

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 18: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of the magnetic properties in an open magnetic circuit using a superconducting magnet

Matériaux magnétiques –

Partie 18: Matériaux (magnétiques durs) pour aimants permanents – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en circuit magnétique ouvert à l'aide d'un aimant supraconducteur

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-18:2025



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2025 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 18: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of the magnetic properties in an open magnetic circuit using a superconducting magnet

Matériaux magnétiques –

Partie 18: Matériaux (magnétiques durs) pour aimants permanents – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en circuit magnétique ouvert à l'aide d'un aimant supraconducteur

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20, 29.030

ISBN 978-2-8327-0157-7

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Terms, definitions and abbreviated terms	8
3.1 Terms and definitions	8
3.2 Abbreviated terms	9
4 General principle	9
4.1 Principle of the method.....	9
4.2 Superconducting magnet (SCM)	11
4.3 Magnetic field strength sensor (H sensor)	11
4.4 Magnetic dipole moment detection coil (M coil)	11
4.5 Specimen rod and moving device	12
4.6 Measuring devices and data processing device.....	12
5 Test specimen	13
6 Preparation of measurement	14
6.1 Measurement of volume of the test specimen.....	14
6.2 Initial magnetization of the test specimen to saturation.....	14
7 Determination of magnetic polarization.....	14
7.1 Measurement of the magnetic dipole moment	14
7.1.1 SCM-VSM method.....	14
7.1.2 SCM-extraction method	15
7.2 Determination of magnetic polarization	15
8 Measurement of magnetic field	15
9 Calibration of the magnetic dipole moment detection coil (M coil).....	16
10 Determination of demagnetization curve.....	16
11 Demagnetizing field correction	17
11.1 General.....	17
11.2 Method A: Method using a demagnetizing factor determined by the shape of the test specimen only.....	17
11.3 Method B: Method using a demagnetizing factor determined by the shape and the magnetic susceptibility of the test specimen	18
11.4 Method C: Method using an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen	18
12 Determination of principal magnetic properties	19
12.1 Remanent magnetic polarization J_r	19
12.2 Maximum energy product $(BH)_{\max}$	19
12.3 Coercivity (H_{cJ} and H_{cB})	19
13 Reproducibility of the measurements.....	19
14 Test report.....	20
Annex A (informative) Demagnetizing field correction	21
Annex B (informative) Details of the demagnetizing field correction.....	23
B.1 General.....	23
B.2 Symbols.....	23

B.3	Method using a demagnetizing factor determined by the shape and magnetic susceptibility of the test specimen (Method B).....	24
B.4	Method using an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen (Method C).....	26
Annex C (informative)	VSM measurement of the test specimen at elevated temperatures	30
Annex D (informative)	Effect of test specimen dimensions on the magnetic properties.....	31
Annex E (informative)	Comparison of the magnetic properties measured with a superconducting VSM and a permeameter	32
Bibliography		34
Figure 1	– Demagnetization curve $J(H)$	8
Figure 2	– Schematic diagrams of the test apparatus.....	10
Figure 3	– Schematic diagrams of the first order gradiometer coil	12
Figure A.1	– Schematic diagram of the demagnetizing field correction	21
Figure A.2	– Comparison of the demagnetization curves corrected using demagnetizing field correction Method A, Method B and Method C.....	22
Figure B.1	– Axes of a cuboid magnet.....	24
Figure B.2	– Conceptual diagram of the procedure of Method C.....	27
Figure B.3	– Flowchart of the procedure of Method C	28
Figure C.1	– Schematic diagram of the heating unit equipped in a test apparatus.....	30
Figure D.1	– Effects of test specimen dimensions on magnetic properties [B_r , H_{cJ} , H_{cB} and $(BH)_{max}$] of Nd-Fe-B sintered and hot deformed magnets with different average grain sizes.....	31
Figure E.1	– Comparison of demagnetization curves measured with a permeameter and a superconducting VSM.....	33
Table A.1	– Features of the demagnetizing field correction methods in comparison with Method B.....	21
Table E.1	– Comparison of magnetic properties measured with a permeameter and a superconducting VSM.....	32

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

**Part 18: Permanent magnet (magnetically hard) materials –
Methods of measurement of the magnetic properties in
an open magnetic circuit using a superconducting magnet**

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 60404-18 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
68/768/CDV	68/775/RVC

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

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

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

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

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

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-18:2025

INTRODUCTION

High-performance permanent magnet materials with high coercivity, for example Nd-Fe-B magnets, have been used in the electric and automobile industry and their usage increases rapidly to meet the need to improve energy saving and to increase efficiency of electromagnetic applications, for example traction motors for electric vehicles (EV) and hybrid electric vehicles (HEV), which are urgently demanded to contribute to the problem of global warming.

However, there has been no standard method which can determine all the magnetic properties of the high-performance permanent magnet materials with coercivity H_{cJ} higher than 2 MA/m to meet the need of the industry. The method specified in IEC 60404-5, which is a method of measurement in a closed magnetic circuit, can lead to significant measurement errors for measurement of $H_{cJ} \geq 1,6$ MA/m due to magnetic saturation in parts of the pole faces of the yoke (see IEC 60404-5).

In order to solve the problem, several methods of measurement in an open magnetic circuit without a yoke have been developed. The methods using a superconducting magnet (SCM) are thought to solve this problem and enable accurate measurements of the high-performance permanent magnet materials (see IEC TR 63304 [1]¹).

Since the measurement in an open magnetic circuit is strongly affected by the self-demagnetizing field in the test specimen, a correction of the influence of self-demagnetizing field (demagnetizing field correction) on the demagnetization curve obtained in an open magnetic circuit is indispensable.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 18: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of the magnetic properties in an open magnetic circuit using a superconducting magnet

1 Scope

The purpose of this part of IEC 60404 is to define the general principle and technical details of the methods of measurement of the DC magnetic properties of permanent magnet materials in an open magnetic circuit using a superconducting magnet (SCM).

This method is applicable to permanent magnet materials, such as those specified in IEC 60404-8-1, the properties of which are presumed homogeneous throughout their volume.

There are two methods:

- the SCM-vibrating sample magnetometer (VSM) method;
- the SCM-extraction method.

This document also specifies methods to correct the influence of the self-demagnetizing field in the test specimen on the demagnetization curve obtained in an open magnetic circuit. The magnetic properties are determined from the corrected demagnetization curve.

NOTE 1 These SCM-methods can determine the magnetic properties of high-performance permanent magnet materials with coercivity higher than 2 MA/m. For the magnetic materials with coercivity higher than 1,6 MA/m, the methods of measurement in a closed magnetic circuit in accordance with IEC 60404-5 can lead to significant measurement error due to magnetic saturation in parts of the pole faces of the yoke (see IEC 60404-5).

NOTE 2 There is another method of the measurement in an open magnetic circuit, i.e. the pulsed field magnetometer (PFM), which is described in IEC TR 62331 [3]. The PFM is the method of measurement of the magnetic properties of permanent magnet materials applying the pulsed magnetic field instead of the DC magnetic field and is different from the methods described in this document. The PFM measures a steep AC magnetic response of a test specimen in a pulsed magnetic field. Consequently, additional correction is indispensable to remove the influence of eddy currents in the test specimen and the magnetic viscosity of the magnetic materials in order to obtain properties equivalent to the DC magnetic properties.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-121:1998, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 121: Electromagnetism*

IEC 60050-151, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 151: Electrical and magnetic devices*

IEC 60050-221:1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 221: Magnetic materials and components*

IEC 60404-5, *Magnetic materials – Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties*

IEC 60404-8-1, *Magnetic materials – Part 8-1: Specifications for individual materials – Permanent magnet (magnetically hard) materials*

3 Terms, definitions and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

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

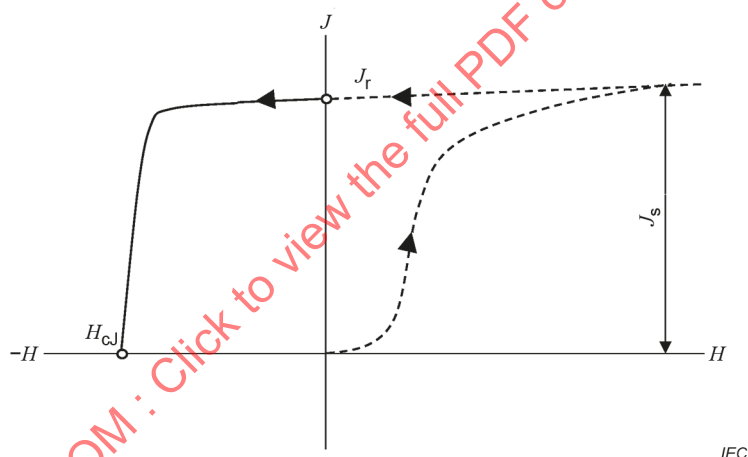
ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

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

3.1.1

demagnetization curve

part of a hysteresis loop in which the magnetic polarization goes from the remanent magnetic polarization to zero when the applied magnetic field strength varies monotonically, as illustrated in Figure 1



Key

- J_s saturation magnetic polarization, in T
- J_r remanent magnetic polarization, in T
- H_{cJ} coercivity relating to the magnetic polarization, in A/m

Figure 1 – Demagnetization curve $J(H)$

Note 1 to entry: A demagnetization curve can be drawn from near magnetic saturation.

[SOURCE: IEC 60050-121:1998, 121-12-72, modified – "magnetic flux density" is replaced by "magnetic polarization" and Note 1 to entry and Figure 1 have been added.]

3.1.2

magnetic dipole moment

m

vector quantity given by the volume integral of the magnetic polarization

[SOURCE: IEC 60050-221:1990, 221-01-07, modified – the symbol j is changed to m which is used industrially and the note has been removed.]

3.1.3

***M* coil**

detection coil for magnetic dipole moment

3.2 Abbreviated terms

ADC	analogue-to-digital converter
EV	electric vehicle
FEM	finite element method
HEV	hybrid electric vehicle
NMR	nuclear magnetic resonance
PC	personal computer
PFM	pulsed field magnetometer
SCM	superconducting magnet
SQUID	superconducting quantum interference device
VSM	vibrating sample magnetometer

4 General principle

4.1 Principle of the method

Figure 2 illustrates schematic diagrams of the test apparatus corresponding to a) the SCM-VSM method and b) the SCM-extraction method. The test apparatus consists of a superconducting magnet (SCM), a moving device, a specimen rod, a magnetic field sensor (hereafter *H* sensor), a magnetic dipole moment detection coil (hereafter *M* coil), measuring devices and a data processing device (PC).

The axis of the DC magnetic field generated by the SCM shall be vertical and coaxial with the *M* coil and the specimen rod so that the direction of magnetization is parallel to the axis of the specimen rod. The moving range of the test specimen shall be in a zone where the magnetic field strength is uniform with a tolerance of ± 1 % at the centre of the SCM. The *H* sensor shall be placed in a position where the influence of the magnetic dipole moment of the test specimen can be ignored.

The test specimen shall be firmly attached at the bottom end of the specimen rod to avoid unexpected movement of the test specimen in the magnetic field and placed in the centre of the SCM as shown in Figure 2.

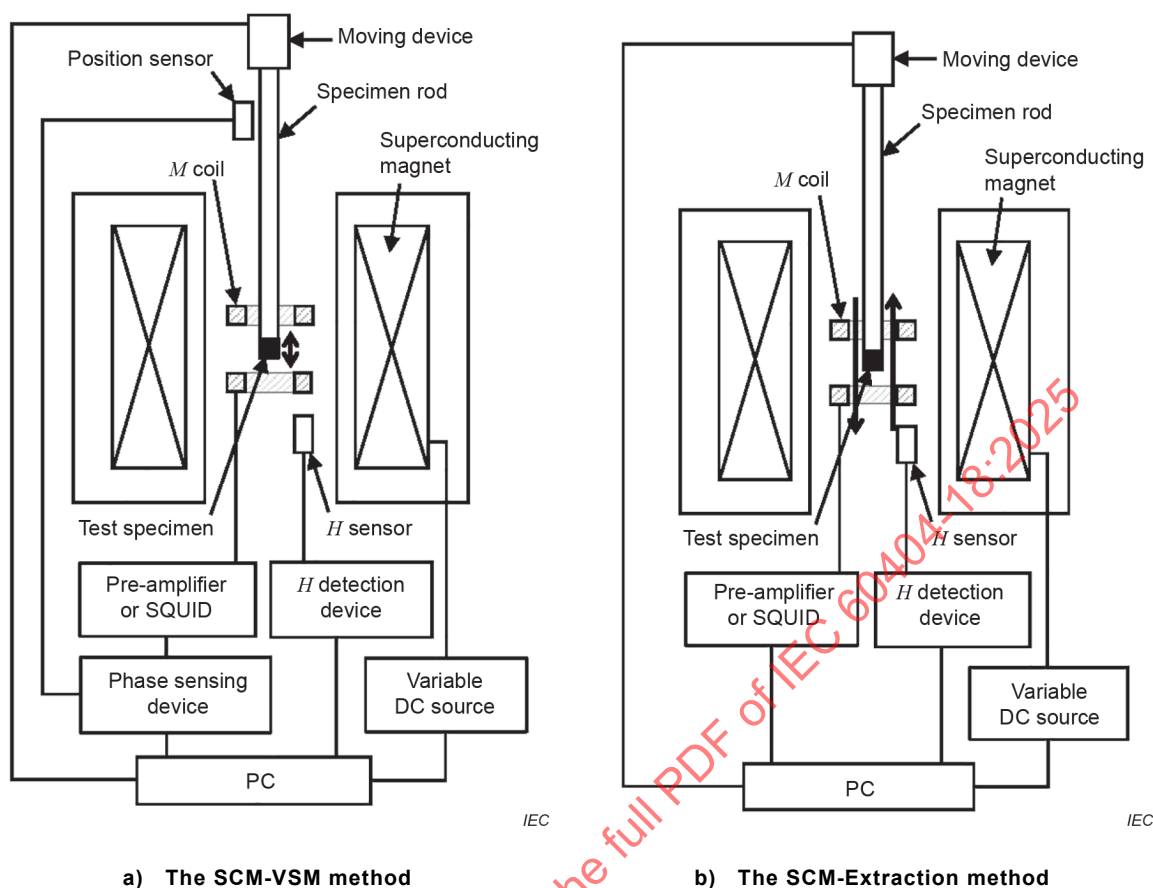


Figure 2 – Schematic diagrams of the test apparatus

The test specimen shall be initially magnetized to saturation (see 6.2) and be kept in the remanent state. A DC magnetic field shall be applied to the test specimen in the direction opposite to that used for the initial magnetization. The magnetic field strength is measured by the H sensor (see 4.3).

The magnetic dipole moment of the test specimen is detected by the voltage induced in the M coil due to the movement of the test specimen (see 4.4). The magnetic polarization of the test specimen is calculated from the magnetic dipole moment and the volume of the test specimen (see 7.2). For calibration aspects, see Clause 9.

There are two methods different in modes of the movement of the test specimen:

- a) the SCM-VSM method: the test specimen is vibrated with a small amplitude in the M coil;
- b) the SCM-extraction method: the test specimen is extracted through the M coil.

The measurements shall be carried out at an ambient temperature of $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ unless otherwise indicated.

NOTE The measurement at temperatures higher than the room temperature can be carried out using a heating unit (see Annex C).

For permanent magnet materials which are known to have significant temperature coefficients $\alpha(J_r)$ and $\alpha(H_{cJ})$, the temperature of the test specimen shall be controlled within $\pm 1 ^\circ\text{C}$ in the range between $19 ^\circ\text{C}$ and $27 ^\circ\text{C}$ during the measurements (see IEC 60404-5). The temperature of the test specimen shall be measured by a non-magnetic temperature sensor attached directly to the test specimen.

The demagnetization curve obtained in an open magnetic circuit is influenced strongly by the self-demagnetizing field in the test specimen which opposes magnetization.

In order to determine the intrinsic demagnetization curve of the permanent magnet material, a correction of the influence of the self-demagnetizing field (hereafter demagnetizing field correction) shall be applied to the obtained demagnetization curve (see Clause 11). Magnetic properties of the permanent magnet material shall be determined from the corrected demagnetization curve.

