

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 17: Methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor

Matériaux magnétiques –

Partie 17: Méthodes de mesure des caractéristiques de magnétostriction des bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés au moyen d'un essai sur tôle unique et d'un capteur optique

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-17:2021



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2021 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a 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 online collection - oc.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 18 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 online collection - oc.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Magnetic materials –

Part 17: Methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor

Matériaux magnétiques –

Partie 17: Méthodes de mesure des caractéristiques de magnétostriction des bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés au moyen d'un essai sur tôle unique et d'un capteur optique

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20; 29.030

ISBN 978-2-8322-1042-5

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	8
4 General principles	9
4.1 Principle of the method	9
4.2 Test specimen	11
4.3 Test apparatus.....	12
4.3.1 General	12
4.3.2 Yoke	12
4.3.3 Windings	13
4.3.4 Bridge.....	14
4.3.5 Optical sensor	15
4.3.6 Optical target.....	16
4.3.7 Clamp.....	16
4.3.8 End stop	17
4.3.9 Flat glass plate	17
4.4 Air flux compensation.....	18
4.5 Power supply	18
4.6 Measuring instruments.....	18
5 Measurement procedure	20
5.1 Principle of measurement.....	20
5.2 Preparation of measurement.....	20
5.3 Adjustment of power supply	22
6 Determination of characteristics.....	22
6.1 Determination of the magnetic polarization $J(t)$	22
6.2 Determination of the magnetostriction strain $\lambda(t)$	22
6.3 Determination of the butterfly loop	23
6.4 Determination of the peak-to-peak value λ_{p-p} and the zero-to-peak value λ_{0-p}	23
7 Reproducibility of the measurement of the peak-to-peak value λ_{p-p}	23
8 Test report.....	24
Annex A (normative) Requirements of the test apparatus for measurements of the magnetostriction characteristics	25
A.1 General.....	25
A.2 Correct setting of the base length of the magnetostriction measurement.....	25
A.3 Strict control of the sinusoidal magnetic polarization	26
A.4 Isolation of the test apparatus from external noise	26
A.5 Control of the frictional force acting on the test specimen	28
A.6 Suppression of out-of-plane vibrations of the test specimen.....	29
A.7 Avoidance of resonances in the test specimen and the test apparatus	30
A.8 Calibration and verification of the test apparatus.....	30
Annex B (informative) Measurements of the magnetostriction characteristics under an externally applied compressive stress	33
B.1 General.....	33

B.2	Test specimen	33
B.3	Test apparatus	33
B.4	Measurement procedure	34
B.5	Determination of characteristics	34
Annex C (informative)	Air flux compensation by digital means	36
Annex D (informative)	Sinusoidal waveform control of the induced secondary voltage by digital means	37
Annex E (informative)	Magnetostriction characteristics for the acoustic design of power transformers	39
E.1	Transformer no-load noise/sound development process	39
E.2	Transformer no-load sound levels and magnetostriction strain	39
E.3	Vibration levels characterizing magnetostriction strain	40
E.4	Determination of vibration levels	41
E.4.1	General	41
E.4.2	Velocity levels	41
E.4.3	Acceleration levels	42
E.4.4	Reproducibility of the measurements of the velocity level and the acceleration level values	43
Bibliography		44
Figure 1	– Illustrations of butterfly loop, peak-to-peak value and zero-to-peak value	8
Figure 2	– Schematic diagram of a test apparatus (cross-sectional)	9
Figure 3	– Schematic diagram of test frames with different types of yoke	13
Dimensions	in millimetres	14
Figure 4	– Cross-section of the winding former and the bridge (schematic)	14
Figure 5	– Fundamental circuit of the measurement system	19
Figure A.1	– Butterfly loop of a high permeability grain-oriented electrical steel sheet cut perpendicular to the rolling direction [3]	32
Figure B.1	– Schematic diagram of a test apparatus for the measurement under an externally applied compressive stress (cross-sectional)	33
Table E.1	– A-weighting coefficients at a magnetizing frequency of 50 Hz	42
Table E.2	– A-weighting coefficients at a magnetizing frequency of 60 Hz	42

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –**Part 17: Methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor****FOREWORD**

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

IEC 60404-17 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
68/685/CDV	68/692/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/standardsdev/publications.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-17:2021

INTRODUCTION

This document provides standard methods to measure the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet under an applied AC magnetic field at 50 Hz or 60 Hz. The technical details are specified after intense considerations among magnetostriction experts, so that a satisfactory reproducibility of the measurement can be expected. The measurement requires detections of tiny vibrations of the test specimen at a resolution of 0,01 μm or better. In order to meet this challenging condition, not only the magnetic aspects, but also mechanical aspects of the test apparatus, e.g. the influence of friction, Maxwell forces, resonance and external vibrations, had to be specified.

The methods to determine magnetostriction characteristics of the butterfly loop, the peak-to-peak and zero-to-peak values of magnetostriction strain are specified in this document. Subsidiary characteristics of the velocity levels and the acceleration levels are described in Annex E.

The technical report IEC TR 62581:2010 [1]¹ reviewed the methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel by means of a single sheet tester. Various methods have been used for the measurement of the change in length of the various test specimens. However, for methods using sensors in contact with the test specimen, it is difficult to avoid measurement offsets associated with the contact methods. Moreover, the methods require special skills to be used in order to carry out the measurements. Therefore, this document provides methods using an optical sensor, namely a laser Doppler vibrometer, which fulfils the requirements of non-contact, high resolution and high reproducibility of measurements.

It is well known that mechanical stress in grain-oriented electrical steel has a strong influence on magnetostriction [1]. Grain-oriented electrical steel has a particular behaviour with regards to its sensitivity to compressive stress along the rolling direction compared to other kinds of electrical steels. It depends on the degree of grain-orientation of the material and the level of tensile stress in the material applied by surface coatings. Methods of measurement under an externally applied compressive stress are described in Annex B.

International round robin comparisons of the magnetostriction measurements have been carried out repeatedly by reducing the range of methods [2], [3], [4]. The reproducibility of the measurement was characterized by a relative standard deviation of more than 20 % when various methods were allowed. It became less than 2 % when test apparatuses following the principles described in this document were used for the assessment of grain-oriented electrical steel sheets cut along the rolling direction under the condition of a peak magnetic polarization of 1,7 T and a magnetizing frequency of 50 Hz.

¹ Numbers in square bracket refer to the Bibliography.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 17: Methods of measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor

1 Scope

This part of IEC 60404 is applicable to grain-oriented electrical steel strip and sheet specified in IEC 60404-8-7 for the measurement of magnetostriction characteristics under an applied AC magnetic field at 50 Hz or 60 Hz.

This document defines the general principles and technical details of the measurement of magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester and an optical sensor.

NOTE 1 The accelerometer method [5] is also an established method for the measurement of magnetostriction. However, it is more suited to the measurement of magnetostriction under an externally applied tensile or compressive stress, not zero stress, because it places a weight on the test specimen to prevent a deformation of the test specimen. Since this document includes the measurement at zero stress, the optical sensor method is provided as the optimum method.

This document is applicable to the measurement of:

- the butterfly loop;
- the peak-to-peak value λ_{p-p} ;
- the zero-to-peak value λ_{0-p} .

The magnetostriction characteristics are determined for a sinusoidal induced secondary voltage, for a specified peak value of the magnetic polarization and at a specified magnetizing frequency.

NOTE 2 Throughout this document the term “magnetic polarization” is used as described in IEC 60050-121:1998, 121-11-54. In some standards of the IEC 60404 series, the term “magnetic flux density” is used.

2 Normative references

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

IEC 60050-103, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 103: Mathematics – Functions* (available at www.electropedia.org)

IEC 60050-121, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 121: Electromagnetism* (available at www.electropedia.org)

IEC 60050-221, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 221: Magnetic materials and components* (available at www.electropedia.org)

IEC 60050-801, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics* (available at www.electropedia.org)

IEC 60404-8-7, *Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully-processed state*

IEC 61672-1:2013, *Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-103, IEC 60050-121, IEC 60050-221, IEC 60050-801, IEC 61672-1 and the following apply.

