant être utilisé pour mesurer B ou J est relié à un intégrateur de flux étalonné réglé sur zéro. Le spécimen soumis aux essais est inséré dans la bobine de mesure, assemblé dans l'électroaimant et aimanté à saturation. Le courant d'excitation magnétique est ensuite réduit à un niveau très bas, annulé ou inversé si nécessaire, pour produire une intensité du champ magnétique nulle. La valeur correspondante de l'induction magnétique ou de la polarisation magnétique est enregistrée (voir Figure 3).

Le courant étant ensuite appliqué dans la direction opposée à celle utilisée pour aimanter le spécimen soumis aux essais, on augmente lentement le niveau du courant jusqu'à ce que l'intensité du champ magnétique dépasse le champ coercitif H_{cB} ou H_{cJ} . Pour certains matériaux, il existe un délai non négligeable entre la variation d'induction magnétique et la

variation d'intensité du champ magnétique. Dans ce cas, la constante de temps de l'intégrateur de flux doit être suffisante et sa dérive suffisamment faible pour permettre une intégration précise.

La vitesse de variation de l'intensité du champ magnétique pendant l'inversion de la polarisation doit être suffisamment faible pour éviter d'importants effets de viscosité magnétique et de courants de Foucault.

Les valeurs correspondantes de H et B , ou de H et J , sur la courbe de désaimantation, doivent être obtenues soit à partir de la courbe continue produite par un enregistreur relié aux sorties du dispositif de mesure de l'intensité du champ magnétique et de l'intégrateur de flux magnétique, soit à partir de mesures point par point de l'intensité du champ magnétique et de l'induction magnétique ou de la polarisation magnétique.



Légende

H	Equipement de mesure de H	E	Alimentation d'excitation magnétique du spécimen
B	Equipement de mesure de B	S	Equipement de commutation
J	Equipement de mesure de J		
R	Equipement d'enregistrement X-Y		

Figure 3 – Circuit de mesure (schéma)

9.3 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, avec un spécimen soumis aux essais aimanté dans une bobine supraconductrice ou un banc d'aimantation à impulsion

Le spécimen soumis aux essais est aimanté à saturation, soit dans une bobine supraconductrice, soit en utilisant un banc d'aimantation à impulsion, conformément à l'Article 4. L'intensité du champ magnétique requise pour la saturation dépend du processus d'aimantation. Pour plus d'informations, se reporter à l'IEC TR 62517 [2].

Le dispositif de bobines de mesure devant être utilisé pour mesurer B ou J est relié à un intégrateur de flux étalonné réglé sur zéro. Le spécimen soumis aux essais est inséré dans la bobine de mesure, assemblé dans l'électroaimant et aimanté à saturation dans la même direction que l'aimantation précédente dans la bobine supraconductrice ou le banc d'aimantation à impulsion.

Le courant d'excitation magnétique est ensuite réduit à un niveau très bas, annulé ou inversé si nécessaire, pour produire une intensité du champ magnétique nulle. La valeur correspondante de l'induction magnétique ou de la polarisation magnétique est enregistrée.