4.2 Superconducting magnet (SCM)

A variable DC source supplies a DC current to the superconducting coil, with sufficiently low voltage noise (see Figure 2). The current source shall be a bipolar type which can switch positive-negative polarity continuously.

The SCM shall have enough capacity to generate a magnetic field strength to measure the magnetic properties of high-performance permanent magnet materials with coercivity higher than 2 MA/m, for example Nd-Fe-B sintered magnets. The capacity should be higher than 4,8 MA/m (6 T in magnetic flux density).

There are two types of SCM: the conventional metallic SCM made of metallic superconducting coil and the ceramic SCM made of ceramic high temperature superconducting coil [1].

The ceramic SCM is recommended rather than the conventional metallic SCM, in order to reduce the time required to obtain a demagnetization curve within several minutes and to eliminate the use of expensive liquid helium and its incidental facilities, and this is particularly convenient for industrial use [1].

NOTE The test apparatus using the ceramic SCM which can deal test specimens of industrial size is available worldwide.

The zone of uniform magnetic field strength generated at the centre of the SCM shall be sufficiently large to include the space of the moving test specimen.

4.3 Magnetic field strength sensor (H sensor)

An H sensor, for example a Hall probe, measures the magnetic field strength together with a suitable H detection device (see Figure 2). The H sensor shall be calibrated by an appropriate method such as nuclear magnetic resonance (NMR).

In the case of an SCM whose magnetic field strength is calibrated for the magnetizing current, the magnetic field strength may be determined from the magnetizing current supplied to the SCM. However, A small hysteresis shall be avoided between the magnetizing current and the magnetic field strength of the SCM. In the case that it is not possible to avoid the small hysteresis, the relationship between magnetizing current and magnetic field strength should be precisely evaluated for increase and decrease of the magnetizing current.

The total measuring error of the magnetic field strength shall be smaller than ± 1 %.

4.4 Magnetic dipole moment detection coil (M coil)

The M coil measures the magnetic dipole moment of the test specimen by the voltage induced in it (see Figure 2). The M coil shall be wound coaxially with the axis of magnetic field and placed symmetrically with respect to the centre of the magnetic field. Electrical leads of the M coil shall be tightly twisted to avoid errors caused by voltages induced in loops of the leads.

The voltage induced in the M coil shall be calibrated using a standard specimen of nickel sphere and the influence of the shape and dimensions of the test specimen on the voltage shall be verified (see Clause 9).

The total measuring error of the magnetic dipole moment shall be smaller than $\pm 1\%$.

The M coil used in this document is the first order gradiometer coil which shall be composed of an upper coil and a lower coil connected electrically in opposite polarity as shown in Figure 3. The second order gradiometer coil combined with a SQUID (superconducting quantum interference device) circuit may also be used for the M coil [1].

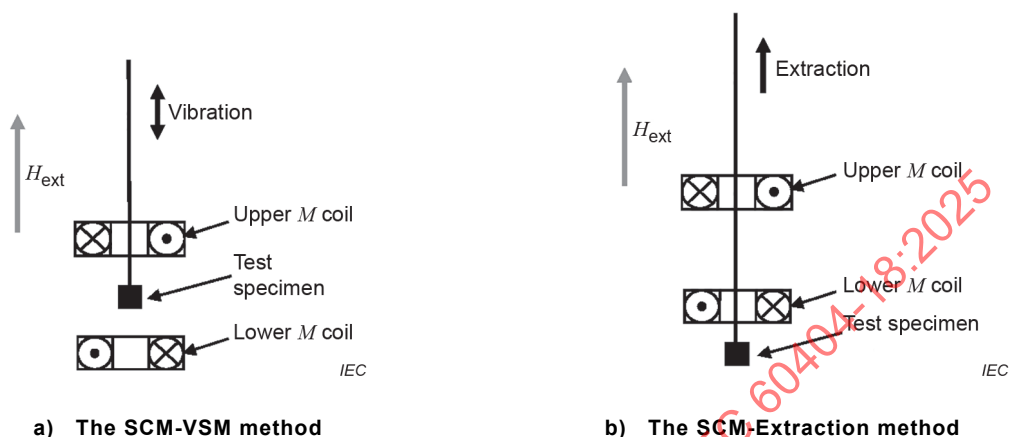


Figure 3 – Schematic diagrams of the first order gradiometer coil

4.5 Specimen rod and moving device

The specimen rod shall be non-magnetic and shall have high rigidity to keep the test specimen on the axis of the magnetic field without trembling.

The specimen rod shall be inserted vertically in the SCM and connected to the moving device at the top end as shown in Figure 2.

The moving device may be a linear motor, a voice coil or other system which can move or vibrate the specimen rod linearly along the axis of the magnetic field.

Moving modes of the test specimen are as follows.

a) The SCM-VSM method

The test specimen is vibrated along the axis of the magnetic field at a fixed frequency and a fixed amplitude sufficiently smaller than the length of the M coil. The frequency is normally 20 Hz to 200 Hz and the amplitude is typically from 0,5 mm to 2 mm (see Figure 3 a)).

b) The SCM-extraction method

The test specimen is extracted through the M coil along the axis of the magnetic field. The start point of the moving specimen is below the lower M coil or above the upper M coil (see Figure 3 b)).

4.6 Measuring devices and data processing device

The voltage induced in the calibrated M coil due to the movement of the test specimen is proportional to the magnetic dipole moment of the test specimen. The signal of the M coil is fed to a preamplifier. In the case of the second order gradiometer coil, a SQUID circuit shall be employed to integrate the signal (see Figure 2).

In the SCM-VSM method, the amplified signal is fed to a phase sensing device such as a lock-in amplifier to output the amplitude of the signal synchronized to the vibration frequency of the test specimen. The output signal is fed to the data processing device.

NOTE In the SCM-VSM method, there is no drift in the signal of the magnetic dipole moment, owing to the use of a phase sensing device (lock-in amplifier) in the SCM-VSM.

In the SCM-extraction method, the amplified signal is directly fed to the data processing device.

The output signal of the H detection device, which is proportional to the magnetic field strength, is fed to the data processing device.

The data processing device is usually composed of a digitizer and a digital signal calculator for the determination of the magnetic properties. The digitizer converts the input signals into digital data simultaneously with analogue-to-digital converters (ADC). The ADC shall have at least a 16-bit resolution.

The digital signal calculator is usually a personal computer (PC) and calculates the magnetic properties from the digitized signals of the magnetic dipole moment and the magnetic field strength.

5 Test specimen

The shape of the test specimen shall be a cylinder or cuboid.

The ratio of the length L to the dimension D , i.e. L/D , shall be 1,00 within $\pm 0,05$, where D is the edge length of the cuboid test specimen or the diameter of the cylinder test specimen. In the case of a cuboid with $L/D = 1,00$, the direction of magnetization shall be marked properly during the test specimen preparation. The direction of magnetization shall be parallel to the length L of the specimen.

NOTE 1 A small difference between L and D of a cuboid test specimen is convenient to easily identify the magnetizing direction of the test specimen.

The dimensions of the test specimen, i.e. L and D , shall be equal to or larger than 3 mm but sufficiently smaller than that of the M coil [1].

The test specimen shall be cut carefully to the predetermined dimension from a large block of the permanent magnet material. Damage on its surface shall be avoided as much as possible, which can deteriorate the magnetic properties.

Test specimens with a dimension less than 3 mm may be used, provided that the damaged surface layer is negligible or a special treatment is applied on the damaged surface layer to recover the intrinsic magnetic properties.

The test specimen should be marked with an arrow to indicate the direction of magnetization in order to make it easy to attach the test specimen to the specimen rod.

NOTE 2 The thickness of permanent magnet materials used in industry has become thinner as their magnetic properties have improved, and permanent magnets thinner than 5 mm have come to be widely used in industry. It is not impossible to measure the magnetic properties of permanent magnet materials with test specimens obtained from these magnets by the conventional test method described in IEC 60404-5 that defines the dimensions of the test specimens to be 5 mm or more. Therefore, a new test method to measure magnetic properties of permanent magnet materials for smaller test specimen has been required by industry. Fundamentally, for test specimens smaller than 5 mm cube, the measurement reproducibility of the conventional closed magnetic circuit measurement becomes worse by influence of the air-gap between the test specimen and the pole pieces. The air-gap caused by poor machining accuracy generates local demagnetizing field in the test specimen and tends to create a risk of cracking. Due to these backgrounds, the open magnetic circuit measurement is required in industry.

6 Preparation of measurement

6.1 Measurement of volume of the test specimen

The volume V of the test specimen shall be calculated from the mass and the density of the test specimen. The mass of the test specimen shall be determined accurately by means of a calibrated electronic balance. The density of the test specimen shall be determined accurately with a large block of the permanent magnet material, for example water displacement measurement based on Archimedean principle.

The volume V can also be calculated from the dimensions of the test specimen measured by means of a calibrated micrometer with four significant figures.

The volume V of the test specimen shall be determined within a tolerance of $\pm 1\%$.

6.2 Initial magnetization of the test specimen to saturation

Before measurement, the test specimen shall be magnetized to saturation in a DC magnetic field strength H_{mag} .

If it is not possible to magnetize the test specimen to saturation in the test apparatus, the test specimen shall be magnetized to saturation outside the test apparatus in a superconducting coil or a pulse magnetizer in accordance with IEC 60404-5.

Recommended values for the DC magnetic field strength H_{mag} for various permanent magnet materials can be found in IEC TR 62517 [4].

7 Determination of magnetic polarization

7.1 Measurement of the magnetic dipole moment

7.1.1 SCM-VSM method

In the SCM-VSM method, the test specimen shall be vibrated at a fixed frequency and a fixed amplitude, and then the output voltage of the phase sensing device shall be measured (see 4.6).

The magnetic dipole moment m shall be calculated from Formula (1):

$$m = \frac{C_V U_V}{a \cdot f} \quad (1)$$

where

m is the magnetic dipole moment, in $\text{Wb} \cdot \text{m}$;

U_V is the output voltage of the phase sensing device, in V;

C_V is a constant, in m^2 ;

a is the amplitude of the vibration, in m;

f is the frequency of the vibration, in Hz.

The constant C_V shall be determined by a calibration of the M coil (see Clause 9).

7.1.2 SCM-extraction method

In the SCM-extraction method, the test specimen shall be extracted through the M coil. The output voltage of the preamplifier or the SQUID circuit shall be measured (see 4.6).

The magnetic dipole moment shall be calculated from Formula (2):

$$m = C_1 \int_{t_1}^{t_2} U(t) dt \quad (2)$$

where

m is the magnetic dipole moment, in $\text{Wb} \cdot \text{m}$;

$U(t)$ is the output voltage of the preamplifier or the SQUID circuit, in V;

t_1 is the time when the test specimen goes through the lower part of the M coil and $U(t_1) = 0$, in s;

t_2 is the time when the test specimen goes through the upper part of the M coil and $U(t_2) = 0$, in s;

C_1 is a constant, in m .

The constant C_1 shall be determined by a calibration of the M coil (see Clause 9).

7.2 Determination of magnetic polarization

The magnetic polarization J shall be calculated from the magnetic dipole moment m and the volume of the test specimen V according to Formula (3).

$$J = \frac{m}{V} \quad (3)$$

where

J is the magnetic polarization, in T;

m is the magnetic dipole moment, in $\text{Wb} \cdot \text{m}$;

V is the volume of the test specimen, in m^3 .

8 Measurement of magnetic field

The magnetic field strength H corresponding to the magnetic polarization shall be measured by the calibrated H sensor, for example a Hall probe, and the H detection device (see Figure 2).

The temperature dependence of the measuring instrument shall be taken into account.

9 Calibration of the magnetic dipole moment detection coil (M coil)

The calibration of the M coil shall be carried out by measuring a standard specimen of nickel sphere for which the magnetic dipole moment m at an ambient temperature of $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ and an applied magnetic field strength of 398 kA/m (5 kOe) is certified by a national or accredited calibration laboratory with the temperature coefficient [5]. The standard specimen shall be made of 99,9 % or higher purity nickel and stress-relief annealed without oxidation. The space occupied by the standard specimen including its movement during the measurement shall be sufficiently smaller than the uniform field zone of the SCM coil. Then, the magnetic field generated by the standard specimen is a perfect dipole field and identical to the field generated by an ideal dipole in the centre of the spherical standard specimen.

NOTE A saturation magnetic moment of the standard specimen is not suitable for calibration in this document.

The constant C_V of Formula (1) or C_1 of Formula (2) shall be determined so that the measured magnetic dipole moment at magnetic field strength of 398 kA/m (5 kOe) matches with the certified value of magnetic dipole moment of the nickel sphere. The difference between the ambient temperatures at the calibration and that specified in the certification shall be compensated by using the temperature coefficient specified in the certification.

The shape and dimension dependence of the measured magnetic dipole moment of the test specimen shall be verified and compensated. The verification shall be carried out by comparison of measurements using a standard specimen of nickel sphere and a nickel cuboid or cylinder with the same shape and dimensions as the test specimen. The nickel cube or cylinder shall be made of the same material of 99,9 % or higher purity nickel and stress-relief annealed without oxidation.

10 Determination of demagnetization curve

The demagnetization curve is a part of the hysteresis loop $J(H)$ (see Figure 1). The measurement procedure of the demagnetization curve is as follows.

At first, the test specimen shall be placed in the centre of the SCM as shown in Figure 2. The position of the test specimen shall be adjusted vertically and horizontally at the centre of the M coil looking at the M coil signal in the case of outside saturation magnetization.

The test specimen shall be initially magnetized to saturation and be kept in the remanent state. When the initial saturation of the test specimen is performed in the test apparatus, the magnetizing current supplied to the SCM shall be increased to magnetize the test specimen to saturation and then the magnetizing current shall be reduced to zero to reach zero external magnetic field strength.

A DC magnetic field shall be applied to the test specimen in the direction opposite to that used for the initial magnetization and increased until the magnetic field strength has passed the coercivity H_{cJ} .

The speed of variation of the magnetic field strength shall be sufficiently slow in accordance with IEC 60404-5 to avoid significant magnetic viscosity and eddy currents which can affect the measured value.

The magnetic dipole moment of the test specimen shall be measured by vibrating the test specimen in the M coil (SCM-VSM method) or by extracting the test specimen through the M coil (SCM-Extraction method) (see 7.1). The corresponding magnetic field strength shall be measured.

The demagnetization curve is obtained either from a continuous measurement with a change of the magnetic field strength or from point-by-point measurements at discrete magnetic field strength.

The value of magnetic polarization is determined from the measured value of the magnetic dipole moment (see 7.2), and then the demagnetization curve $J(H)$ is drawn relating values of the magnetic polarization to the corresponding values of the magnetic field strength.

The obtained demagnetization curve is influenced strongly by the self-demagnetizing field in the test specimen. Therefore, in order to determine the intrinsic demagnetization curve and the principal magnetic properties, the demagnetizing field correction shall be applied on the obtained demagnetization curve.

11 Demagnetizing field correction

11.1 General

There are three methods of the demagnetizing field correction:

- Method A: the method using a demagnetizing factor determined by the shape of the test specimen only;
- Method B: the method using a demagnetizing factor determined by the shape and the magnetic susceptibility of the test specimen;
- Method C: the method using an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen.

NOTE The difference between the features of these three methods are described in Annex A.

11.2 Method A: Method using a demagnetizing factor determined by the shape of the test specimen only

Method A assumes that the self-demagnetizing field strength in the test specimen is uniform and determined by the shape of the test specimen only. The strength of the self-demagnetizing field shall be calculated from Formula (4).

$$H_d = -N \frac{J}{\mu_0} \quad (4)$$

where

H_d is the strength of the self-demagnetizing field, in A/m;

N is the demagnetizing factor;

J is the magnetic polarization, in T;

μ_0 is the magnetic constant, in H/m; $\mu_0 \cong 4 \pi \times 10^{-7}$.