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

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

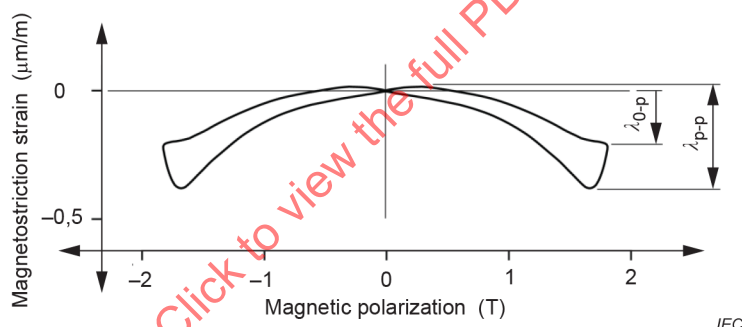
3.1

butterfly loop

butterfly curve

hysteresis loop of magnetostriction strain versus magnetic polarization along the direction of applied AC magnetic field for a period of magnetization, as illustrated in Figure 1

EXAMPLE



Key

- λ_{p-p} peak-to-peak value
 λ_{0-p} zero-to-peak value

Figure 1 – Illustrations of butterfly loop, peak-to-peak value and zero-to-peak value

3.2

λ_{p-p}

peak-to-peak value

peak-to-peak amplitude of magnetostriction strain along the direction of applied AC magnetic field, taking an absolute value, expressed in $\mu\text{m/m}$

Note 1 to entry: The peak-to-peak value can be read from the butterfly loop as shown in Figure 1.

3.3

λ_{0-p}

zero-to-peak value

difference in magnetostriction strain along the direction of applied AC magnetic field between the values at the prescribed peak magnetic polarization and at the zero value of the magnetic polarization, taking a positive or negative value, expressed in $\mu\text{m/m}$

Note 1 to entry: The zero-to-peak value can be read from the butterfly loop as shown in Figure 1.

3.4

L_v

velocity level

indicator of magnetostriction velocity comprising all harmonic components of magnetostriction strain of interest, expressed in dB

Note 1 to entry: The frequency weighting filter "A" defined in IEC 61672-1:2013 can be applied to the velocity level resulting as A-weighted velocity level, L_{vA} , expressed in dB(A).

3.5

L_a

acceleration level

indicator of magnetostriction acceleration comprising all harmonic components of magnetostriction strain of interest, expressed in dB

Note 1 to entry: The frequency weighting filter "A" defined in IEC 61672-1:2013 can be applied to the acceleration level resulting as A-weighted acceleration level, L_{aA} , expressed in dB(A).

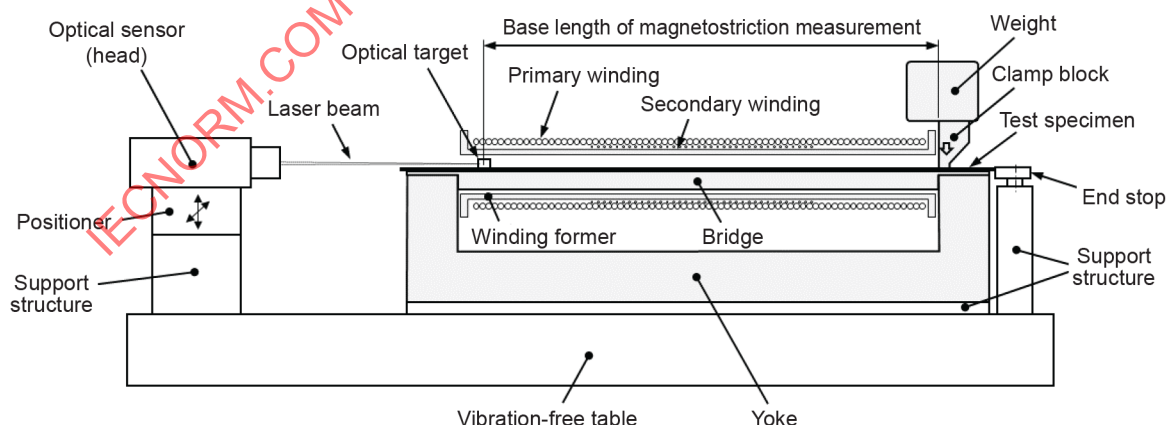
4 General principles

4.1 Principle of the method

A length change of a test specimen for a base length under an AC magnetic field is measured by means of a single sheet tester and an optical sensor. Magnetostriction characteristics of the material are determined from the length change of the base length of the test specimen for prescribed peak values of the magnetic polarization and at a specified magnetizing frequency.

A schematic diagram of a test apparatus is illustrated in Figure 2. The test apparatus consisting of windings, a winding former, a bridge, a yoke, a clamp block, a weight, an end stop, an optical sensor and auxiliary support structures shall be fixed to a vibration-free table. The test apparatus may be assembled on a rigid base plate which is non-magnetic and fixed to the vibration-free table.

NOTE 1 Methods of measurement under an externally applied compressive stress are described in Annex B.



IEC

Figure 2 – Schematic diagram of a test apparatus (cross-sectional)

The test specimen shall be placed on the bridge inside the following two windings wound on the winding former (see 4.3.3):

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

A flux closure shall be made by the yoke placed under the test specimen. The two pole faces shall be in a horizontal plane. The cross-section of the yoke shall be sufficiently large compared to that of the test specimen. Several types of yoke may be used (see 4.3.2).

The winding former shall be placed symmetrically between the two pole faces so that the magnetic field is symmetrically distributed within the winding former. The length of the winding former shall be as long as possible.

The bridge between the two pole faces shall be placed inside the winding former without touching the winding former. The bridge shall be sufficiently rigid to keep the test specimen on it flat, and the surface on which the test specimen is placed shall be flat and smooth with a low friction film adhered to the surface (see 4.3.4).

Both end parts of the bridge shall be held in close contact with the pole faces. The remaining space between the end parts of the bridge and the pole faces shall be filled with a small amount of high vacuum silicone grease whilst keeping the top surface of the bridge strip flat. In order to prevent a formation of large cavities, the grease should be spotted on the pole face in a grid pattern, the bridge is placed, and pressed firmly from the top of a flat glass plate placed on the bridge. Care shall be taken not to stain the surface of the low friction film with grease. The bridge shall be replaceable in order to maintain the smooth surface condition (see 4.3.4 and Clause A.8).

NOTE 2 High vacuum silicone grease has the appropriate properties being chemically inert, having low vapour pressure, and being difficult to solidify for a long time. However, if the grease stains the surface of the low friction film and/or the back surface of the test specimen, the frictional force acting on the test specimen increases and the magnetostriction value decreases. Grease stains can be removed with acetone.

NOTE 3 An H coil with the same length as the secondary coil can be embedded in the bridge inside the secondary winding in order to detect the magnetic field strength $H(t)$ applied to the test specimen. This is useful to investigate magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel.

The test specimen shall be placed on the bridge so that the axis of the test specimen is coincident with the horizontal axis of symmetry of the winding former (hereafter, simply called “the axis of the winding former”).

NOTE 4 Misalignments of the test specimen can cause lateral vibrations of the test specimen by the Maxwell force, which works to align the axes of the test specimen and the winding former, causing measurement offsets.

Both ends of the test specimen shall overhang the bridge (see Clause A.6). The parts of the test specimen situated outside the pole faces shall be no longer than a few mm (see Clause A.7). The end of the test specimen opposite to the clamp shall be free to move. Nothing shall be connected to this end (see Clause A.7). The other end of the test specimen shall make contact with the end stop over the full width.

During the measurement, the test specimen shall be fixed to the test apparatus by means of the clamp block and the weight (see 4.3.7). The side of the clamp block facing the optical sensor shall be in plane with the inner edge of the pole face (see Figure 2 and Clause A.2).

No weight, except the optical target, shall be placed on the test specimen between the end of the test specimen opposite the clamp and the clamp block (see Clause A.5) [12].

The optical target shall be placed on the test specimen inside the winding former so that the distance between the optical target centre and the inner edge of the pole face is $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ when the test specimen is placed on the bridge (see Figure 2 and 4.3.5).

NOTE 5 If the optical target is located close to the pole face, out-of-plane vibrations of the test specimen on the pole face can cause measurement offsets (see Clause A.2).