The demagnetizing factor N shall be calculated from the permeance coefficient P_c of the permanent magnet material, which is determined according to the shape of the test specimen [6],[7].

The obtained demagnetization curve $J(H_{\text{ext}})$ shall be converted to the demagnetization curve $J(H_{\text{eff}})$ using Formula (4) and Formula (5).

$$H_{\text{eff}} = H_{\text{ext}} + H_{\text{d}} \quad (5)$$

where

H_{eff} is the effective magnetic field, in A/m;

H_{ext} is the external magnetic field, in A/m;

H_{d} is the demagnetizing magnetic field, in A/m.

NOTE There is a spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in actual magnets except for the case that the shape of the test specimen is ellipsoidal. However, Method A assumes the self-demagnetizing field strength in the test specimen is uniform independently of the shape. Hence the accuracy of this method is not high.

11.3 Method B: Method using a demagnetizing factor determined by the shape and the magnetic susceptibility of the test specimen

Method B calculates the demagnetizing factor N of the test specimen using a finite element method (FEM) with respect to the shape and the magnetic susceptibility χ of the test specimen.

The demagnetizing factor N corresponding to the shape and magnetic susceptibility χ of the test specimen can be found in literature (see Table 1 in [8]).

The obtained demagnetization curve $J(H_{\text{ext}})$ shall be converted to the demagnetization curve $J(H_{\text{eff}})$ using the above demagnetizing factor N and Formula (4) and Formula (5).

NOTE Method B assumes the self-demagnetizing field strength in the test specimen is not uniform and is dependent on the shape and the magnetic susceptibility χ . Hence the accuracy is improved, but it will possibly not be high enough for all testing requirements.

11.4 Method C: Method using an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen

Method C initially assumes a temporary hysteresis loop $J(H)$ and then modifies it so that the calculated demagnetization curve coincides with the measured hysteresis loop $J(H_{\text{ext}})$. This method executes an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen using a FEM [9].

Method C does not use the demagnetizing factor N to correct the obtained demagnetization curve $J(H_{\text{ext}})$.

This method assumes the temporary hysteresis loop $J(H)$ as defined in Formula (6). The parameter $\alpha(H)$ shall be corrected in iterations of calculation so that the assumed hysteresis loop $J(H)$ influenced by the self-demagnetizing field strength H_{d} coincides with the measured hysteresis loop $J(H_{\text{ext}})$.

$$J(H) = \gamma \tanh\left(\frac{H - \beta}{1 - \alpha(H)}\right) + (H - \beta)(1 + 0,1\alpha(H)) \quad (6)$$

where

J is the magnetic polarization, in T;

H is the magnetic field strength, in A/m;

$\alpha(H)$ is a parameter as a function of H ;

β and γ are parameters.

Based on the assumed hysteresis loop $J(H)$ defined in Formula (6), the distribution of the self-demagnetizing field strength and local hysteresis loops $J(H)$ in cells of the magnet model shall be calculated using a FEM. Then, parameters $\alpha(H)$, β and γ in Formula (6) shall be modified by comparing the calculated hysteresis loop $J(H_{\text{eff}})$ and the measured hysteresis loop $J(H_{\text{ext}})$. For the conceptual diagram of the procedure of this method, see Figure B.2.

Such operations shall be repeated until the difference between those hysteresis loops becomes smaller than 5 %. If this condition is satisfied, the calculated hysteresis loop $J(H_{\text{eff}})$ can be considered as the corrected demagnetization curve. For the detailed algorithm, see Annex B.

12 Determination of principal magnetic properties

12.1 Remanent magnetic polarization J_r

The remanent magnetic polarization J_r shall be given by the intercept of the corrected demagnetization curve $J(H_{\text{eff}})$ with the J axis ($H_{\text{eff}} = 0$).

NOTE The remanent magnetic polarization has the same value as the remanent flux density.

12.2 Maximum energy product $(BH)_{\text{max}}$

The maximum energy product $(BH)_{\text{max}}$ is the maximum value of the modulus of the product of corresponding values of B and H_{eff} on the demagnetization curve $B(H_{\text{eff}})$.

The demagnetization curve $B(H_{\text{eff}})$ shall be calculated from Formula (7) using the corrected demagnetization curve $J(H_{\text{eff}})$.

$$B = J + \mu_0 H_{\text{eff}} \quad (7)$$

where

B is the magnetic flux density, in T;

J is the magnetic polarization, in T;

μ_0 is the magnetic constant, in H/m; $\mu_0 \cong 4 \pi \times 10^{-7}$;

H_{eff} is the effective magnetic field strength, in A/m.

12.3 Coercivity (H_{cJ} and H_{cB})

The coercivity H_{cJ} shall be given by the intercept of the corrected demagnetization curve $J(H_{\text{eff}})$ with the H axis ($J = 0$).

The coercivity H_{cB} shall be given by the intercept of the demagnetization curve $B(H_{\text{eff}})$ with the H axis ($B = 0$).

13 Reproducibility of the measurements

The reproducibility of the measurements of J_r , H_{cJ} and $(BH)_{\text{max}}$ using the methods defined above is characterized by a relative standard deviation of 1 % or less, 1 % or less and 1,5 % or less, respectively. This reproducibility value has been estimated on the basis of the results of the international round robin test [1], [2].

NOTE The reproducibility of the measurements is equivalent to that of IEC 60404-5.

14 Test report

The test report shall contain the following, as applicable:

- a) the type and condition of the test specimen;
- b) the shape, dimension and volume of the test specimen;
- c) the temperature of the test specimen during measurement;
- d) the method of initial magnetization to saturation;
- e) the measuring method of the magnetic dipole moment;
- f) the type of magnetic dipole moment detection coil (M coil);
- g) the speed of variation of the magnetic field strength during the measurement;
- h) the method of demagnetizing field correction;
- i) the obtained demagnetization curve;
- j) the corrected demagnetization curve;
- k) the saturation magnetic polarization J_s ;
- l) the remanent magnetic polarization J_r ;
- m) the coercivity (H_{cJ} and H_{cB});
- n) the maximum energy product $(BH)_{\max}$;
- o) the values of B and H for $(BH)_{\max}$;
- p) in the case of anisotropic material: the angle of magnetization with respect to the preferred axis of the material if this angle differs from 0° ;
- q) the estimated uncertainty of the measurement.

Annex A (informative)

Demagnetizing field correction

Annex A describes the features of the demagnetizing field correction described in 11.1.

Figure A.1 illustrates a schematic diagram of the demagnetizing field correction. The demagnetizing field correction converts the obtained demagnetization curve $J(H_{\text{ext}})$ into the intrinsic demagnetization curve $J(H_{\text{eff}})$.

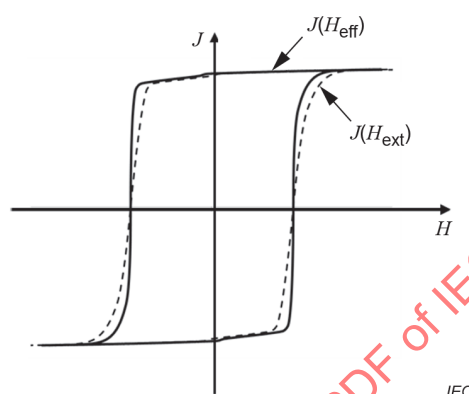


Figure A.1 – Schematic diagram of the demagnetizing field correction

There are three methods of the demagnetizing field correction (see Clause 11):

- Method A: the method using a demagnetizing factor determined by the shape of the test specimen only;
- Method B: the method using a demagnetizing factor determined by the shape and the magnetic susceptibility of the test specimen;
- Method C: the method using an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen.

NOTE 1 In the case of an open magnetic circuit, the self-demagnetizing field generated in the test specimen is generally distributed spatially. In the case there is a need for an accurate squareness of the demagnetization curve, Method C is the better method for high accuracy of squareness evaluation, since this method simulates the actual distribution of the self-demagnetizing field strength.

Table A.1 compares features of Method A, Method B and Method C for the correction accuracy and the calculation time. The correction accuracy is evaluated as the difference between the corrected demagnetization curve and the demagnetization curve measured by means of a permeameter in accordance with IEC 60404-5.

Table A.1 – Features of the demagnetizing field correction methods in comparison with Method B

	Method A	Method B	Method C
Correction accuracy	not high	(reference)	sufficiently high
Calculation time	shorter	(reference)	longer

NOTE 2 These methods are applicable to the demagnetization curve obtained by the pulsed field magnetometer (PFM) method. In the PFM method, corrections of the eddy currents in the test specimen and the magnetic viscosity of the permanent magnet material will be applied to the obtained demagnetization curve in addition to the demagnetizing field correction (See IEC TR 62331:2005, 7.1.6.[3]).

Figure A.2 compares the demagnetization curves corrected using Method A, Method B and Method C. The squareness of the demagnetization curve corrected using Method C is the nearest to the demagnetization curve measured in a closed magnetic circuit in accordance with IEC 60404-5.

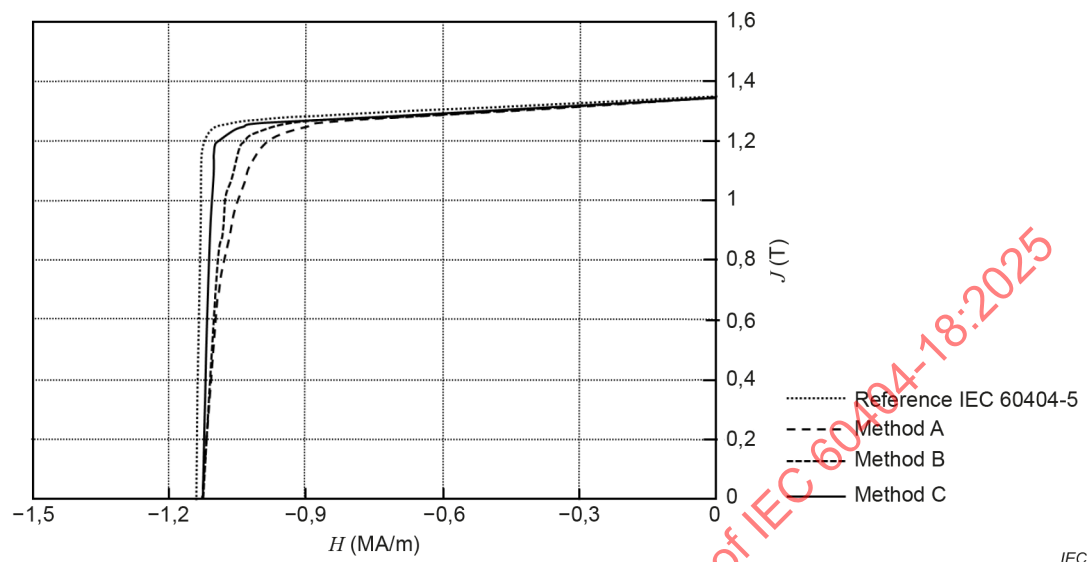


Figure A.2 – Comparison of the demagnetization curves corrected using demagnetizing field correction Method A, Method B and Method C

Annex B (informative)

Details of the demagnetizing field correction

B.1 General

Annex B lists the symbols (Clause B.2) used in the demagnetizing field corrections and describes details of the correction methods (Clause B.3 for Method B and Clause B.4 for Method C) mentioned in Clause 11.

B.2 Symbols

J	is the magnetic polarization, in T;
$\vec{J}$	is the magnetic polarization vector, in T;
χ	is the magnetic susceptibility;
χ_{ext}	is the measured magnetic susceptibility in an open magnetic circuit, $\chi_{\text{ext}} = J / \mu_0 H_{\text{ext}}$;
H_{eff}	is the strength of the effective magnetic field, in A/m;
$\vec{H}_{\text{ext}}$	is the external magnetic field vector, in A/m;
H_{ext}	is the strength of the external magnetic field applied to the magnet, in A/m;
H_d	is the strength of the self-demagnetizing field, in A/m;
$\vec{H}_d$	is the self-demagnetizing field vector, in A/m;
N	is the demagnetizing factor;
N^S	is the demagnetizing factor derived from the magnetic polarization;
N^V	is the demagnetizing factor derived from the strength of the self-demagnetizing field;
σ	is the magnetic charge density on the surface of the magnet, in Wb/m ² ;
$\vec{e}^i$	is a unit normal vector on the surface of the magnet;
μ_0	is the magnetic constant ($4 \pi \times 10^{-7}$) in H/m;
S'	is the surface area of the magnet, in m ² ;
$J(x, y, z)$	is the spatial distribution of the magnetic polarization, in T;
$H_d(x, y, z)$	is the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength, in A/m;
$U(x, y, z)$	is the magnetostatic potential, in A;
$J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H)$	is the measured hysteresis loop in an open magnetic circuit, in T;
$J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H)$	is the calculated hysteresis loop in an open magnetic circuit, in T;
$J_{\text{ideal}}(H)$	is the intrinsic hysteresis loop of the permanent magnet material, in T;
J_r^{exp}	is the remanent magnetic polarization extracted from the data in an open magnetic circuit, in T;
H_c^{exp}	is the coercivity extracted from the data in an open magnetic circuit, in A/m;

$H_{\max}$	is the maximum external magnetic field extracted from the data in an open magnetic circuit, in A/m;
$H_{\min}$	is the minimum external magnetic field extracted from the data in an open magnetic circuit, in A/m;
$dJ_{\text{ave_max}}$	is the maximum value of $\left J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H_{\text{ext}}) - J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}}) \right $ at all H_{ext} , in T;
δ	is the threshold in the convergence calculation of $dJ_{\text{ave_max}}$, in T;
$N(H_{\text{ext}})$	is the factor of $J_{\text{ideal}}(H)$;
$dJ_{\text{err_max}}$	is the maximum value of the residues of $J(x, y, z)$ in all meshes, in T;
ε	is the threshold in the convergence calculation of $dJ_{\text{err_max}}$, in T;
s	is the constant value equal to 1, in m/A;
u	is the constant value equal to 1, in 1/T.

B.3 Method using a demagnetizing factor determined by the shape and magnetic susceptibility of the test specimen (Method B)

The outline of the method proposed by Chen et al. [8] is described as follows. The demagnetizing factor N in the z -direction of a cuboid magnet as illustrated in Figure B.1 is considered.

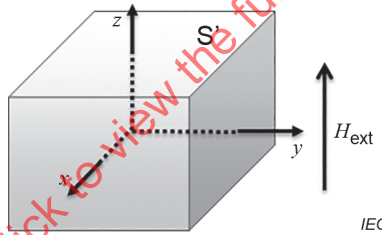


Figure B.1 – Axes of a cuboid magnet

The magnetic susceptibility χ is defined as Formula (B.1).

$$\chi = \frac{J}{\mu_0 H_{\text{eff}}} \quad (\text{B.1})$$

Assuming that the magnetic susceptibility χ is uniform in the magnet and that the directions of the magnetic polarization J , the external magnetic field H_{ext} and the self-demagnetizing field H_d are parallel to the z -direction. The relation between J , H_{ext} and H_d is given as Formula (B.2).

$$J = \mu_0 H_{\text{eff}} = \mu_0 \chi (H_{\text{ext}} + H_d) \quad (\text{B.2})$$

The demagnetizing factor N is defined as Formula (B.3).

$$N = \frac{\mu_0 H_d}{J} \quad (\text{B.3})$$

The magnetic charge density on the surface of the magnet σ is expressed by Formula (B.4).

$$\sigma = \vec{J} \cdot \vec{e} = \mu_0 \chi (\vec{H}_{\text{ext}} + \vec{H}_d) \cdot \vec{e} \quad (\text{B.4})$$

The strength of the self-demagnetizing field H_d due to the magnetic charge on the surface of the magnet is evaluated as Formula (B.5).

$$H_d = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S'} \frac{\sigma(r') (r - r')}{|r - r'|^3} dS' \quad (\text{B.5})$$

where

r is the length from the origin, in m;

r' is the coordinate variable, in m.

By using numerical discretization, Formula (B.6) and Formula (B.7) are derived,

$$H_d = - \sum_{i,j=1}^n D^{ij} \frac{\sigma^i}{\mu_0} \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\sigma^i}{\mu_0 \chi} + \sum_{j=1}^n \vec{e}^i \cdot \vec{D}^{ij} \frac{\sigma^j}{\mu_0} = \vec{e}^i \cdot \vec{H}_{\text{ext}} \quad (\text{B.7})$$

where

$\vec{e}^i$ is the normal unit vector of i -th surface element;

$\vec{D}^{ij}$ is the analytical solution of the integral part in Formula (B.5) related to the i -th and j -th elements;

n is the number of elements;

i, j are the index from 1 to n .

By using Formula (B.2) and Formula (B.3), the demagnetizing factor N^S derived from the magnetic polarization J and the demagnetizing factor N^V derived from the strength of the self-demagnetizing field are written as Formula (B.8) and Formula (B.9), respectively.

$$N^S = \mu_0 \left(\frac{H_{\text{ext}}}{J} - \frac{1}{\mu_0 \chi} \right) \quad (\text{B.8})$$

$$N^V = \frac{-H_d}{\chi(H_{\text{ext}} + H_d)} \quad (\text{B.9})$$

When the magnetic susceptibility χ is given, the magnetic charge density on the surface of the magnet σ can be determined by solving Formula (B.7). The magnetic polarization J is derived from Formula (B.4) and the self-demagnetizing field strength H_d is derived from Formula (B.6). Finally, the demagnetizing factors N^S derived from the magnetic polarization J and the demagnetizing factor N^V derived from the strength of the self-demagnetizing field are calculated from Formula (B.8) and Formula (B.9), respectively.

Formula (B.6) can be numerically solved by using a FEM.

Since generally the demagnetizing factor N^S derived from the magnetic polarization J and the demagnetizing factor N are not equal to the demagnetizing factor N^V derived from the strength of the self-demagnetizing field the demagnetizing factor N is calculated from Formula (B.9).

The demagnetizing factor N is calculated for any value of the magnetic susceptibility χ using Formula (B.10).

$$N = \frac{\mu_0 H_d}{J} = \frac{(1 + N^S \chi) H_d}{\chi H_{\text{ext}}} = N^V \frac{1 + N^S \chi}{1 + N^V N^V} \quad (\text{B.10})$$

By this procedure, the relation of the magnetic susceptibility χ and demagnetizing factor N can be found in literature (see Table 1 of [8]).

B.4 Method using an inverse analysis considering the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the test specimen (Method C)

Figure B.2 illustrates a conceptual diagram of the procedure of Method C [9].

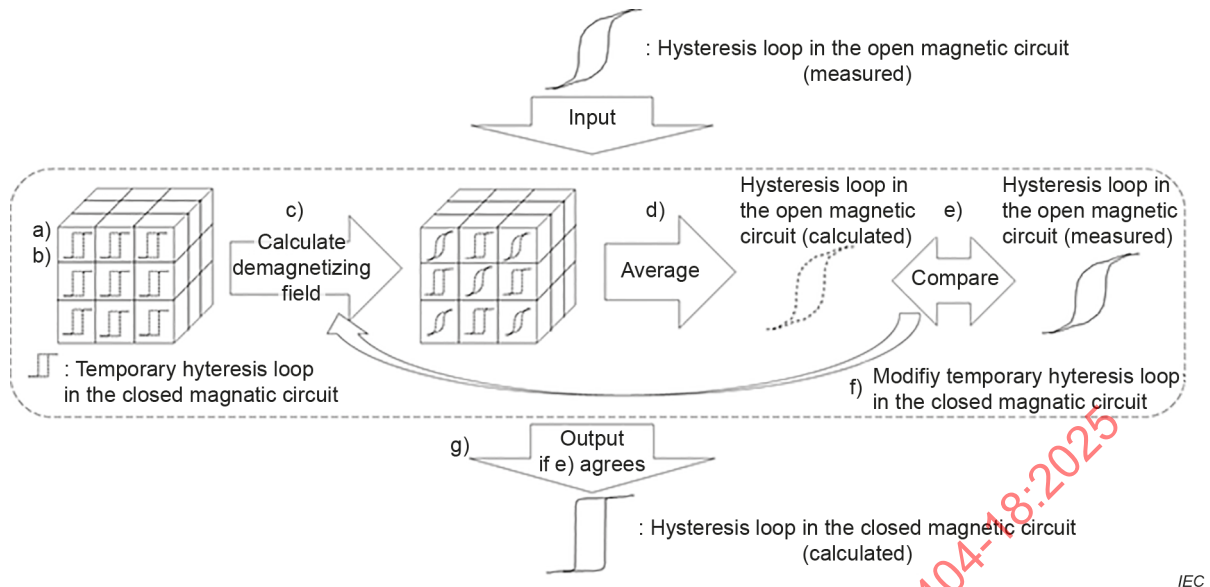


Figure B.2 – Conceptual diagram of the procedure of Method C

The following algorithm is implemented in a computing program and the calculations are executed in a computer. The procedure is written in the flowchart of Figure B.3.

- a) Load a mesh file, for example "mesh.dat", of the magnet model.

The mesh interval is recommended to be more than 10 per dimension of the magnet model so as to consider the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength in the magnet model.

- b) Load an input data file, for example "Jopen.dat", of the data set of the $J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H_{\text{ext}})$ loop obtained by measurement in an open magnetic circuit. The strength of the external magnetic field H_{ext} is discretized. The total number of discretization steps of H_{ext} is recommended to be more than 300 so as to keep enough calculation accuracy.

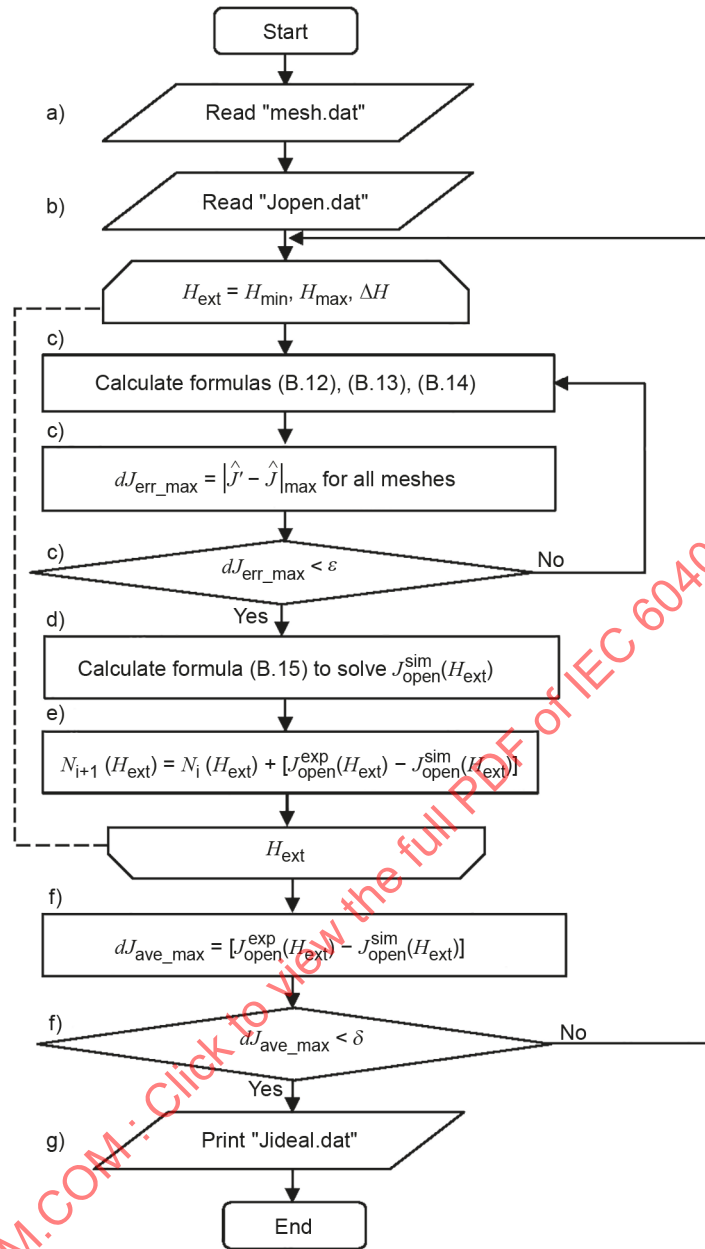
Extract the necessary parameters J_r^{exp} , H_c^{exp} , H_{max} , and H_{min} for the calculation from the data set.

Set the temporary hysteresis loop $J_{\text{ideal}}(H)$ defined in Formula (B.11) to all nodes of the mesh.

$$J_{\text{ideal}}(H) = J_r^{\text{exp}} \tanh\left(s \frac{H - H_c^{\text{exp}}}{1 - N(H)}\right) + \mu_0 (H - H_c^{\text{exp}}) [1 + 0,1N(H)] \quad (\text{B.11})$$

Initialize the value of the parameter $N(H_{\text{ext}})$ to zero.

- c) Calculate the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength $H_d(x, y, z)$ for all nodes of the mesh by using a FEM.



IEC

Figure B.3 – Flowchart of the procedure of Method C

When the spatial distribution of the magnetic polarization $J(x, y, z)$ is given, the spatial distribution of the self-demagnetizing field strength $H_d(x, y, z)$ can be calculated from Formula (B.12) and Formula (B.13).

$$\vec{H}_d(x, y, z) = -\nabla U \quad (\text{B.12})$$

$$\nabla^2 U = \nabla \cdot \frac{\vec{J}(x, y, z)}{\mu_0} \quad (\text{B.13})$$

The magnetic polarization at each node $J(x, y, z)$ is calculated using Formula (B.14).

$$J = J_{\text{ideal}}(H_{\text{ext}} + H_{\text{d}}) \quad (\text{B.14})$$

Repeat calculation of Formula (B.12) to Formula (B.14) until the maximum value of the residues of the magnetic polarization $J(x, y, z)$, $dJ_{\text{err_max}}$, becomes smaller than a predetermined threshold ε in order to get self-consistent spatial distributions of the magnetic polarization $J(x, y, z)$ and the self-demagnetizing field strength $H_{\text{d}}(x, y, z)$. Since the self-demagnetizing field strength has a spatial distribution in the magnet, hysteresis loops at meshes calculated by Formula (B.14) are different from each other, as shown in Figure B.2.

- d) Calculate the hysteresis loop $J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}})$ of the magnet model by averaging all magnetic polarizations of all meshes using Formula (B.15).

$$J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}}) = \frac{1}{V} \int_{V_c} J_{\text{ideal}}(H_{\text{ext}} + H_{\text{d}}) dV' \quad (\text{B.15})$$

- e) Calculate the difference between the measured hysteresis loop $J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H_{\text{ext}})$ and the calculated hysteresis loop $J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}})$ and add the difference into the parameter $N(H_{\text{ext}})$ using Formula (B.16).

$$N_{i+1}(H_{\text{ext}}) = N_i(H_{\text{ext}}) + u \left[J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H_{\text{ext}}) - J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}}) \right] \quad (\text{B.16})$$

- f) Calculate the difference in magnetic polarization, $dJ_{\text{ave_max}}$, between the measured hysteresis loop $J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H_{\text{ext}})$ and the calculated hysteresis loop $J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}})$ using Formula (B.17).

$$dJ_{\text{ave_max}} = \left| J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H_{\text{ext}}) - J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H_{\text{ext}}) \right|_{\text{max}} \quad (\text{B.17})$$

Repeat procedure c) to e) until the value $dJ_{\text{ave_max}}$ becomes smaller than a prescribed threshold δ .

Finish the calculation if $dJ_{\text{ave_max}}$ becomes smaller than the threshold δ , and treat the calculated hysteresis loop $J_{\text{ideal}}(H)$ as the real one.

The calculation accuracy becomes higher as the thresholds δ and ε decrease, but at the same time the duration becomes longer. That is why it is necessary to set the value of the thresholds properly, and in this procedure the values of δ and ε are recommended to be $5,0 \times 10^{-2}$ T and $1,0 \times 10^{-4}$ T, respectively.

- g) Output the data set of the calculated butterfly $J_{\text{ideal}}(H_{\text{ext}})$ loop into "Jideal.dat".

Annex C (informative)

VSM measurement of the test specimen at elevated temperatures

Annex C describes the VSM measurement of the test specimen at temperatures higher than the room temperature using a heating unit described below.

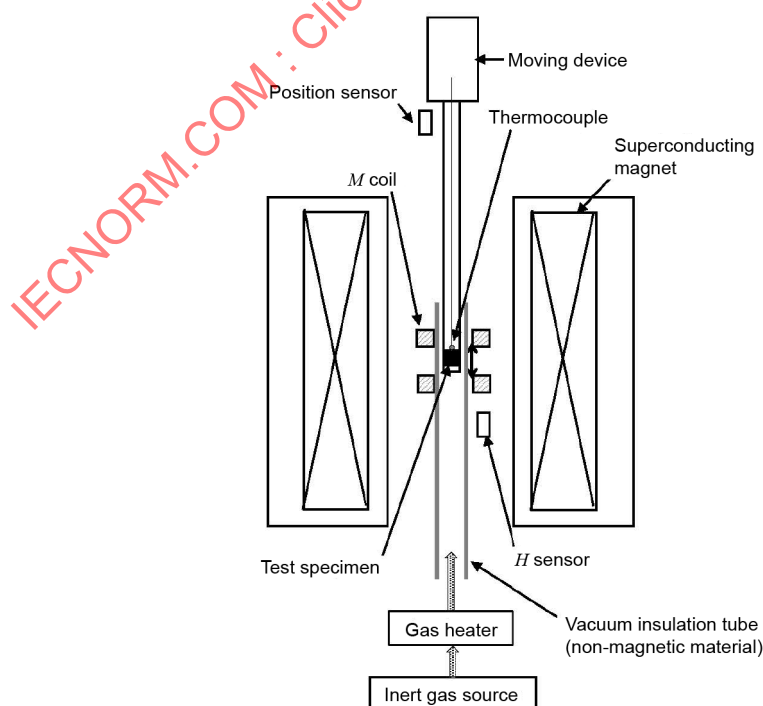
Figure C.1 illustrates a schematic diagram of the heating unit equipped in a test apparatus. The heating unit consists of an inert gas source, a gas heater, a vacuum insulation tube and a non-magnetic thermocouple. A gas compressor or a gas cylinder is usually used for the gas source.

The test specimen is heated by flowing the inert gas supplied from the gas source and heated by the gas heater through inside the vacuum insulation tube from below (see Figure C.1). The inert gas is argon or nitrogen in order to prevent oxidation of the test specimen. The elevated temperature range is typically from a room temperature to 200 °C. The vacuum insulation tube prevents temperature of the M coils from rising. The material of the vacuum insulation tube should be non-magnetic like quartz glass.

The temperature of the test specimen is measured by the non-magnetic thermocouple attached directly to the test specimen through the specimen rod.

The VSM measurement of the test specimen at elevated temperatures has a remarkable feature that the temperature controllability of the test specimen is higher than the measurement with the closed magnetic circuit in accordance with IEC 60404-5, i.e. the permeameter.

In the VSM, the test specimen is attached to the tip of an elongated specimen rod and the thermocouple attached directly to the test specimen. The higher temperature controllability of the test specimen is achieved by its relatively low heat capacity, low heat transfer and the direct temperature measurement. It can be further improved by inserting a low thermal conductive material between the test specimen and the specimen rod.