The optical sensor shall be placed in the optimum position so as to maximize the signal to noise ratio of the output signal. The laser beam shall be parallel to the axis of the winding former within $\pm 0,1^\circ$ in order to prevent measurement offsets due to vertical and lateral vibrations of the test specimen.

NOTE 6 The optical sensor has optimum distances from the optical target to maximize the signal to noise ratio of the output signal. The optimum distances are usually specified in the instruction manual of the optical sensor.

NOTE 7 The inclination of the laser beam can be adjusted so that the displacements of the laser beam from the axis of the winding former at both ends of the winding former are the same within $\pm 0,7$ mm.

The laser beam position on the optical target should be adjusted to maximize the intensity level of the reflected laser beam detected by the optical sensor in order to increase the signal to noise ratio of the output signal. The optical sensor should be mounted on an external positioner in order to make it easier to adjust the laser beam position (see Figure 2).

The base length of the magnetostriction measurement is the distance along the axis of the winding former between the optical target centre and the side of the clamp block facing the optical sensor (see Figure 2).

The auxiliary support structures close to the magnetic circuit shall be non-magnetic. Care shall be taken to avoid an electrical short circuit around the magnetic flux through the magnetic circuit.

All items placed on the vibration-free table should be stabilized to the table in order to prevent unexpected resonance generation and vibration transmission to the test apparatus.

The test apparatus should be located away from external noise. The test apparatus shall not be touched by hand or tools during the measurement, otherwise it induces vibration of the test apparatus causing, in turn, measurement offsets. The test apparatus should be placed so that the axis of the winding former is approximately at right angles to the direction of the earth's magnetic field (see Clause A.4).

NOTE 8 A simple magnetic shield and a windshield covering the test apparatus can weaken the influence of the external magnetic and acoustic noises respectively.

It is fundamentally important that the surface on which the test specimen is placed is flat and clean in order to stabilize the frictional force acting on the test specimen to low values (see Clause A.5). A flat glass plate shall be used to check and maintain the flatness (see 4.3.2, 4.3.4 and 4.3.9).

The test apparatus shall be verified so that there is no out-of-plane vibration of the test specimen and no effect of resonance causing measurement offsets (see Clause A.8).

4.2 Test specimen

The test specimen shall be rectangular and flat. The test specimen shall be free of fold marks, dents and scratches with residual stress. The back surface of the test specimen shall be free of substances that affect friction such as grease, adhesives, liquids, powders, etc. (see Clause A.5).

The length and width of the test specimen shall be $500 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ and $100 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ respectively.

The test specimen shall be cut parallel to the direction of rolling unless otherwise specified.

The test specimen shall be cut without forming excessive burrs and mechanical distortion. Stresses introduced into the test specimen by the cutting process shall be as low as possible. The test specimen shall be handled very carefully in order to avoid any further introduction of stresses.

NOTE 1 The stress introduced into the test specimen can create 90 degree magnetic domains in the material causing magnetostriction offsets.

NOTE 2 A laser cutting technique can be used provided that the comparability of the results is demonstrated. It can leave a considerable amount of stress along the cut edges [6].

When a test specimen is being cut, the edge of the parent strip is taken as the reference direction. The angle between the reference direction and the cutting direction shall be within $\pm 1^\circ$.

4.3 Test apparatus

4.3.1 General

The components of the test apparatus shall be assembled with minimal misalignment in order to prevent measurement offsets. In particular, the flatness of the surface on which the test specimen is placed shall be ensured.

In order to prevent resonance with the harmonic components of magnetostriction strain, the test apparatus shall be free from natural frequencies between 50 Hz and 1 000 Hz (see Clause A.7).

4.3.2 Yoke

The yoke should have a low residual magnetization and a low reluctance. The yoke shall be fixed to the test apparatus so that the two pole faces are in the same horizontal plane.

NOTE 1 That the two pole faces are in the same horizontal plane can be confirmed by the fact that when a liquid such as alcohol is dropped on the pole faces and the glass plate is placed on top, a thin film of the liquid spreads uniformly over the entire pole faces. A difference in height and/or an inclination between the two pole faces can cause deformation of the bridge strip and measurement offsets (see Clause A.6).

NOTE 2 Due to the elastic deformability of the yoke, the two pole faces can be no longer in the same plane depending on how the yoke is fixed, even if the yoke alone was processed so that the two pole faces are in the same plane.

Care shall be taken to avoid a deterioration of the magnetic properties of the yoke due to excessive stress and to prevent vibration of the yoke during magnetization. The yoke should be fixed rigidly to the vibration-free table, or the rigid base plate, at points close to the pole faces so that it will not be displaced by the clamping force. The outside dimension of the yoke along the axis of the winding former shall be slightly shorter than 500 mm; between 494 mm and 496 mm is recommended.

The yoke may be a vertical single yoke or a horizontal double yoke (see Figure 3). Other types of yoke may be used provided that no stress is applied to the test specimen due to the yoke, and that the comparability of the results is demonstrated.

The vertical yoke shall have two pole faces having a length of $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ along the axis of the winding former and a width between 105 mm and 110 mm. The height of the yoke shall be between 80 mm and 90 mm.

The horizontal yoke shall have two pole faces having a length between 50 mm and 60 mm along the axis of the winding former and a width between 400 mm and 500 mm. The height of the yoke shall be around 10 mm.

Other dimensions of the yoke may be applicable provided that the comparability of the results is demonstrated.

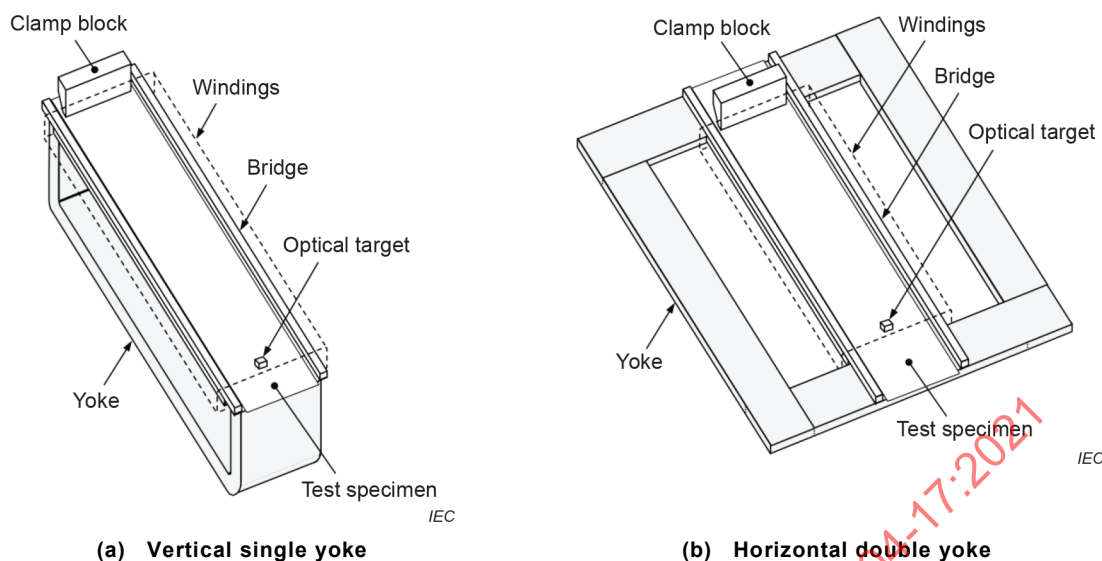


Figure 3 – Schematic diagram of test frames with different types of yoke

NOTE 3 It was confirmed by experiments that the difference in measurement results when a vertical yoke is replaced with a horizontal yoke is sufficiently small in comparison to the reproducibility of the measurement required in this document [3].

The yoke may be made of a glued stack or a C-core of high permeability grain-oriented electrical steel sheets. In the case of the glued stack, the corners shall have staggered butt joints. In the case of horizontal yoke, the sheets should be laminated on a flat plate with sparsely distributed particles of glue on one side of each sheet to minimise stress introduction caused by the gluing.