IEC

Figure C.1 – Schematic diagram of the heating unit equipped in a test apparatus

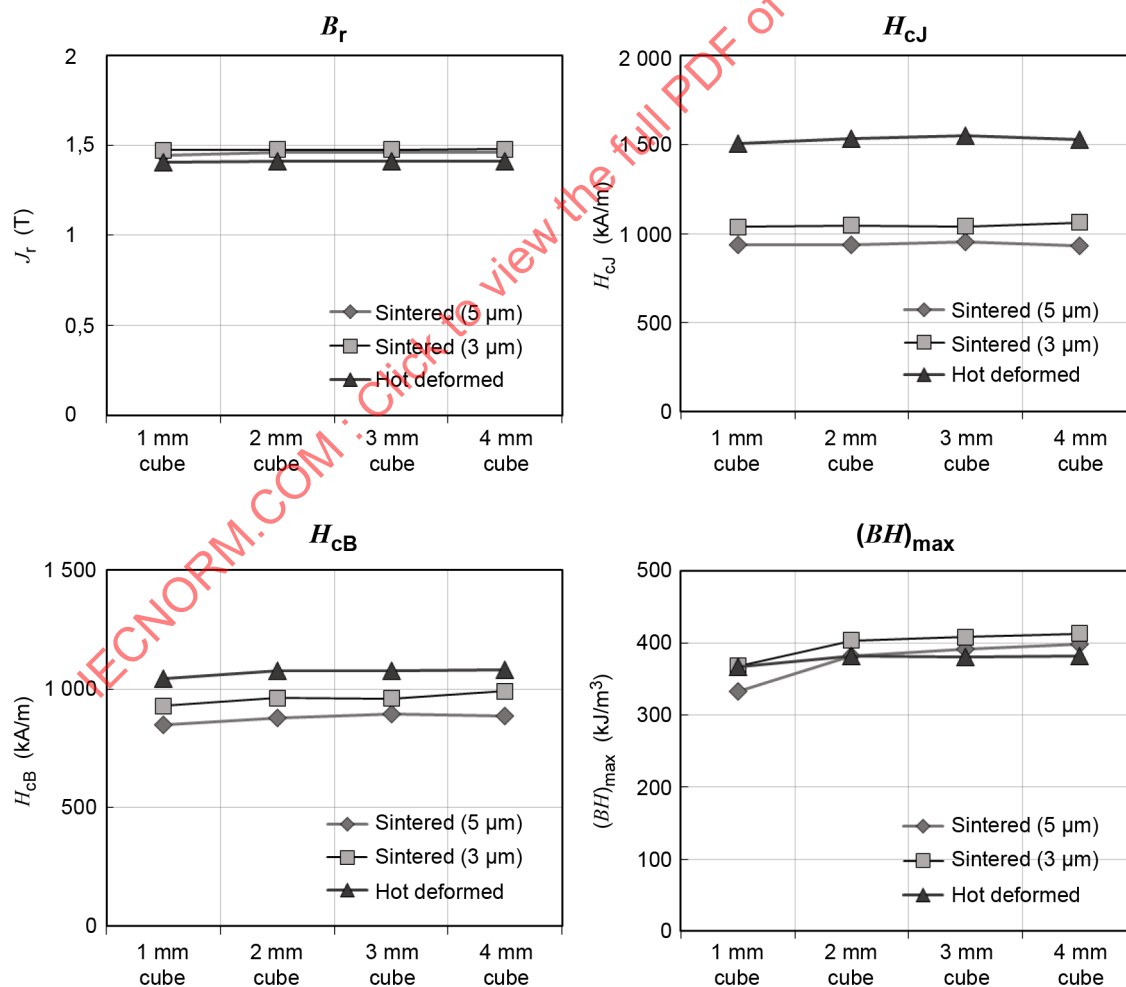
Annex D (informative)

Effect of test specimen dimensions on the magnetic properties

Annex D describes the effect of the test specimen dimensions on the magnetic properties of permanent magnet materials. It gives the limit on the minimum dimension of the test specimens.

It has been found that the surface degradation of Nd-Fe-B magnets depends on the average grain size. Figure D.1 shows the effect of test specimen dimensions on magnetic properties [B_r , H_{cJ} , H_{cB} and $(BH)_{max}$] for two Nd-Fe-B sintered magnets with average grain sizes of 5 μm and 3 μm , and a Nd-Fe-B hot deformed magnet with an average grain size of 200 nm. The test specimens are cubes with side lengths of 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm and 4,0 mm. The test specimens are cut out from bulk permanent magnet materials by electrical discharge machining (EDM) and polished with #1000 Emery paper. Demagnetizing factor employed was $N = 0,264$ (Method A, see Annex A).

As shown in Figure D.1, the effects of surface degradation decrease with decreasing average grain size of permanent magnet materials. The test specimens larger than 3,0 mm cube can be used for evaluation of magnetic properties of the bulk permanent magnet materials.



IEC

Figure D.1 – Effects of test specimen dimensions on magnetic properties [B_r , H_{cJ} , H_{cB} and $(BH)_{max}$] of Nd-Fe-B sintered and hot deformed magnets with different average grain sizes

Annex E (informative)

Comparison of the magnetic properties measured with a superconducting VSM and a permeameter

Annex E describes the comparison of the magnetic properties measured with a superconducting VSM based on IEC TR 63304 and a permeameter based on IEC 60404-5. The sizes of the test specimens were cubes with side strength of 5 mm and 4 mm (5 mm cube and 4 mm cube). The nominal coercivity of the test specimen was around 1,4 MA/m which was evaluated with a permeameter. The specimen size of 5 mm cube is guaranteed by IEC 60404-5. Demagnetizing correction was performed with Method C (see Annex A).

Comparison of magnetic properties including H_{D5} measured with a permeameter and a superconducting VSM is shown in Table E.1. H_{D5} is a property to show the squareness of demagnetization curves. The relative deviation of each magnetic property from the magnetic property of 5 mm cube test specimen measured with a permeameter is also shown in blanket. The measured magnetic properties agree within the range of reproducibility specified in IEC 60404-5. The accuracy between VSM and permeameter methods was confirmed.

Comparison of demagnetization curves measured with a permeameter and a superconducting VSM is also shown in Figure E.1.

Table E.1 – Comparison of magnetic properties measured with a permeameter and a superconducting VSM

Specimen size and measuring method	J_r (T)	H_{cJ} (MA/m)	H_{cB} (MA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	H_{D5} (MA/m)
4 mm Cube VSM	1,314 (+0,23 %)	1,373 (+0,22 %)	0,983 (+0,10 %)	317,4 (+0,47 %)	1,351 (+0,52 %)
5 mm Cube VSM	1,305 (0,00 %)	1,388 (+1,31 %)	0,988 (+0,61 %)	317,5 (+0,51 %)	1,362 (+1,34 %)
4 mm Cube Permeameter	1,311 (+0,46 %)	1,380 (+0,73 %)	0,976 (-0,66 %)	314,7 (-0,38 %)	1,355 (+0,82 %)
5 mm Cube Permeameter	1,305 (0,00 %)	1,370 (0,00 %)	0,982 (0,00 %)	315,9 (0,00 %)	1,344 (0,00 %)

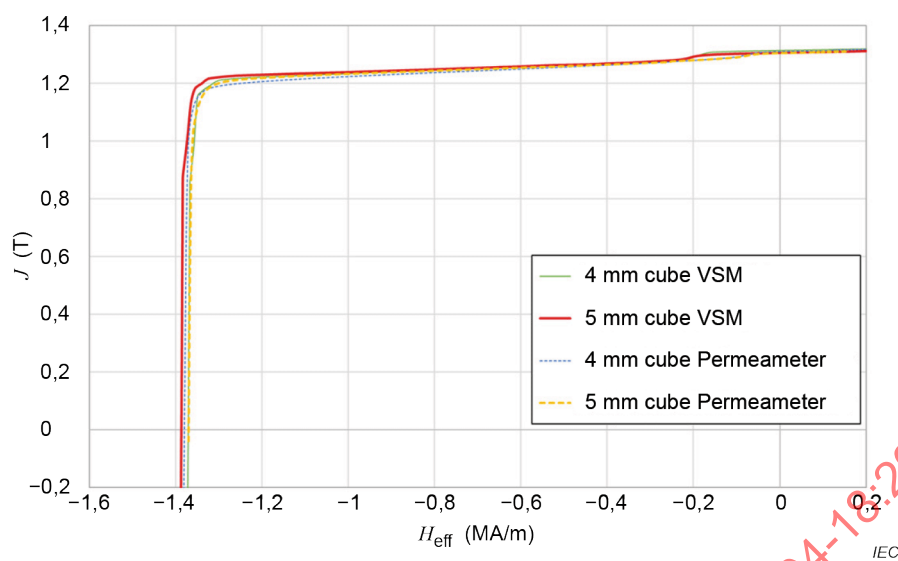


Figure E.1 – Comparison of demagnetization curves measured with a permeameter and a superconducting VSM

Bibliography

- [1] IEC TR 63304:2021, *Methods of measurement of the magnetic properties of permanent magnet (magnetically hard) materials in an open magnetic circuit using a superconducting magnet*
- [2] Result of the international round robin test of magnetic properties of permanent magnets using the SCM-VSM and SCM-Extraction methods (including additional test) to be published
- [3] IEC TR 62331:2005, *Pulsed field magnetometry*
- [4] IEC TR 62517:2009, *Magnetizing behaviour of permanent magnets*
- [5] Certificate of Analysis, Standard Reference Material ® 772a, *Magnetic Moment Standard – Nickel Sphere*, Issue Date: 10 June 2005 (National Institute of Standards and Technology)
- [6] F. G. Jones, R. J. Parker and M. G. Benz: "Demagnetizing Coefficient (B/H) versus Geometry Relationship for High Coercive Force Cobalt – Rare Earth Magnets", IEEE Trans. Magn., Vol. 7, No. 3 (1971) 435
- [7] R. J. Parker: "Advances in Permanent Magnetism", John Wiley & Sons (1990), p.149
- [8] D. Chen, E. Pardo and A. Sanchez: "Demagnetizing Factors for Rectangular Prisms", IEEE Trans. Magn., Vol. 41, No. 6 (2005) 2077
- [9] J. Fujisaki, A. Furuya, H. Shitara, Y. Uehara, K. Kobayashi, Y. Hayashi and K. Ozaki: "Demagnetization Correction Method by Using Inverse Analysis Considering Demagnetizing Field Distribution", IEEE Trans. Magn., Vol. 56, No. 4 (2020) 7516104

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-18:2025

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-18:2025

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	38
INTRODUCTION.....	40
1 Domaine d'application.....	41
2 Références normatives	41
3 Termes, définitions et abréviations	42
3.1 Termes et définitions	42
3.2 Abréviations	43
4 Principe général	43
4.1 Principe de la méthode.....	43
4.2 Aimant supraconducteur (SCM)	45
4.3 Capteur de champ magnétique (capteur H)	45
4.4 Bobine de détection du moment magnétique coulombien (bobine M)	45
4.5 Tige d'éprouvette et dispositif mobile	46
4.6 Dispositifs de mesure et appareil de traitement de données	47
5 Éprouvette.....	47
6 Préparation du mesurage.....	48
6.1 Mesurage du volume de l'éprouvette.....	48
6.2 Aimantation initiale de l'éprouvette à saturation	48
7 Détermination de la polarisation magnétique	48
7.1 Mesurage du moment magnétique coulombien.....	48
7.1.1 Méthode SCM-VSM.....	48
7.1.2 Méthode SCM-extraction	49
7.2 Détermination de la polarisation magnétique.....	49
8 Mesurage du champ magnétique.....	49
9 Étalonnage de la bobine de détection du moment magnétique coulombien (bobine M).....	50
10 Détermination de la courbe de désaimantation	50
11 Correction du champ de désaimantation.....	51
11.1 Généralités	51
11.2 Méthode A: Méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme de l'éprouvette uniquement	51
11.3 Méthode B: Méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme et la susceptibilité magnétique de l'éprouvette	52
11.4 Méthode C: Méthode qui utilise une analyse inverse qui tient compte de la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette	52
12 Détermination des principales propriétés magnétiques	53
12.1 Polarisation magnétique rémanente J_r	53
12.2 Produit d'énergie maximale $(BH)_{\max}$	53
12.3 Coercitivité (H_{cJ} et H_{cB})	53
13 Reproductibilité des mesurages	54
14 Rapport d'essai	54
Annexe A (informative) Correction du champ de désaimantation	55
Annexe B (informative) Détails de la correction du champ de désaimantation	57
B.1 Généralités	57
B.2 Symboles	57

B.3	Méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme et la susceptibilité magnétique de l'éprouvette (Méthode B).....	58
B.4	Méthode qui utilise une analyse inverse qui tient compte de la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette (Méthode C).....	60
Annexe C (informative) Mesurage par VSM de l'éprouvette à des températures élevées.....		64
Annexe D (informative) Effet des dimensions de l'éprouvette sur les propriétés magnétiques.....		66
Annexe E (informative) Comparaison des propriétés magnétiques mesurées avec un VSM supraconducteur et un perméamètre.....		68
Bibliographie		70
Figure 1 – Courbe de désaimantation $J(H)$		42
Figure 2 – Schémas de l'appareillage d'essai		44
Figure 3 – Schémas de la bobine de gradiomètre de premier ordre		46
Figure A.1 – Schéma de la correction du champ de désaimantation		55
Figure A.2 – Comparaison des courbes de désaimantation corrigées à l'aide de la Méthode A, la Méthode B et la Méthode C de correction du champ de désaimantation		56
Figure B.1 – Axes d'un aimant cubique.....		58
Figure B.2 – Schéma conceptuel de la procédure de la Méthode C		61
Figure B.3 – Organigramme de la procédure de la Méthode C		62
Figure C.1 – Schéma de l'unité chauffante incluse dans un appareillage d'essai.....		65
Figure D.1 – Effets des dimensions de l'éprouvette sur les propriétés magnétiques [B_r , H_{cJ} , H_{cB} et $(BH)_{max}$] des aimants Nd-Fe-B frittés et déformés à chaud avec différentes granulométries moyennes		67
Figure E.1 – Comparaison des courbes de désaimantation mesurées avec un perméamètre et un VSM supraconducteur		69
Tableau A.1 – Caractéristiques des méthodes de correction du champ de désaimantation par rapport à la Méthode B		55
Tableau E.1 – Comparaison des propriétés magnétiques mesurées avec un perméamètre et un VSM supraconducteur		68

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

**Partie 18: Matériaux (magnétiques durs) pour aimants permanents –
Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en circuit magnétique
ouvert à l'aide d'un aimant supraconducteur**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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. À 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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 60404-18 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
68/768/CDV	68/775/RVC

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

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

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

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

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

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-18:2025

INTRODUCTION

Les matériaux pour aimants permanents hautes performances à coercitivité élevée (par exemple, les aimants Nd-Fe-B) ont été utilisés dans l'industrie électrique et automobile et leur utilisation augmente rapidement afin de répondre à la nécessité d'améliorer les économies d'énergie et d'accroître l'efficacité des applications électromagnétiques, par exemple les moteurs de traction destinés aux véhicules électriques (VE) et aux véhicules électriques hybrides (VEH), qui font l'objet d'une demande urgente face au problème du réchauffement climatique mondial.

Cependant, aucune méthode normalisée ne peut déterminer toutes les propriétés magnétiques des matériaux pour aimants permanents hautes performances dont la coercitivité H_{cJ} est supérieure à 2 MA/m pour répondre aux besoins de l'industrie. La méthode spécifiée dans l'IEC 60404-5, qui est une méthode de mesure en circuit magnétique fermé, peut conduire à des erreurs de mesure significatives pour le mesurage de $H_{cJ} \geq 1,6$ MA/m en raison d'une saturation magnétique dans certaines parties des faces polaires de la culasse (voir l'IEC 60404-5).

Afin de résoudre le problème, plusieurs méthodes de mesure en circuit magnétique ouvert sans culasse ont été établies. Les méthodes qui utilisent un aimant supraconducteur (SCM, *Superconducting Magnet*) sont présumées résoudre ce problème et permettre d'obtenir des mesures exactes des matériaux pour aimants permanents hautes performances (voir l'IEC TR 63304 [1]¹).

Comme le mesurage en circuit magnétique ouvert est fortement compromis par le champ d'autodésaimantation de l'éprouvette, une correction de l'influence du champ d'autodésaimantation (correction de champ de désaimantation) sur la courbe de désaimantation obtenue en circuit magnétique ouvert est indispensable.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 18: Matériaux (magnétiques durs) pour aimants permanents – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en circuit magnétique ouvert à l'aide d'un aimant supraconducteur

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 a pour objet de définir le principe général et les détails techniques des méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu des matériaux pour aimants permanents en circuit magnétique ouvert à l'aide d'un aimant supraconducteur (SCM).

Cette méthode s'applique aux matériaux pour aimants permanents, tels que ceux spécifiés dans l'IEC 60404-8-1, dont les propriétés sont présumées homogènes sur l'ensemble de leur volume.

Il existe deux méthodes:

- la méthode SCM-magnétomètre à échantillon vibrant (VSM, *Vibrating Sample Magnetometer*);
- la méthode SCM-extraction.

Le présent document spécifie également les méthodes de correction de l'influence du champ d'autodésaimantation de l'éprouvette sur la courbe de désaimantation obtenue en circuit magnétique ouvert. Les propriétés magnétiques sont déterminées à partir de la courbe de désaimantation corrigée.

NOTE 1 Ces méthodes SCM peuvent déterminer les propriétés magnétiques des matériaux pour aimants permanents hautes performances dont la coercitivité est supérieure à 2 MA/m. Pour les matériaux magnétiques dont la coercitivité est supérieure à 1,6 MA/m, les méthodes de mesure en circuit magnétique fermé selon l'IEC 60404-5 peuvent conduire à une erreur de mesure significative en raison d'une saturation magnétique dans certaines parties des faces polaires de la culasse (voir l'IEC 60404-5).

NOTE 2 Il existe une autre méthode de mesure en circuit magnétique ouvert, à savoir celle du magnétomètre à champ pulsé (PFM, *Pulsed Field Magnetometer*), qui est décrite dans l'IEC TR 62331 [3]. La méthode PFM est la méthode de mesure des propriétés magnétiques des matériaux pour aimants permanents qui applique le champ magnétique pulsé en lieu et place du champ magnétique en courant continu et diffère des méthodes décrites dans le présent document. La méthode PFM mesure la forte réponse magnétique en courant alternatif d'une éprouvette dans un champ magnétique pulsé. Par conséquent, une correction supplémentaire est indispensable pour éliminer l'influence des courants de Foucault sur l'éprouvette et la viscosité magnétique des matériaux magnétiques afin d'obtenir des propriétés équivalentes aux propriétés magnétiques en courant continu.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-121:1998, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Partie 121: Électromagnétisme*

IEC 60050-151, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Partie 151: Dispositifs électriques et magnétiques*

IEC 60050-221:1990, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Partie 221: Matériaux et composants magnétiques*

IEC 60404-5, *Matériaux magnétiques – Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques*

IEC 60404-8-1, *Matériaux magnétiques – Partie 8-1: Spécifications pour matériaux particuliers – Matériaux (magnétiques durs) pour aimants permanents*

3 Termes, définitions et abréviations

3.1 Termes et définitions

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

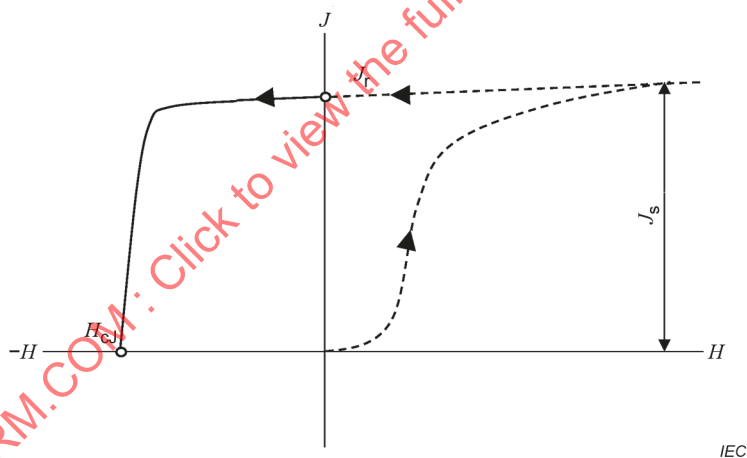
L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

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

3.1.1

courbe de désaimantation

partie d'un cycle d'hystérésis dans laquelle la polarisation magnétique passe de la polarisation magnétique rémanente à zéro par une variation monotone du champ magnétique appliqué, comme cela est représenté à la Figure 1



Légende

- J_s polarisation magnétique à saturation, en T
- J_r polarisation magnétique rémanente, en T
- H_{cJ} coercitivité relative à la polarisation magnétique, en A/m

Figure 1 – Courbe de désaimantation $J(H)$

Note 1 à l'article: Une courbe de désaimantation peut être tracée à partir d'une saturation magnétique proche.

[SOURCE: IEC 60050-121:1998, 121-12-72, modifié – l'expression "induction magnétique" a été remplacée par "polarisation magnétique", et la Note 1 à l'article et la Figure 1 ont été ajoutées.]

3.1.2**moment magnétique coulombien** **m**

grandeur vectorielle égale à l'intégrale de volume de la polarisation magnétique dans un volume donné

[SOURCE: IEC 60050-221:1990, 221-01-07, modifié – le symbole j a été remplacé par le symbole m qui est utilisé industriellement et la note a été supprimée.]

3.1.3**bobine M**

bobine de détection du moment magnétique coulombien

3.2 Abréviations

CAN	convertisseur analogique-numérique
VE	véhicule électrique
MEF	méthode des éléments finis
VEH	véhicule électrique hybride
NMR (Nuclear Magnetic Resonance)	résonance magnétique nucléaire
PC (Personal Computer)	ordinateur personnel
PFM (Pulsed Field Magnetometer)	magnétomètre à champ pulsé
SCM (Superconducting Magnet)	aimant supraconducteur
SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)	dispositif supraconducteur à interférence quantique
VSM (Vibrating Sample Magnetometer)	magnétomètre à échantillon vibrant

4 Principe général**4.1 Principe de la méthode**

La Figure 2 représente les schémas de l'appareillage d'essai qui correspondent à a) la méthode SCM-VSM et b) la méthode SCM-extraction. L'appareillage d'essai est constitué d'un aimant supraconducteur (SCM), d'un dispositif mobile, d'une tige d'éprouvette, d'un capteur de champ magnétique (ci-après capteur H), d'une bobine de détection du moment magnétique coulombien (ci-après bobine M), de dispositifs de mesure et d'un appareil de traitement de données (PC).

L'axe du champ magnétique en courant continu généré par le SCM doit être vertical et coaxial avec la bobine M et la tige d'éprouvette, de sorte que la direction de l'aimantation soit parallèle à l'axe de la tige d'éprouvette. La plage de déplacement de l'éprouvette doit être située dans une zone où le champ magnétique est uniforme, avec une tolérance de ± 1 % au centre du SCM. Le capteur H doit être placé dans une position où l'influence du moment magnétique coulombien de l'éprouvette peut être ignorée.

L'éprouvette doit être solidement fixée à l'extrémité inférieure de la tige d'éprouvette afin d'éviter tout déplacement intempestif de l'éprouvette dans le champ magnétique et placée au centre du SCM, comme cela est représenté à la Figure 2.

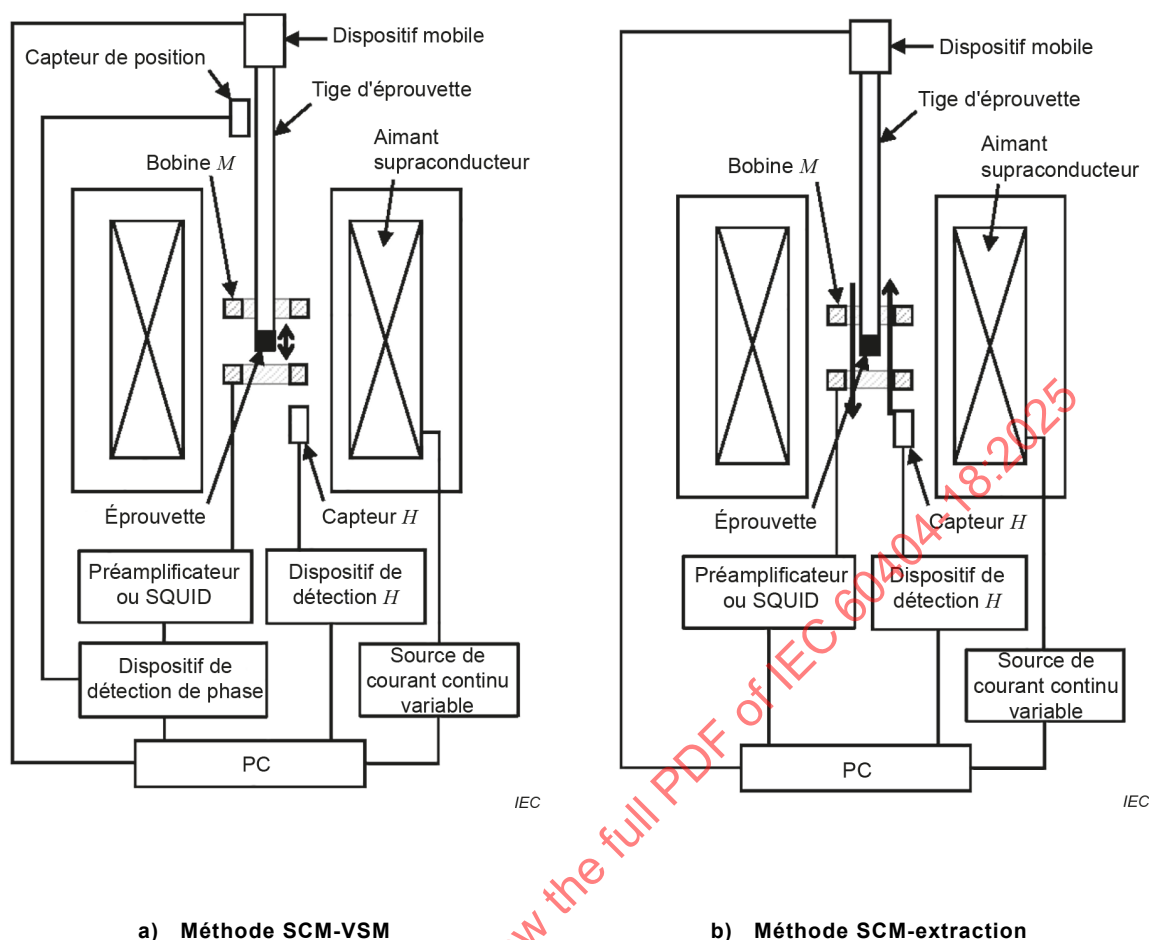


Figure 2 – Schémas de l'appareillage d'essai

L'éprouvette doit être initialement aimantée à saturation (voir 6.2) et maintenue à l'état rémanent. Un champ magnétique en courant continu doit être appliqué à l'éprouvette dans la direction opposée à celle utilisée pour l'aimantation initiale. Le champ magnétique est mesuré par le capteur H (voir 4.3).

Le moment magnétique coulombien de l'éprouvette est détecté par la tension induite dans la bobine M en raison du déplacement de l'éprouvette (voir 4.4). La polarisation magnétique de l'éprouvette est calculée à partir du moment magnétique coulombien et du volume de l'éprouvette (voir 7.2). Pour les aspects relatifs à l'étalonnage, voir l'Article 9.

Il existe deux méthodes différentes pour les modes de déplacement de l'éprouvette:

- a) la méthode SCM-VSM: l'éprouvette est soumise à des vibrations de faible amplitude dans la bobine M ;
- b) la méthode SCM-extraction: l'éprouvette est extraite à travers la bobine M .

Les mesures doivent être réalisées à une température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, sauf indication contraire.

NOTE Le mesurage à des températures supérieures à la température ambiante peut être effectué à l'aide d'une unité chauffante (voir l'Annexe C).

Pour les matériaux pour aimants permanents connus pour avoir des coefficients de température $\alpha(J_r)$ et $\alpha(H_{cJ})$ importants, la température de l'éprouvette doit être contrôlée à $\pm 1 ^\circ\text{C}$ dans la plage comprise entre $19 ^\circ\text{C}$ et $27 ^\circ\text{C}$ pendant les mesures (voir l'IEC 60404-5). La température de l'éprouvette doit être mesurée au moyen d'un capteur de température non magnétique directement fixé à l'éprouvette.

La courbe de désaimantation obtenue en circuit magnétique ouvert est fortement influencée par le champ d'autodésaimantation de l'éprouvette qui s'oppose à l'aimantation.

Afin de déterminer la courbe de désaimantation intrinsèque du matériau pour aimants permanents, une correction de l'influence du champ d'autodésaimantation (ci-après la correction du champ de désaimantation) doit être appliquée à la courbe de désaimantation obtenue (voir Article 11). Les propriétés magnétiques du matériau pour aimants permanents doivent être déterminées à partir de la courbe de désaimantation corrigée.

4.2 Aimant supraconducteur (SCM)

Une source de courant continu variable fournit un courant continu à la bobine supraconductrice, avec un niveau de bruit de tension suffisamment faible (voir Figure 2). La source de courant doit être d'un type bipolaire qui peut commuter en continu entre une polarité positive et une polarité négative.

Le SCM doit avoir une capacité suffisante pour générer un champ magnétique qui permet de mesurer les propriétés magnétiques des matériaux pour aimants permanents hautes performances dont la coercitivité est supérieure à 2 MA/m, par exemple des aimants Nd-Fe-B frittés. Il convient que la capacité soit supérieure à 4,8 MA/m (6 T en induction magnétique).

Il existe deux types de SCM: le SCM métallique conventionnel constitué d'une bobine supraconductrice métallique et le SCM céramique constitué d'une bobine supraconductrice céramique à haute température [1].

Le SCM céramique est recommandé plutôt que le SCM métallique conventionnel, afin de réduire à quelques minutes le temps nécessaire pour obtenir une courbe de désaimantation et d'éliminer l'utilisation d'hélium liquide coûteux et de ses installations connexes. Cela s'avère particulièrement opportun pour un usage industriel [1].

NOTE L'appareillage d'essai avec le SCM céramique qui peut traiter des éprouvettes de taille industrielle est disponible dans le monde entier.

La zone du champ magnétique uniforme généré au centre du SCM doit être suffisamment grande pour inclure l'espace occupé par l'éprouvette en mouvement.

4.3 Capteur de champ magnétique (capteur H)

Un capteur H , par exemple une sonde de Hall, mesure le champ magnétique avec un dispositif de détection H approprié (voir Figure 2). Le capteur H doit être étalonné par une méthode appropriée telle que la résonance magnétique nucléaire (NMR).

Dans le cas d'un SCM dont le champ magnétique est étalonné pour le courant magnétisant, le champ magnétique peut être déterminé à partir du courant magnétisant fourni au SCM. Cependant, une hystérésis même faible doit être évitée entre le courant magnétisant et le champ magnétique du SCM. Si cela n'est pas possible, il convient d'évaluer précisément la relation entre le courant magnétisant et le champ magnétique par rapport à l'augmentation et à la diminution du courant magnétisant.

L'erreur totale de mesure du champ magnétique doit être inférieure à ± 1 %.

4.4 Bobine de détection du moment magnétique coulombien (bobine M)

La bobine M mesure le moment magnétique coulombien de l'éprouvette par la tension induite dans celle-ci (voir Figure 2). La bobine M doit être enroulée de manière coaxiale avec l'axe du champ magnétique et placée de manière symétrique par rapport au centre du champ magnétique. Les conducteurs électriques de la bobine M doivent être étroitement torsadés pour éviter les erreurs provoquées par les tensions induites dans les boucles des conducteurs.

La tension induite dans la bobine M doit être étalonnée à l'aide d'une éprouvette normalisée constituée d'une sphère de nickel et l'influence de la forme et des dimensions de l'éprouvette sur la tension doit être vérifiée (voir Article 9).

L'erreur totale de mesure du moment magnétique coulombien doit être inférieure à ± 1 %.

La bobine M utilisée dans le présent document est la bobine de gradiomètre de premier ordre, qui doit être composée d'une bobine supérieure et d'une bobine inférieure connectées électriquement avec des polarités inverses, comme cela est représenté à la Figure 3. La bobine de gradiomètre de deuxième ordre associée à un circuit SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*, dispositif supraconducteur à interférence quantique) peut également être utilisée pour la bobine M [1].