The yoke shall be carefully demagnetized before use. For the demagnetization of the yoke, an exciting winding shall be wound around the yoke. The demagnetization shall be made without the test specimen in the test apparatus and by slowly decreasing an AC current flowing through the exciting winding to zero, starting from the current that produces a magnetic field in the yoke well above the knee of the magnetization curve of the yoke material. The demagnetized state can be verified by whether the positive and negative peak values of the magnetization current of the test specimen match at the measurement of magnetostriction (see Clause A.3). In the case of the vertical single yoke, a flux closure of the same dimensions as the yoke, e.g. the upper yoke, should be put on the two pole faces during the demagnetization.

NOTE 4 The residual magnetization of the yoke can cause asymmetrical butterfly loops and thus cause measuring offsets.

A vertical double yoke may be applicable provided that the upper yoke does not affect the length change of the test specimen and does not disturb the laser beam path between the optical sensor and the optical target.

NOTE 5 The vertical double yoke is suitable for general loss measurements by the magnetizing current method provided that the bridge is removed and the upper and lower yokes are in contact with the test specimen. The H coil method using an H coil embedded in the bridge inside the secondary winding enables simultaneous measurements of magnetostriction and loss regardless of the yoke type. For the H coil method, see IEC 60404-16:2018 [7].

4.3.3 Windings

The primary and secondary windings shall be wound around the winding former. The winding former shall be non-conducting and non-magnetic. The dimensions of the winding former shall be as follows (see Figure 4):

- length: as long as possible between the two pole faces;
- internal width: wider than the width of the bridge, 120 mm is recommended;
- internal height: higher than the height of the bridge, 15 mm is recommended;
- external height: ≤ 20 mm.

Dimensions in millimetres

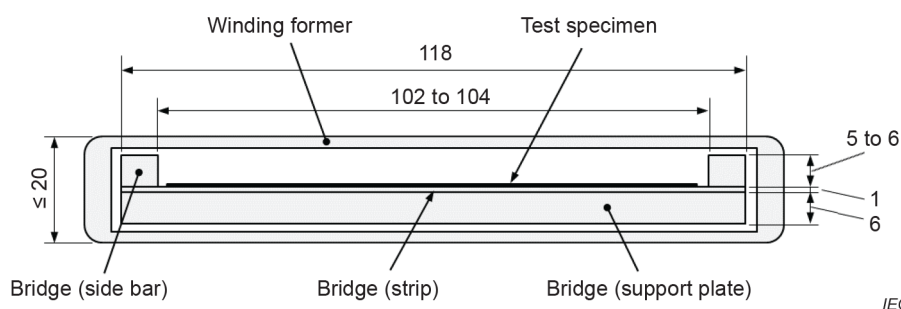


Figure 4 – Cross-section of the winding former and the bridge (schematic)

The primary winding shall be wound homogeneously as long as possible on the winding former. Parts of the winding former flanges in contact with the primary winding should be as thin as possible provided that it can hold the winding former. Care shall be taken to avoid a deformation of the winding former due to tension when winding a copper wire around it.

NOTE 1 The primary winding can be constructed from a single continuous and uniform coil made up of a copper wire 1 mm in diameter wound turn by turn. The winding former thickness can be thinner by using a self-supporting type of coil for the primary winding.

The secondary winding shall be wound on the centre part of the winding former under the primary winding over a half-length of the primary winding to avoid influence of the stray magnetic flux in the areas close to both ends of the primary winding.

NOTE 2 The stray magnetic flux increases as the distance between the test specimen and the pole face increases.

The number of turns of the secondary winding depends on the characteristics of the measuring instruments.

NOTE 3 The secondary winding can be constructed from a single continuous coil made up of copper wire 0,3 mm in diameter wound evenly at intervals.

Care shall be taken to suppress vibration of the primary winding with the AC magnetizing current flowing.

NOTE 4 The vibration of the primary winding can be suppressed by supporting the windings from below in several points along the length.

4.3.4 Bridge

The bridge is the most important component of the test apparatus from the mechanical aspect. The bridge shall be sufficiently rigid so that the test specimen placed on it is kept flat during the measurement. The natural frequencies of the bridge evaluated by structural calculations shall be higher than 1 200 Hz in order to prevent resonance with the harmonic components of magnetostriction strain of up to 1 000 Hz.

The bridge shall be constructed from four parts; a bridge strip, a support plate and two side bars (see Figure 2, Figure 3 and Figure 4). The four parts shall be made of epoxy glass of the same grade. Other non-conducting and non-magnetic materials may be used provided that the rigidity of the bridge is equal to, or better than, that made of epoxy glass. Some or all of the four parts may be cut out from a block of epoxy glass provided the shape of each part is not distorted.

Dimensions of each part of the bridge shall be as follows:

- the bridge strip: 1,0 mm in nominal thickness, 118 mm $\pm$ 0,2 mm in width and the same length as the outside dimension of the two pole faces;

- the support plate: 6 mm $\pm$ 0,2 mm in thickness, the same width as the bridge strip and slightly shorter than the inner distance of the pole faces;
- the side bars: 5 mm to 6 mm in thickness, 7 mm to 8 mm in width and the same length as the bridge strip.

NOTE 1 A thicker bridge strip can increase the stray magnetic flux in the area near the pole faces and a thinner bridge strip can be easily deformed by stress during processing or use.

Protrusions on both surfaces of the bridge strip and surfaces of the other parts where they are to be joined shall be removed before assembly.

It is recommended to make one or several windows or grooves parallel to the length in the centre of the support plate to reduce the weight of the bridge, provided that the rigidity of the bridge is sufficient to keep the test specimen placed on it flat. This is in order to prevent deformation of the bridge over time by the weight. The total width and length of the windows or grooves shall be less than one half of the width of the support plate and two thirds of the length of the support plate respectively. An H coil and/or an air flux compensation coil may be embedded to the windows or grooves of the support plate.

NOTE 2 The method of reducing weight with respect to rigidity is the same as for architectural bridges, based on the fact that the rigidity of a plate is proportional to the cube of the plate thickness.

The parts of the bridge shall not be deformed and the surfaces shall be smooth. The four parts of the bridge shall be closely joined to each other symmetrically as shown in Figure 2, Figure 3 and Figure 4 whilst maintaining the flatness of the bridge strip. These parts may be joined using a thin double-sided adhesive tape and high strength engineering plastic screws may be used if necessary.

The low friction film shall be adhered to the centre of the bridge strip width over the entire length of the bridge strip without dust or air pockets under the film. The low friction film shall be a thin fluorine resin-impregnated glass cloth adhesive film (see Clause A.5). Other types of film may be used provided that the comparability of the results is demonstrated. The thickness of the film shall be thinner than 0,15 mm and the width shall be 95 mm $\pm$ 1 mm in order to prevent an interaction with the edges of the test specimen. Care shall be taken not to distort the bridge strip when applying the film.

Care shall be taken to flatten protrusions on the film surface with a suitable roller, and to remove the edge burrs of the film and adhesive remaining on the film surface.

The bridge strip can deform over time due to the residual stress inside the bridge. It is recommended to leave the glass plate as a weight on the bridge strip while the test apparatus is not being used over a long period in order to prevent this deformation.

In order to maintain the smooth surface condition, the low friction film shall be replaced or the entire bridge shall be replaced before the surface of the film is worn out or severely damaged over time (see Clause A.8).

4.3.5 Optical sensor

The optical sensor shall be a laser Doppler vibrometer. Other types of optical sensor may be used provided that the compatibility of the results is demonstrated.

The optical sensor shall have a resolution of 0,01 μ m or better for a sinusoidal displacement of the optical target at a frequency of 100 Hz. The measurement range of the optical sensor shall be highly sensitive as long as the output signal does not overrange, including noise components. Typical velocity range is $\pm$ 10 mm/s, $\pm$ 20 mm/s or $\pm$ 50 mm/s at full scale output.

NOTE 1 The resolution of 0,01 μm in the displacement of the optical target corresponds to a resolution of 0,023 $\mu\text{m/m}$ of magnetostriction strain when the base length is 436 mm.

In order to analyse the harmonic components of the magnetostriction strain, the frequency band of the optical sensor shall be wider than the range of 50 Hz to 1 200 Hz.

The signal response of the optical sensor shall be sufficiently fast. Any filter function provided in the optical sensor shall not be used unless the comparability of the results is demonstrated.

NOTE 2 The filter functions of the optical sensor can increase the output signal delay. The output signal delay of the optical sensor can be compensated by digital means. Calibration aspects are dealt with in Clause A.8.

The optical sensor shall be verified so that a measurement of a symmetrical displacement of a calibration exciter results in a symmetrical output signal without an offset.

NOTE 3 Odd component noise synchronized to the power frequency superimposed on the output signal of the optical sensor can cause asymmetrical butterfly loops.

NOTE 4 There are two types of laser Doppler vibrometer. One type measures the velocity of the optical target using a single laser beam with a reference point inside the sensor, and the other type measures the differential velocity between the optical target and a reference point on the test frame using two laser beams. The latter type has the advantage of cancelling out a relative motion between of the optical sensor and the test frame.

4.3.6 Optical target

The optical target shall be a small, light and rigid block made of a non-conducting and non-magnetic material, e.g. resin. The mass of the optical target shall be less than 0,2 g.

NOTE 1 A conducting material can be vibrated by the Maxwell force synchronized with the applied AC magnetic field. A massive optical target can cause inertial delay of the movement relative to the test specimen and out-of-plane resonance in the joint system of the optical target and the test specimen (see Clause A.7).

The dimensions of the optical target shall be a height of 3 mm or less, a width of 5 mm $\pm$ 0,5 mm and a length of 4 mm to 5 mm. Other dimensions of the optical target may be applicable provided that the comparability of the results is demonstrated.

NOTE 2 An optical target with increased height can increase measurement offset when tilted. If the bottom area is too small, the optical target can wobble due to poor adhesion.

The side of the optical target facing the optical sensor shall reflect the laser beam as brightly as possible. A reflective tape with glass beads, such as those used for road traffic signs, may be used on this side.

The optical target shall be adhered on the test specimen, for example, by means of a thin double-sided adhesive tape (see 5.2). The optical target with the adhesive tape may be used multiple times by storing it on a non-adherent surface provided that there is no poor adhesion to the test specimen. The number of re-uses should be limited, e.g. 10 times.

NOTE 3 If the test specimen has been wrapped in a rust preventive paper for a long time, the vaporized rust inhibitor can absorb into the surface of the test specimen, making it difficult for the optical target to adhere. If the adhesive cannot be restored even if the surface is cleaned, the optical target can be adhered on an approximately 10 mm square thin plastic tape attached to the surface of the test specimen.

4.3.7 Clamp

The clamp shall consist of the clamp block, the weight and a mechanism to raise and lower them. The clamp block shall press the test specimen vertically with a force applied by the weight during the measurement (see Figure 2). The weight shall be non-magnetic. The clamping force shall be between 15 N and 20 N.

NOTE 1 It was confirmed by experiment that a clamping force of up to 47,5 N does not influence the measurement [4]. However, if the bottom face of the clamp block is slightly inclined to the surface of the test specimen, a concentrated clamping force can introduce excessive stress in the test specimen which can cause measurement offsets.

The clamp block shall be rigid enough to withstand the clamping force. The lower part of the clamp block shall be non-conducting and non-magnetic to at least 10 mm thickness. The bottom face of the clamp block shall have a large friction coefficient which is sufficient to hold the test specimen against the magnetostriction force. Other parts of the clamp block shall be non-magnetic.

NOTE 2 The test specimen is held by the frictional forces, which is in proportion to the clamping force.

The width of the bottom face shall be $95 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ in order to avoid an interaction with the edges of the test specimen. The length of the bottom face along the axis of the winding former shall be $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. The bottom face shall be parallel with the top of the bridge strip (see Clause A.5).

The mechanism to raise and lower the clamp block shall move the clamp block smoothly with a linear guide, e.g. a stage held by linear ball guides, to bring the clamp block into close contact with the test specimen over the whole bottom face without an impact. The linear guide shall be fixed vertically to the test apparatus. The clamp block shall evenly press the test specimen against the pole face with the specified clamping force.

NOTE 3 The linear guide prevents the clamp block from moving horizontally.

NOTE 4 If the clamping force applied to the test specimen is not uniform in the width direction, it can cause lateral vibration of the test specimen and measurement offsets. If the clamping force is much lower than the specified value, the longitudinal vibration of the test specimen due to magnetostriction can be damped and harmonic components of the vibration can decrease.

When loading and unloading the test specimen in and out of the winding former, the clamp block and the weight are raised up.

4.3.8 End stop

The end stop shall be non-magnetic and conductive in order to ground the electrical charge on the test specimen (see Clause A.6). An electric wire shall be connected between the stop end and the grounded vibration-free table. The end stop should be of the same width as the test specimen.

The side of the end stop facing the end of the test specimen shall be perpendicular to the axis of the winding former (see Figure 2).

The end stop shall be supported on a vertical swivel shaft fixed to the test apparatus in order to make contact with the end face of the test specimen over the full width, even if the end of the test specimen is not exactly cut perpendicular to the longitudinal edge of the test specimen. The end stop may be retracted downward in order easily to load and unload the test specimen in and out of the winding former.

NOTE The end stop can be a brass or aluminium plate fixed to the shaft of a single-pull-action air cylinder.

4.3.9 Flat glass plate

The flat glass plate shall be a float-made glass plate, such as those used for windows and mirrors. The dimensions of the flat glass plate shall be a nominal thickness of 5 mm or 6 mm, a length of $500 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ and a width of $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

NOTE The flatness of a glass plate can be verified by reflecting sunlight and checking that the shape reflected on the wall or ceiling parallel to the glass plate is the same as the glass plate.

The flat glass plate is used to verify whether the two pole faces are in the same plane and the flatness of the bridge strip (see 4.3.2 and 4.3.4). In addition, the flat glass plate is also used as a weight left on the top of the bridge strip when the test apparatus is not being used over a long period (see 4.3.4).

4.4 Air flux compensation

Compensation of the effect of air flux on the induced secondary voltage shall be made. This may be achieved, for example, by using a mutual inductor or by digital means described in Annex C.

The mutual inductor shall be isolated from the test apparatus to prevent interference between the leakage magnetic flux from the mutual inductor and the test apparatus (see Clause A.4).

4.5 Power supply

The power supply shall consist of a computer-controlled arbitrary signal generator and a power amplifier, or an instrument integrating both of these functions.

The arbitrary signal generator shall synthesize a magnetizing signal of waveform, amplitude and frequency, which are programmed externally, so that the waveform of the compensated induced secondary voltage is sinusoidal.

The waveform of the compensated induced secondary voltage shall be maintained sinusoidal during the measurement. This may be achieved by various means, for example by digital means described in Annex D.

In order to ensure that only the fundamental component is present, the form factor of the induced secondary voltage shall be maintained at 1,110 7 within $\pm 0,2$ % or better, and the total harmonic distortion of the compensated induced secondary voltage of up to 1 000 Hz should be less than 1 % (see Clause A.3).

NOTE The total harmonic distortion can be calculated as the ratio of the sum of RMS amplitudes of harmonics of up to 1 000 Hz to the amplitude of the fundamental frequency.

The power amplifier shall be of low internal impedance, high voltage and frequency stability and sufficiently low voltage noise. The output voltage and frequency shall be maintained constant within $\pm 0,2$ % during the measurement.

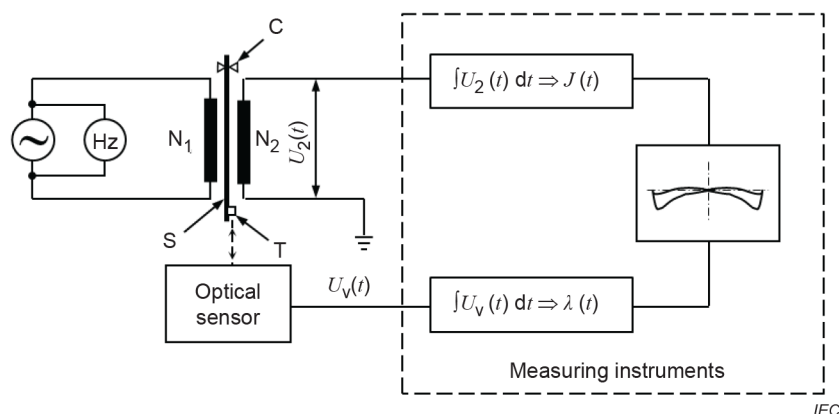
In order to avoid a DC bias of magnetization, DC and even harmonic components in the voltage applied on the primary winding shall be negligible (see Clause A.3).