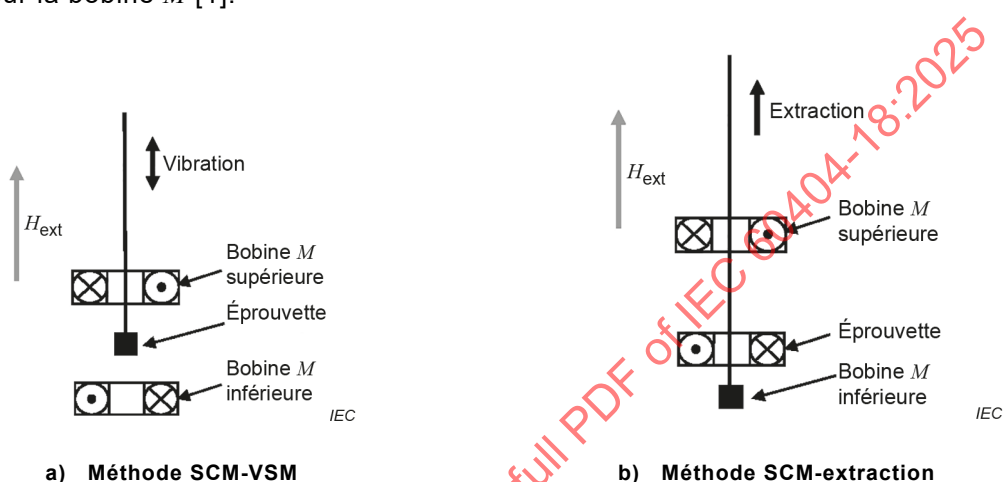


Figure 3 – Schémas de la bobine de gradiomètre de premier ordre

4.5 Tige d'éprouvette et dispositif mobile

La tige d'éprouvette doit être non magnétique et avoir une rigidité élevée pour maintenir l'éprouvette sur l'axe du champ magnétique sans trembler.

La tige d'éprouvette doit être insérée verticalement dans le SCM et connectée au dispositif mobile à l'extrémité supérieure, comme cela est représenté à la Figure 2.

Le dispositif mobile peut être un moteur linéaire, une bobine acoustique ou tout autre système qui peut déplacer ou faire vibrer la tige d'éprouvette de manière linéaire le long de l'axe du champ magnétique.

Les modes de déplacement de l'éprouvette sont les suivants.

a) Méthode SCM-VSM

L'éprouvette est soumise à des vibrations le long de l'axe du champ magnétique à une fréquence fixe et une amplitude fixe suffisamment inférieure à la longueur de la bobine M . La fréquence est normalement comprise entre 20 Hz et 200 Hz et l'amplitude est habituellement comprise entre 0,5 mm et 2 mm (voir Figure 3 a)).

b) Méthode SCM-extraction

L'éprouvette est extraite à travers la bobine M le long de l'axe du champ magnétique. Le point de départ de l'éprouvette en mouvement est situé au-dessous de la bobine M inférieure ou au-dessus de la bobine M supérieure (voir Figure 3 b)).

4.6 Dispositifs de mesure et appareil de traitement de données

La tension induite dans la bobine M étalonnée en raison du déplacement de l'éprouvette est proportionnelle au moment magnétique coulombien de l'éprouvette. Le signal de la bobine M est transmis à un préamplificateur. Dans le cas d'une bobine de gradiomètre de deuxième ordre, un circuit SQUID doit être utilisé pour intégrer le signal (voir Figure 2).

Dans la méthode SCM-VSM, le signal amplifié est transmis à un dispositif de détection de phase, tel qu'un amplificateur synchrone, pour produire l'amplitude du signal synchronisé avec la fréquence de vibration de l'éprouvette. Le signal de sortie est transmis à l'appareil de traitement de données.

NOTE Dans la méthode SCM-VSM, il n'y a pas de dérive dans le signal du moment magnétique coulombien, du fait de l'utilisation d'un dispositif de détection de phase (amplificateur synchrone).

Dans la méthode SCM-extraction, le signal amplifié est directement transmis à l'appareil de traitement de données.

Le signal de sortie du dispositif de détection H , qui est proportionnel au champ magnétique, est transmis à l'appareil de traitement de données.

L'appareil de traitement de données est généralement composé d'un numériseur et d'un processeur de signal numérique pour la détermination des propriétés magnétiques. Le numériseur convertit les signaux d'entrée en données numériques simultanément avec des convertisseurs analogique-numérique (CAN). Les CAN doivent avoir une résolution d'au moins 16 bits.

Le processeur de signal numérique est généralement un ordinateur personnel (PC) et calcule les propriétés magnétiques à partir des signaux numérisés du moment magnétique coulombien et du champ magnétique.

5 Éprouvette

La forme de l'éprouvette doit être cylindrique ou cubique.

Le rapport de la longueur L à la dimension D , c'est-à-dire L/D , doit être de 1,00 à $\pm 0,05$, où D est la longueur de l'arête de l'éprouvette cubique ou le diamètre de l'éprouvette cylindrique. Dans le cas d'une éprouvette cubique avec $L/D = 1,00$, la direction d'aimantation doit être marquée correctement pendant la préparation de l'éprouvette. La direction d'aimantation doit être parallèle à la longueur L de l'éprouvette.

NOTE 1 Une légère différence entre L et D pour une éprouvette cubique permet d'identifier facilement la direction d'aimantation de l'éprouvette.

Les dimensions de l'éprouvette, c'est-à-dire L et D , doivent être supérieures ou égales à 3 mm, mais suffisamment inférieures à celles de la bobine M [1].

L'éprouvette doit être soigneusement découpée à la dimension prédéterminée dans un gros bloc du matériau pour aimants permanents. Tout endommagement de sa surface qui peut détériorer les propriétés magnétiques doit, autant que possible, être évité.

Des éprouvettes d'une dimension inférieure à 3 mm peuvent être utilisées, à condition que la couche de surface endommagée soit négligeable ou qu'un traitement spécial soit appliqué à la couche de surface endommagée afin de rétablir les propriétés magnétiques intrinsèques.

Il convient de marquer l'éprouvette d'une flèche pour indiquer la direction de l'aimantation afin de faciliter la fixation de l'éprouvette à la tige d'éprouvette.

NOTE 2 L'épaisseur des matériaux pour aimants permanents utilisés dans l'industrie a diminué avec l'amélioration de leurs propriétés magnétiques, et des aimants permanents d'une épaisseur inférieure à 5 mm sont désormais largement utilisés dans l'industrie. Il est possible de mesurer les propriétés magnétiques des matériaux pour aimants permanents avec des éprouvettes obtenues à partir de ces aimants par la méthode d'essai conventionnelle décrite dans l'IEC 60404-5, qui définit les dimensions des éprouvettes comme étant supérieures ou égales à 5 mm. Par conséquent, une nouvelle méthode d'essai pour mesurer les propriétés magnétiques des matériaux pour aimants permanents dans le cas d'une éprouvette de plus petite taille a été exigée par l'industrie. Fondamentalement, pour les éprouvettes cubiques de dimension inférieure à 5 mm, la reproductibilité du mesurage en circuit magnétique fermé conventionnel se dégrade sous l'influence de l'entrefer entre l'éprouvette et les pièces polaires. L'entrefer causé par une mauvaise précision d'usinage génère un champ de désaimantation local dans l'éprouvette et tend à créer un risque de fissuration. Pour ces raisons, le mesurage en circuit magnétique ouvert est exigé dans l'industrie.

6 Préparation du mesurage

6.1 Mesurage du volume de l'éprouvette

Le volume V de l'éprouvette doit être calculé à partir de la masse et de la densité de l'éprouvette. La masse de l'éprouvette doit être déterminée avec exactitude au moyen d'une balance électronique étalonnée. La densité de l'éprouvette doit être déterminée avec exactitude à l'aide d'un gros bloc de matériau pour aimants permanents, par exemple en mesurant le volume d'eau déplacé selon le principe d'Archimède.

Le volume V peut également être calculé à partir des dimensions de l'éprouvette, mesurées au moyen d'un micromètre étalonné avec quatre chiffres significatifs.

Le volume V de l'éprouvette doit être déterminé avec une tolérance de ± 1 %.

6.2 Aimantation initiale de l'éprouvette à saturation

Avant le mesurage, l'éprouvette doit être aimantée à saturation dans un champ magnétique en courant continu H_{mag} .

S'il n'est pas possible d'aimanter l'éprouvette à saturation dans l'appareillage d'essai, celle-ci doit être aimantée à saturation à l'extérieur de l'appareillage d'essai dans une bobine supraconductrice ou un système d'aimantation impulsioneille, conformément à l'IEC 60404-5.

Les valeurs recommandées pour le champ magnétique en courant continu H_{mag} pour différents matériaux pour aimants permanents peuvent être consultées dans l'IEC TR 62517 [4].

7 Détermination de la polarisation magnétique

7.1 Mesurage du moment magnétique coulombien

7.1.1 Méthode SCM-VSM

Dans la méthode SCM-VSM, l'éprouvette doit être soumise à des vibrations à une fréquence fixe et à une amplitude fixe, puis la tension de sortie du dispositif de détection de phase doit être mesurée (voir 4.6).

Le moment magnétique coulombien m doit être calculé à l'aide de la Formule (1):

$$m = \frac{C_V U_V}{a \cdot f} \quad (1)$$

où

m est le moment magnétique coulombien, en $\text{Wb} \cdot \text{m}$;

U_V est la tension de sortie du dispositif de détection de phase, en V;

C_V est une constante, en m^2 ;

a est l'amplitude de la vibration, en m ;

f est la fréquence de vibration, en Hz.

La constante C_V doit être déterminée par un étalonnage de la bobine M (voir Article 9).

7.1.2 Méthode SCM-extraction

Dans la méthode SCM-extraction, l'éprouvette doit être extraite à travers la bobine M . La tension de sortie du préamplificateur ou du circuit SQUID doit être mesurée (voir 4.6).

Le moment magnétique coulombien doit être calculé à l'aide de la Formule (2):

$$m = C_1 \int_{t_1}^{t_2} U(t) dt \quad (2)$$

où

m est le moment magnétique coulombien, en $\text{Wb} \cdot \text{m}$;

$U(t)$ est la tension de sortie du préamplificateur ou du circuit SQUID, en V;

t_1 est l'instant où l'éprouvette traverse la partie inférieure de la bobine M et $U(t_1) = 0$, en s;

t_2 est l'instant où l'éprouvette traverse la partie supérieure de la bobine M et $U(t_2) = 0$, en s;

C_1 est une constante, en m .

La constante C_1 doit être déterminée par un étalonnage de la bobine M (voir Article 9).

7.2 Détermination de la polarisation magnétique

La polarisation magnétique J doit être calculée à partir du moment magnétique coulombien m et du volume de l'éprouvette V selon la Formule (3).

$$J = \frac{m}{V} \quad (3)$$

où

J est la polarisation magnétique, en T;

m est le moment magnétique coulombien, en $\text{Wb} \cdot \text{m}$;

V est le volume de l'éprouvette, en m^3 .

8 Mesurage du champ magnétique

Le champ magnétique H qui correspond à la polarisation magnétique doit être mesuré par le capteur H étalonné, par exemple une sonde de Hall, et le dispositif de détection H (voir Figure 2).

La dépendance de l'instrument de mesure par rapport à la température doit être prise en compte.

9 Étalonnage de la bobine de détection du moment magnétique coulombien (bobine M)

L'étalonnage de la bobine M doit être effectué par mesurage d'une éprouvette normalisée constituée d'une sphère de nickel pour laquelle le moment magnétique coulombien m à une température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ et à un champ magnétique appliqué de 398 kA/m (5 kOe) est certifié par un laboratoire d'étalonnage national ou agréé avec le coefficient de température [5]. L'éprouvette normalisée doit être composée de nickel d'une pureté supérieure ou égale à 99,9 % et soumise à un recuit de relaxation sans oxydation. L'espace occupé par l'éprouvette normalisée, en incluant son déplacement pendant le mesurage, doit être suffisamment inférieur à la zone de champ uniforme de la bobine SCM. Dans ce cas, le champ magnétique généré par l'éprouvette normalisée est un champ dipolaire parfait et identique au champ généré par un dipôle idéal au centre de l'éprouvette normalisée sphérique.

NOTE Un moment magnétique de saturation de l'éprouvette normalisée n'est pas approprié pour l'étalonnage dans le présent document.

La constante C_V de la Formule (1) ou C_1 de la Formule (2) doit être déterminée de sorte que le moment magnétique coulombien mesuré à un champ magnétique de 398 kA/m (5 kOe) corresponde à la valeur certifiée du moment magnétique coulombien de la sphère de nickel. La différence entre les températures ambiantes à l'étalonnage et celle spécifiée dans la certification doit être compensée par l'utilisation du coefficient de température spécifié dans la certification.

La dépendance à la forme et aux dimensions du moment magnétique coulombien mesuré de l'éprouvette doit être vérifiée et compensée. La vérification doit être effectuée par comparaison des mesures obtenues à l'aide d'une éprouvette normalisée constituée d'une sphère de nickel et d'un cube ou d'un cylindre de nickel de même forme et de mêmes dimensions que l'éprouvette. Le cube ou le cylindre de nickel doit être composé du même matériau de nickel d'une pureté supérieure ou égale à 99,9 % et soumis à un recuit de relaxation sans oxydation.

10 Détermination de la courbe de désaimantation

La courbe de désaimantation fait partie du cycle d'hystérésis $J(H)$ (voir Figure 1). La procédure de mesurage de la courbe de désaimantation est la suivante.

Tout d'abord, l'éprouvette doit être placée au centre du SCM, comme cela est représenté à la Figure 2. La position de l'éprouvette doit être réglée verticalement et horizontalement au centre de la bobine M en examinant le signal de la bobine M dans le cas d'une aimantation hors saturation.

L'éprouvette doit être initialement aimantée à saturation et maintenue à l'état rémanent. Lorsque la saturation initiale de l'éprouvette est réalisée dans l'appareillage d'essai, le courant magnétisant fourni au SCM doit être augmenté pour aimanter l'éprouvette à saturation, puis le courant magnétisant doit être réduit à zéro pour atteindre un champ magnétique externe nul.

Un champ magnétique en courant continu doit être appliqué à l'éprouvette dans la direction opposée à celle utilisée pour l'aimantation initiale et augmenté jusqu'à ce que le champ magnétique dépasse la coercitivité H_{cJ} .

La vitesse de variation du champ magnétique doit être suffisamment lente, conformément à l'IEC 60404-5, pour éviter une viscosité magnétique et des courants de Foucault importants susceptibles de compromettre la valeur mesurée.

Le moment magnétique coulombien de l'éprouvette doit être mesuré en soumettant l'éprouvette à des vibrations dans la bobine M (méthode SCM-VSM) ou en extrayant l'éprouvette à travers la bobine M (méthode SCM-extraction) (voir 7.1). Le champ magnétique correspondant doit être mesuré.

La courbe de désaimantation est obtenue soit à partir d'un mesurage continu avec une variation du champ magnétique soit à partir de mesurages point par point à des champs magnétiques discrets.

La valeur de la polarisation magnétique est déterminée à partir de la valeur mesurée du moment magnétique coulombien (voir 7.2), puis la courbe de désaimantation $J(H)$ est tracée en reliant les valeurs de la polarisation magnétique aux valeurs correspondantes du champ magnétique.

La courbe de désaimantation obtenue est fortement influencée par le champ d'autodésaimantation de l'éprouvette. Par conséquent, afin de déterminer la courbe de désaimantation intrinsèque et les principales propriétés magnétiques, la correction du champ de désaimantation doit être appliquée à la courbe de désaimantation obtenue.

11 Correction du champ de désaimantation

11.1 Généralités

Il existe trois méthodes de correction du champ de désaimantation:

- Méthode A: méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme de l'éprouvette uniquement;
- Méthode B: méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme et la susceptibilité magnétique de l'éprouvette;
- Méthode C: méthode qui utilise une analyse inverse qui tient compte de la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette.

NOTE Les différences entre les caractéristiques de ces trois méthodes sont décrites à l'Annexe A.