The power amplifier should be a bipolar type with sufficiently wide frequency and voltage bands for the measurement. Provided it has no adverse influence on the feedback loop process, an isolation transformer may be inserted between the power amplifier and the primary winding in order to match impedance between the power supply output and the primary winding, to remove the DC component of the magnetizing voltage and to suppress voltage noise on the primary winding. The isolation transformer should be demagnetized before use.

4.6 Measuring instruments

The fundamental circuit of the measuring system is illustrated in Figure 5. The function of air flux compensation is not presented in Figure 5, but it is included in the circuit or in the software (see 4.4 and Annex C).

The frequency meter may be removed from the circuit provided that the power supply is controlled by a quartz time keeping device. The instruments to measure magnetic field strength $H(t)$ applied to the test specimen may be added to the circuit; e.g. a current measuring device connected in series with the primary winding or an H coil embedded in the bridge inside the secondary winding.

**Key**

~	power supply
Hz	frequency meter
N_1	primary winding
N_2	secondary winding
S	test specimen
T	optical target
C	clamp
$U_2(t)$	voltage induced in the secondary winding
$U_v(t)$	output voltage of the optical sensor
$\int U_2(t) dt \Rightarrow J(t)$	J -integrator function of software
$\int U_v(t) dt \Rightarrow \lambda(t)$	λ -integrator function of software

Figure 5 – Fundamental circuit of the measurement system

The measuring instruments usually consist of a calibrated digitizer and a digital signal calculator (usually a computer), or an instrument integrating both of these functions.

The digitizer shall have several independent signal channels of voltage inputs. The number of channels should be three or more for signals of $U_2(t)$, $U_v(t)$ and $H(t)$.

The signal channels shall have sufficiently high input impedances (typically $> 1 \text{ M}\Omega$ in parallel with about 100 pF). Input signals should be amplified before digitizing to ensure at least a 12-bit resolution for the given amplitude of input voltage in order to reduce the digitizing error. Resolution of the analogue-digital convertor should be a 16-bit resolution or more at full scale.

The signal channels shall work simultaneously with a sampling clock synchronized with the readout clock of the arbitrary signal generator. An unsynchronized digitizer may be used provided that the comparability of the results is demonstrated.

The sampling frequency of the digitizer should be a multiple of the magnetizing frequency (Nyquist condition) and sufficiently large to reduce the digitizing error. In order to reduce noise on the signals efficiently, it is recommended that the sampling frequency is as high as the devices allow at measurement and then averaged down to a sampling frequency sufficient for recording. The number of samples per period of magnetization should be a multiple of the power of 2. It is convenient to use digital data processing functions such as integration, Fast Fourier Transform (FFT) and band-pass filter. In order to correct phase differences between the signal channels, the sampling frequency should be 4 096 or more samplings per period of magnetization.

NOTE 1 For recording the wave signals, a reduced data set of 1 024 samplings per period of magnetization is sufficient. If the sampling frequency is an exact multiple of the magnetizing frequency (Nyquist condition), the sampling frequency can be even considerably lower (e.g. 128 samplings per period, see IEC 60404-2:1996/AMD1:2008, Annex A [8]).

The digitizer should create the digital feedback signal to feed into the arbitrary signal generator for the sinusoidal waveform control of the compensated induced secondary voltage by digital means (see Annex D).

The digitizer shall be calibrated and the amplitude and phase differences between the signal channels should be compensated by digital means.

NOTE 2 Calibration aspect is dealt with in Clause A.8.

The digital signal calculator (usually a computer) shall calculate magnetic characteristics and magnetostriction characteristics through the evaluating software with the digital data processing functions of integration, FFT and band pass filter.

5 Measurement procedure

5.1 Principle of measurement

The back surface of the test specimen and the surface of the low friction film shall be free of substances that affect friction (see Clause A.5).

The measurements shall be made at an ambient temperature of $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ on the test specimen which has first been demagnetized.

The test apparatus and the measuring instruments shall be connected as shown in Figure 5.

The following signals shall be digitized simultaneously and recorded with an uncertainty of $\pm 0,1 \%$ or better:

- voltage induced in the secondary winding $U_2(t)$;
- output voltage of the optical sensor $U_v(t)$.

Synchronous averaging of the signals shall be carried out over a large number of periods, e.g. 64 or 128, to remove unsynchronized noise on the signals.

The data set of signals $U_2(t)$ and $U_v(t)$ provide the complete information for one measurement.

The magnetic polarization $J(t)$ is calculated from $U_2(t)$ (see 6.1) and the magnetostriction strain $\lambda(t)$ is calculated from $U_v(t)$ (see 6.2).

The butterfly loop is determined by $J(t)$ and $\lambda(t)$ (see 6.3) and the peak-to-peak value λ_{p-p} and the zero-to-peak value λ_{0-p} are determined from $\lambda(t)$ (see 6.4).

5.2 Preparation of measurement

At the beginning of the measurements, the surface of the low friction film shall be wiped with a non-woven fabric soaked in a small amount of suitable solvent, e.g. acetone, in order to remove friction-altering substances such as grease, adhesives, liquids, powders, etc. (see Clause A.5).

If there is a friction-altering substance on the back surface of the test specimen, it shall be wiped off with a non-woven fabric soaked in a small amount of suitable solvent, e.g. acetone, before the measurement (see Clause A.5).

The length of the test specimen l shall be measured with an uncertainty of $\pm 0,1$ % or better. The mass of the test specimen m shall be determined with an uncertainty of $\pm 0,1$ %.

Test specimens shall be in good condition and representative of the material to be tested. If any unusual features, e.g. non-flatness, uneven appearance, scratches and deformations, that can be caused by handling or cutting, are found on the test specimen, it shall be reported in the test report.

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

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

where

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

m is the mass of the test specimen, in kilograms;

l is the length of the test specimen, in metres;

ρ_m is the conventional density of the grain-oriented electrical steel specified in IEC 60404-8-7, in kilograms per cubic metres, equal to $7\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

The optical target shall be mounted on the test specimen outside the test apparatus before the measurement. The position of the optical target on the test specimen shall be on the axis of the test specimen and at a predetermined distance from the edge of test specimen. The distance shall be determined so that the distance between the optical target centre and the side of the clamp block facing the optical target is the same as the prescribed base length when the test specimen is set on the bridge (see Figure 2).

NOTE 1 The mounting of the optical target on the test specimen is made easier by using a test specimen preparation table with a scale or a pointer indicating the mounting position of the optical target relative to the end of the test specimen.

The test specimen with the optical target shall be set on the bridge (see 4.1). During the setting process, the test specimen may be placed on a thin resin sheet to prevent wear on the surface of the low friction sheet; the thin resin sheet shall be withdrawn after the process.

The position of the test specimen placed on the bridge shall be adjusted so that the axis of the test specimen aligns with the axis of the winding former within $\pm 0,2$ mm. The end of the test specimen shall make contact with the end stop over the full width (see Figure 2).

NOTE 2 The positioning of the test specimen is made easier by using a side-positioning tool which aligns both longitudinal edges of the test specimen symmetrically to the axis of the winding former, and by using a pusher which can push the test specimen gradually towards the end stop (see Clause B.3). These tools are removed before the measurement is taken.

The test specimen shall be fixed to the test apparatus by means of the clamp block and the weight.

The focus and position of the laser beam on the optical target shall be adjusted to maximize the intensity level of the reflected laser beam detected by the optical sensor. A lower height of the laser beam on the optical target is preferable in order to suppress measurement offsets if the optical target tilts. The laser beam position shall be fixed during the measurement.

Before the measurement, the test specimen shall be carefully demagnetized in the test apparatus by slowly decreasing an AC magnetic field, starting from well above the value to be measured and the knee of the magnetization curve.

NOTE 3 Whether the test specimen is effectively demagnetized can be confirmed by matching the positive and negative peak values of the magnetizing current at the measurement of magnetostriction (see Clause A.3).