11.2 Méthode A: Méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme de l'éprouvette uniquement

La Méthode A prend pour hypothèse que le champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette est uniforme et déterminé par la forme de l'éprouvette uniquement. Le champ d'autodésaimantation doit être calculé à partir de la Formule (4).

$$H_d = -N \frac{J}{\mu_0} \quad (4)$$

où

H_d est l'intensité du champ d'autodésaimantation, en A/m;

N est le facteur de champ démagnétisant;

J est la polarisation magnétique, en T;

μ_0 est la constante magnétique, en H/m; $\mu_0 \cong 4 \pi \times 10^{-7}$.

Le facteur de champ démagnétisant N doit être calculé à partir du coefficient de perméance P_c du matériau pour aimants permanents, qui est déterminé en fonction de la forme de l'éprouvette [6],[7].

La courbe de désaimantation obtenue $J(H_{\text{ext}})$ doit être convertie en courbe de désaimantation $J(H_{\text{eff}})$ à l'aide de la Formule (4) et de la Formule (5).

$$H_{\text{eff}} = H_{\text{ext}} + H_{\text{d}} \quad (5)$$

où

H_{eff} est le champ magnétique effectif, en A/m;

H_{ext} est le champ magnétique externe, en A/m;

H_{d} est le champ magnétique de désaimantation, en A/m.

NOTE Il existe une répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans les aimants réels, à l'exception du cas où la forme de l'éprouvette est ellipsoïdale. Cependant, la Méthode A prend pour hypothèse que le champ d'autodésaimantation de l'éprouvette est uniforme indépendamment de la forme. Par conséquent, l'exactitude de cette méthode n'est pas élevée.

11.3 Méthode B: Méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme et la susceptibilité magnétique de l'éprouvette

La Méthode B calcule le facteur de champ démagnétisant N de l'éprouvette à l'aide d'une méthode des éléments finis (MEF) en fonction de la forme et de la susceptibilité magnétique χ de l'éprouvette.

Le facteur de champ démagnétisant N qui correspond à la forme et à la susceptibilité magnétique χ de l'éprouvette peut être trouvé dans la documentation (voir Tableau 1 dans [8]).

La courbe de désaimantation obtenue $J(H_{\text{ext}})$ doit être convertie en courbe de désaimantation $J(H_{\text{eff}})$ à l'aide du facteur de champ démagnétisant N ci-dessus et de la Formule (4) et la Formule (5).

NOTE La Méthode B prend pour hypothèse que le champ d'autodésaimantation de l'éprouvette n'est pas uniforme et dépend de la forme et de la susceptibilité magnétique χ . Par conséquent, l'exactitude est améliorée, mais il est possible qu'elle ne soit pas suffisamment élevée pour répondre à toutes les exigences d'essai.

11.4 Méthode C: Méthode qui utilise une analyse inverse qui tient compte de la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette

La Méthode C prend initialement pour hypothèse un cycle d'hystérésis temporaire $J(H)$, puis la modifie de sorte que la courbe de désaimantation calculée coïncide avec le cycle d'hystérésis mesuré $J(H_{\text{ext}})$. Cette méthode exécute une analyse inverse qui tient compte de la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette en utilisant une MEF [9].

La Méthode C n'utilise pas le facteur de champ démagnétisant N pour corriger la courbe de désaimantation $J(H_{\text{ext}})$ obtenue.

Cette méthode prend pour hypothèse le cycle d'hystérésis temporaire $J(H)$ défini dans la Formule (6). Le paramètre $\alpha(H)$ doit être corrigé dans les itérations de calcul de sorte que le cycle d'hystérésis admis par hypothèse $J(H)$ influencé par le champ d'autodésaimantation H_{d} coïncide avec le cycle d'hystérésis mesuré $J(H_{\text{ext}})$.

$$J(H) = \gamma \tanh\left(\frac{H - \beta}{1 - \alpha(H)}\right) + (H - \beta)(1 + 0,1\alpha(H)) \quad (6)$$

où

J est la polarisation magnétique, en T;
 H est le champ magnétique, en A/m;
 $\alpha(H)$ est un paramètre en fonction de H ;
 β et γ sont des paramètres.

À partir du cycle d'hystérésis $J(H)$ admis par hypothèse et défini dans la Formule (6), la répartition du champ d'autodésaimantation et des cycles d'hystérésis locaux $J(H)$ dans les cellules du modèle d'aimant doit être calculée en utilisant une MEF. Ensuite, les paramètres $\alpha(H)$, β et γ de la Formule (6) doivent être modifiés en comparant le cycle d'hystérésis calculé $J(H_{\text{eff}})$ au cycle d'hystérésis mesuré $J(H_{\text{ext}})$. Pour le schéma conceptuel de la procédure de cette méthode, voir la Figure B.2.

Ces opérations doivent être répétées jusqu'à ce que la différence entre ces boucles d'hystérésis soit inférieure à 5 %. Si cette condition est respectée, le cycle d'hystérésis calculé $J(H_{\text{eff}})$ peut être considéré comme la courbe de désaimantation corrigée. Pour l'algorithme détaillé, voir l'Annexe B.

12 Détermination des principales propriétés magnétiques

12.1 Polarisation magnétique rémanente J_r

La polarisation magnétique rémanente J_r doit être donnée par l'intersection de la courbe de désaimantation corrigée $J(H_{\text{eff}})$ avec l'axe J ($H_{\text{eff}} = 0$).

NOTE La polarisation magnétique rémanente a la même valeur que l'induction rémanente.

12.2 Produit d'énergie maximale $(BH)_{\text{max}}$

Le produit d'énergie maximale $(BH)_{\text{max}}$ est la valeur maximale du module du produit des valeurs correspondantes de B et H_{eff} sur la courbe de désaimantation $B(H_{\text{eff}})$.

La courbe de désaimantation $B(H_{\text{eff}})$ doit être calculée à partir de la Formule (7) en utilisant la courbe de désaimantation corrigée $J(H_{\text{eff}})$.

$$B = J + \mu_0 H_{\text{eff}} \quad (7)$$

où

B est l'induction magnétique, en T;
 J est la polarisation magnétique, en T;
 μ_0 est la constante magnétique, en H/m; $\mu_0 \cong 4 \pi \times 10^{-7}$;
 H_{eff} est le champ magnétique effectif, en A/m.

12.3 Coercitivité (H_{cJ} et H_{cB})

La coercitivité H_{cJ} doit être donnée par l'intersection de la courbe de désaimantation corrigée $J(H_{\text{eff}})$ avec l'axe H ($J = 0$).

La coercitivité H_{cB} doit être donnée par l'intersection de la courbe de désaimantation $B(H_{\text{eff}})$ avec l'axe H ($B = 0$).

13 Reproductibilité des mesures

La reproductibilité des mesures de J_r , H_{cJ} et $(BH)_{\max}$ à l'aide des méthodes définies ci-dessus est caractérisée par un écart type relatif respectivement inférieur ou égal à 1 %, inférieur ou égal à 1 % et inférieur ou égal à 1,5 %. Cette valeur de reproductibilité a été estimée à partir des résultats de l'essai interlaboratoire international [1], [2].

NOTE La reproductibilité des mesures est équivalente à celle de l'IEC 60404-5.

14 Rapport d'essai

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

- a) le type et l'état de l'éprouvette;
- b) la forme, les dimensions et le volume de l'éprouvette;
- c) la température de l'éprouvette pendant le mesure;
- d) le mode d'aimantation initiale à saturation;
- e) la méthode de mesure du moment magnétique coulombien;
- f) le type de bobine de détection du moment magnétique coulombien (bobine M);
- g) la vitesse de variation du champ magnétique pendant le mesure;
- h) la méthode de correction du champ de désaimantation;
- i) la courbe de désaimantation obtenue;
- j) la courbe de désaimantation corrigée;
- k) la polarisation magnétique à saturation J_s ;
- l) la polarisation magnétique rémanente J_r ;
- m) la coercitivité (H_{cJ} et H_{cB});
- n) le produit d'énergie maximale $(BH)_{\max}$;
- o) les valeurs de B et H pour $(BH)_{\max}$;
- p) dans le cas d'un matériau anisotrope: l'angle d'aimantation par rapport à l'axe préférentiel du matériau si cet angle diffère de 0°;
- q) l'incertitude estimée de la mesure.

Annexe A (informative)

Correction du champ de désaimantation

L'Annexe A décrit les caractéristiques de la correction du champ de désaimantation décrite au 11.1.

La Figure A.1 représente un schéma de la correction du champ de désaimantation. La correction du champ de désaimantation convertit la courbe de désaimantation obtenue $J(H_{\text{ext}})$ en courbe de désaimantation intrinsèque $J(H_{\text{eff}})$.

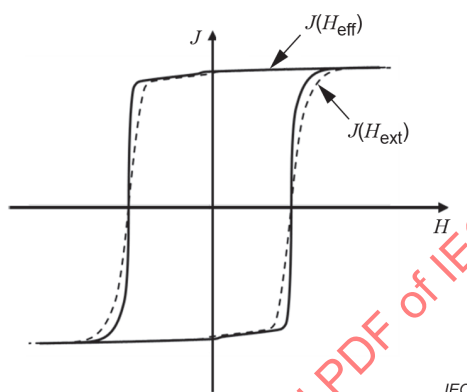


Figure A.1 – Schéma de la correction du champ de désaimantation

Il existe trois méthodes de correction de champ de désaimantation (voir Article 11):

- Méthode A: méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme de l'éprouvette uniquement;
- Méthode B: méthode qui utilise un facteur de champ démagnétisant déterminé par la forme et la susceptibilité magnétique de l'éprouvette;
- Méthode C: méthode qui utilise une analyse inverse qui tient compte de la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation dans l'éprouvette.

NOTE 1 Dans le cas d'un circuit magnétique ouvert, le champ d'autodésaimantation généré dans l'éprouvette est généralement réparti dans l'espace. Si une rectangularité exacte de la courbe de désaimantation est nécessaire, la Méthode C est la meilleure méthode pour une exactitude élevée de l'évaluation de la rectangularité, car cette méthode simule la répartition réelle du champ d'autodésaimantation.

Tableau A.1 compare les caractéristiques de la Méthode A, la Méthode B et la Méthode C en ce qui concerne l'exactitude de la correction et le temps de calcul. L'exactitude de la correction est évaluée comme la différence entre la courbe de désaimantation corrigée et la courbe de désaimantation mesurée au moyen d'un perméamètre conformément à l'IEC 60404-5.

Tableau A.1 – Caractéristiques des méthodes de correction du champ de désaimantation par rapport à la Méthode B

	Méthode A	Méthode B	Méthode C
Exactitude de la correction	peu élevée	(référence)	suffisamment élevée
Temps de calcul	plus court	(référence)	plus long

NOTE 2 Ces méthodes s'appliquent à la courbe de désaimantation obtenue par la méthode du magnétomètre à champ pulsé (PFM). Dans la méthode PFM, les corrections des courants de Foucault dans l'éprouvette et de la viscosité magnétique du matériau pour aimants permanents sont appliquées à la courbe de désaimantation obtenue en plus de la correction du champ de désaimantation (voir l'IEC TR 62331:2005, 7.1.6 [3]).

La Figure A.2 compare les courbes de désaimantation corrigées à l'aide de la Méthode A, la Méthode B et la Méthode C. La rectangularité de la courbe de désaimantation corrigée selon la Méthode C est la plus proche de la courbe de désaimantation mesurée en circuit magnétique fermé selon l'IEC 60404-5.

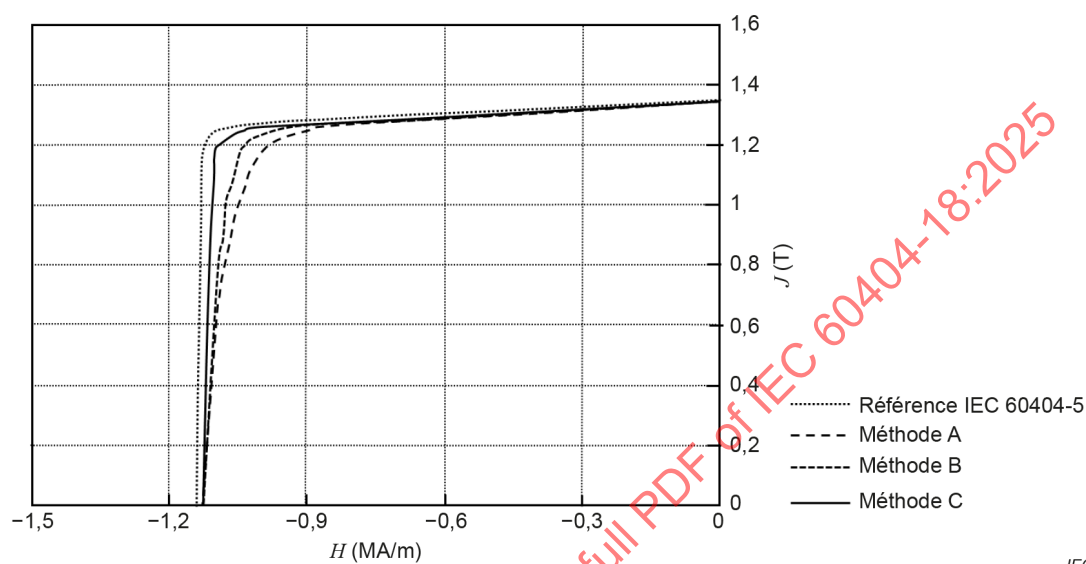


Figure A.2 – Comparaison des courbes de désaimantation corrigées à l'aide de la Méthode A, la Méthode B et la Méthode C de correction du champ de désaimantation

Annexe B (informative)

Détails de la correction du champ de désaimantation

B.1 Généralités

L'Annexe B répertorie les symboles (Article B.2) utilisés dans les corrections du champ de désaimantation et décrit les méthodes de correction (Article B.3 pour la Méthode B et Article B.4 pour la Méthode C) mentionnées à l'Article 11.

B.2 Symboles

J	est la polarisation magnétique, en T;
$\vec{J}$	est le vecteur de polarisation magnétique, en T;
χ	est la susceptibilité magnétique;
χ_{ext}	est la susceptibilité magnétique mesurée en circuit magnétique ouvert, $\chi_{\text{ext}} = J / \mu_0 H_{\text{ext}}$;
H_{eff}	est l'intensité du champ magnétique effectif, en A/m;
$\vec{H}_{\text{ext}}$	est le vecteur du champ magnétique externe, en A/m;
H_{ext}	est l'intensité du champ magnétique externe appliqué à l'aimant, en A/m;
H_d	est l'intensité du champ d'autodésaimantation, en A/m;
$\vec{H}_d$	est le vecteur du champ d'autodésaimantation, en A/m;
N	est le facteur de champ démagnétisant;
N^S	est le facteur de champ démagnétisant obtenu à partir de la polarisation magnétique;
N^V	est le facteur de champ démagnétisant obtenu à partir de l'intensité du champ d'autodésaimantation;
σ	est la densité de charge magnétique à la surface de l'aimant, en Wb/m ² ;
$\vec{e}^i$	est un vecteur normal unitaire à la surface de l'aimant;
μ_0	est la constante magnétique, ($4 \pi \times 10^{-7}$) en H/m;
S'	est la surface de l'aimant, en m ² ;
$J(x, y, z)$	est la répartition spatiale de la polarisation magnétique, en T;
$H_d(x, y, z)$	est la répartition spatiale du champ d'autodésaimantation, en A/m;
$U(x, y, z)$	est le potentiel magnétostatique, en A;
$J_{\text{open}}^{\text{exp}}(H)$	est le cycle d'hystérésis mesuré en circuit magnétique ouvert, en T;
$J_{\text{open}}^{\text{sim}}(H)$	est le cycle d'hystérésis calculé en circuit magnétique ouvert, en T;
$J_{\text{ideal}}(H)$	est le cycle d'hystérésis intrinsèque du matériau pour aimants permanents, en T;
J_r^{exp}	est la polarisation magnétique rémanente extraite des données en circuit magnétique ouvert, en T;