5.3 Adjustment of power supply

In practice, single or grouped peak values of magnetic polarization $\hat{J}$ at a specified magnetizing frequency shall be decided in advance. The measurement shall be carried out continuously in ascending order of the peak values of magnetic polarization $\hat{J}$.

The output of the power supply shall be slowly increased until the peak values of magnetic polarization $\hat{J}$ has reached the prescribed value. The output of the power supply shall not be decreased during the measurement sequence except for negligible modifications.

The waveform of the compensated induced secondary voltage $U_{2c}(t)$ shall be maintained sinusoidal at a form factor of 1,110 7 within $\pm 0,2$ % or better and the total harmonic distortion of the compensated induced secondary voltage $U_{2c}(t)$ of up to 1 000 Hz should be less than 1 % during the measurement (see 4.5).

If the test specimen buzzes during the measurement, it shall be reported as an unusual feature in the test report.

NOTE The buzz is caused by severe out-of-plane vibration of the test specimen on the pole face. In this case, the results are usually incorrect (see Clause A.6).

6 Determination of characteristics

6.1 Determination of the magnetic polarization $J(t)$

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

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

where

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

N_2 is the number of turns of the secondary winding;

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

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

T is the length of the period of magnetization, in seconds;

t is a time variable, in seconds;

τ is an auxiliary time variable, in seconds.

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

6.2 Determination of the magnetostriction strain $\lambda(t)$

The magnetostriction strain $\lambda(t)$ shall be calculated by Formula (3).

$$\lambda(t) = \frac{1}{k_v l_0} \int_0^t U_v(\tau) d\tau - \lambda_0 \quad (3)$$

where

$\lambda(t)$ is the magnetostriction strain, in $\mu\text{m}/\text{m}$;

$U_V(\tau)$ is the output voltage of the optical sensor, in volts;

k_V is the sensitivity of the optical sensor, in volts second per metre;

l_0 is the base length of the magnetostriction measurement, in metres (see Figure 2);

λ_0 is a calibration value so that the average of the magnetostriction strain $\lambda(t)$ at two zero magnetic polarizations in a period of magnetization is zero, in $\mu\text{m}/\text{m}$;

t is a time variable, in seconds;

τ is an auxiliary time variable, in seconds.

If the output of the optical sensor is in a displacement mode and $U_V(t)$ is in proportion to the displacement of the optical target, the integral part $\int_0^t U_V(\tau) d\tau$ of Formula (3) shall be replaced by $U_V(t)$, and the unit of k_V becomes volts per metre.

6.3 Determination of the butterfly loop

The butterfly loop shall be determined by drawing a closed two-dimensional curve with the magnetostriction strain $\lambda(t)$ as the vertical axis and the magnetic polarization $J(t)$ as the horizontal axis for a period of magnetization.

Before drawing the curve, noise on $\lambda(t)$ and $J(t)$ signals should be smoothed out by digital means; e.g. weighted time moving averaging or band pass filtering.

6.4 Determination of the peak-to-peak value λ_{p-p} and the zero-to-peak value λ_{0-p}

Before determining the magnetostriction characteristics, the symmetry of the butterfly loop shall be checked. If the butterfly loop is particularly asymmetrical, e.g. if the asymmetry exceeds 2 %, it shall be reported in the test report as an unusual feature.

NOTE 1 Asymmetrical butterfly loops can be caused by many factors; e.g. misalignments of the test apparatus, residual magnetization of the test specimen, residual magnetization of the yoke (see Article A.4), non-flatness of the test specimen, movement of the optical target during the measurement and factors inherent in electrical circuits of the optical sensor.

The peak-to-peak value λ_{p-p} and the zero-to-peak value λ_{0-p} shall be averages of the first and second half values of the period, which correspond to the right and left parts of the butterfly loop (see Figure 1).

NOTE 2 Subsidiary characteristics the velocity level L_V , the A-weighted velocity level L_{VA} , the acceleration level L_a and the A-weighted acceleration level L_{aA} are described in Annex E.

7 Reproducibility of the measurement of the peak-to-peak value λ_{p-p}

The reproducibility of the measurement of the peak-to-peak value λ_{p-p} of this method using the test apparatus defined above is characterized by a relative standard deviation of 2 %, but not less than a standard deviation of 0,02 $\mu\text{m}/\text{m}$. This reproducibility value has been estimated on the basis of the results of the international round robin test [4].

NOTE 1 The zero-to-peak value λ_{0-p} can take a positive or negative value. Therefore, its reproducibility of the measurement cannot be characterized by a percentage of relative standard deviation. The standard deviation of the zero-to-peak value λ_{0-p} is usually a little larger than that of the peak-to-peak value λ_{p-p} .

NOTE 2 Annex A provides requirements of the test apparatus to improve the reproducibility of the measurement.

8 Test report

The test report shall include the following, as applicable:

- a) the type and identity of the test specimen;
- b) the number of this document (IEC 60404-17), including the year of publication;
- c) the type of the optical sensor;
- d) the ambient temperature of the test specimen during the measurements;
- e) the magnetizing frequency;
- f) the peak values of magnetic polarization;
- g) the results of measurements, including the graphics of the butterfly loops;
- h) the estimated uncertainty of the measurements;
- i) any deviations from the procedure;
- j) any unusual features observed (see 5.2, 5.3 and 6.4);
- k) the date of the test.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-17:2021

Annex A (normative)

Requirements of the test apparatus for measurements of the magnetostriction characteristics

A.1 General

In order to obtain sufficient reproducibility of the method described in this document, the following shall be applied:

- correct setting of the base length of the magnetostriction measurement;
- strict control of the sinusoidal magnetic polarization;
- isolation of the test apparatus from external noises;
- suppression of the frictional force acting on the test specimen;
- suppression of the out-of-plane vibrations of the test specimen;
- avoidance of resonances in the test specimen and the test apparatus;
- calibration and verification of the test apparatus.

A.2 Correct setting of the base length of the magnetostriction measurement

The base length of the magnetostriction measurement shall be as long as possible within a uniform and unidirectional magnetic field in the longitudinal direction of the test specimen. In order to realise this condition, the primary winding shall be low profile and as long as possible between the two pole faces. The base length is the distance along the axis of the winding former between the optical target centre and the side of the clamp block facing the optical sensor.

The magnetostriction of grain-oriented electrical steel is basically due to volume changes of 90 degree magnetic domains under an applied AC magnetic field [9]. The volume of 90 degree magnetic domains changes due to the changes of the magnetic polarization and the magnetic field. The influence of the magnetic field increases as the magnetic field strength increases and when there is a magnetic field component perpendicular to the surface of the test specimen [1], [10].

Over the part of the test specimen located on the pole face, the magnetic polarization decreases with distance from the inner edge of the pole face as the magnetic flux moves to the yoke. This results in the occurrence of the Maxwell force causing out-of-plane vibrations of the test specimen (see Clause A.6). Therefore, the part of the test specimen located on the pole face shall be outside the base length.

The out-of-plane vibrations of the test specimen excited on the pole face cause alternating bends of the test specimen at the part adjacent to the pole face depending on the amount of air gaps under the test specimen. When the optical target is mounted on this part of the test specimen, the bends cause alternating tilts of the optical target resulting in an alternating change of the length between the optical target and the optical sensor. This can cause measurement offsets depending on the height of the laser beam on the optical target. Therefore, the optical target shall be placed apart from the edge of the pole face by 10 mm [4].

NOTE For example, for a bend of the test specimen with an incline rate of 0,5 μm per 10 mm, the length change between the optical target and the optical sensor is 0,1 μm when the height of the laser beam is 2 mm on the optical target. This length change corresponds to an apparent magnetostriction of 0,23 $\mu\text{m}/\text{m}$ for a base length of 436 mm.

The clamp block shall be placed on the pole face opposite to the optical sensor so that the side of the clamp block facing the optical sensor is in plane with the inner edge of the pole face. This is in order to exclude the part of test specimen on the pole face from the base length and to avoid an occurrence of out-of-plane vibration on the pole face. The clamp block may be placed

between the pole face and the winding former provided that the test specimen does not deform due to the clamping force.

A.3 Strict control of the sinusoidal magnetic polarization

The sinusoidal waveform of the compensated induced secondary voltage shall be controlled more strictly than that required for general loss measurement process in order to accomplish the sinusoidal magnetic polarization in the test specimen.

The harmonic components of magnetostriction strain of the material are affected by not only harmonic components of the magnetic polarization but also harmonic components of the magnetic field strength, especially over the higher magnetic field region.

NOTE 1 The applied magnetic field strength acts on 90 degree magnetic domain walls and can cause volume changes of 90 degree magnetic domains. However, the volume changes of 90 degree magnetic domains cause only a small change of the magnetic polarization along the rolling direction of grain-oriented electrical steel. Therefore, under sinusoidal waveform control, slight harmonics of the induced secondary voltage can cause relatively large harmonics of the magnetic field strength, especially beyond the knee of the magnetization curve.

NOTE 2 There are roughly two types of 90 degree magnetic domains in a grain-oriented electrical steel sheet. One type distributes within 180 degree magnetic domains and the other type transverses 180 degree magnetic domains. These two types of 90 degree magnetic domains have different contributions to magnetostriction.

NOTE 3 In the case that a grain-oriented electrical steel sheet is magnetized in the parallel to the rolling direction, the volume changes of the 90 degree magnetic domains have a small effect on the magnetic polarization. However, in the case that a grain-oriented electrical steel sheet is magnetized in the direction perpendicular to the rolling direction, the volume changes of the 90 degree magnetic domains are closely related to changes of the magnetic polarization when the amount of 90 degree magnetic domains increases beyond a certain level.

For sinusoidal waveform control, it is a necessary condition that the form factor of the compensated secondary voltage is $\pi/2\sqrt{2} \approx 1,110\ 7$, but it is not the only condition since non-sinusoidal waveforms can also produce the form factor of 1,110 7. Waveform control by digital means sometimes enhances higher harmonics due to an accumulation of slight phase mismatches during the iteration of wave form calculation. In order to avoid this situation, the compensated induced secondary voltage shall be sensed without external noise and phase shift as far as possible.

Therefore, not only the form factor but also the total harmonic distortion of the compensated induced secondary voltage shall be checked in order to ensure that only the fundamental component is present (see 4.5). The form factor of the compensated induced secondary voltage shall be maintained at 1,110 7 within $\pm 0,2\ %$ or better and the total harmonic distortion of the compensated induced secondary voltage of up to 1 000 Hz should be less than 1 % [3].

A DC bias of magnetization of the test specimen can increase magnetostriction values. The residual magnetizations of the yoke and/or the test specimen can cause the DC bias of magnetization. The yoke and the test specimen shall be carefully demagnetized taking a sufficient time to decrease the AC magnetic field before the measurement. DC and even harmonic components of the magnetizing current also can cause the DC bias of magnetization. The magnetizing signal supplied to the power amplifier can contain even harmonics due to noise superimposed on the signal line, and cause a difference in positive and negative peak values of the magnetizing current. Even harmonic components in the magnetizing signal shall be removed and the DC component in the magnetizing voltage shall be negligible. In order to ensure that there is no DC bias of magnetization at the measurement, the positive and negative peak values of the magnetization current shall be equivalent.

A.4 Isolation of the test apparatus from external noise

Because the magnetostriction strain of grain-oriented electrical steel is quite small, about 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ or less, when magnetized in the parallel to the rolling direction, the test apparatus shall be isolated from external noise sources, e.g. vibrational, magnetic, electrical and acoustic noise sources, as much as possible. Especially, those synchronized to the power frequency shall be

isolated because the synchronized noise is usually difficult to remove from the signal of magnetostriction.

NOTE 1 A length change of the test specimen caused by magnetostriction is miniscule; for example, only a $0,04 \mu\text{m}$ change of a base length of 400 mm due to a magnetostriction strain of $0,1 \mu\text{m/m}$. Therefore, external noise can easily cause measurement offsets.

Vibrations transmitted from the floor shall be isolated by placing the test apparatus on a vibration-free table. Vibrations transmitted through cables shall be blocked by stabilizing the cables to the vibration-free table. Wind and acoustic noise from the surroundings should be blocked by a windshield around the test apparatus if they affect the measurement.

NOTE 2 The influence of wind and acoustic noise on the measurement can be verified by observing changes in the output signal of the optical sensor in response to a human voice by means of an oscilloscope. The effects of the windshield can be tested by measurements with and without a simple cover which is constructed from non-magnetic sheets.

The test apparatus can vibrate when touched by hand. Touching the test apparatus with hand or tools during the measurement shall be avoided.

The earth's magnetic field can magnetize the yoke and the test specimen, and can introduce a DC magnetic bias in the magnetic circuit. In order to prevent this, the axis of the winding former shall be approximately at right angles to the direction of earth's magnetic field. Alternatively, a simple magnetic shield around the test apparatus may be used to reduce sufficiently the effects of the external magnetic field on the measurements.

NOTE 3 The effects of the magnetic shield can be tested by measurements with and without a simple cover which is constructed from soft magnetic sheets.

Electromagnetic devices around the test apparatus, e.g. mutual inductors, high current power lines and electromagnetic devices such as motors and transformers, can emit external magnetic field synchronized to the power frequency and can change the magnetic field applied to the test specimen. The mutual inductor for the air flux compensation which leaks magnetic flux to the surroundings shall be isolated from the test apparatus. The test apparatus shall be kept away from electromagnetic devices and high current power lines as much as possible. Alternatively, a simple magnetic shield may cover the test apparatus.

NOTE 4 The leakage magnetic flux from the mutual inductor can be shielded by providing a flux closure made of soft ferrite to the mutual inductor.

The optical sensor shall be placed a little apart from the test specimen and the yoke in order to avoid the influence of the leakage magnetic flux from the magnetic circuit.

Electrical noise superimposed on signal cables can deteriorate the quality of measurements. Noisy $\lambda(t)$ signals can cause increases in the peak-to-peak values λ_{p-p} and the zero-to-peak values λ_{0-p} . In order to reduce the noise on the signal cables, the signal cables connected to the input terminals of the measuring instruments should be isolated from the frame ground. Screened twisted pair cables should be used as the signal cables with the screens of each cable connected to signal ground. Care shall be taken in routing the signal cables to avoid superposition of inductive noise on the signals. In order to prevent superposition of noise on the signals within the measuring instruments, low noise amplifiers and low noise DC power supplies should be used. The measuring instruments and the vibration-free table should be grounded.

Synchronous averaging of the signals shall be carried out over a large number of periods, e.g. 64 or 128, to remove unsynchronized noise from the signals.

When evaluating the harmonic components of magnetostriction, it is necessary to consider the proportions of harmonic noise contained in the magnetostriction signal. The harmonic even components of the magnetostriction in the frequency range of interest shall be sufficiently larger than the adjacent odd harmonic components.

A.5 Control of the frictional force acting on the test specimen

The frictional force acting on the test specimen shall be kept low and constant; otherwise the value of magnetostriction measurement will decrease significantly [12].

There are two cases of frictional involvement: the first case is when the two rubbing surfaces are both flat and clean, and the second case is when at least one surface is non-flat and/or there is contamination on the surface that affects friction.

In the second case, the frictional force acting on the test specimen can increase significantly and the longitudinal vibration of the test specimen due to magnetostriction can be significantly damped. Therefore, it is fundamentally important to ensure that the back surface of the test specimen and the surface on which the test specimen is placed are flat and free from substances that affect friction at the measurement.

Even in the first case, the longitudinal vibration of the test specimen due to magnetostriction can be damped by the frictional force acting on the test specimen depending on the material of the surface on which the test specimen is placed. Therefore, it is important to reduce the strength of the frictional force in order to reduce measurement offsets. The influence of frictional force becomes remarkable in thinner materials and lower magnetostriction materials.

NOTE 1 The magnetostriction force can be considered as equal to the externally applied force that causes the same change in length of the material as the magnetostriction strain. It can be calculated from the zero-to-peak value λ_{0-p} and the Young's modulus of the material. In this case, the Young's modulus can be provided by the manufacturer or measured according to the dedicated ISO Standard. For example, the magnetostriction force of a 0,23 mm thick grain-oriented electrical steel sheet with a Young's modulus of 115 GPa can be estimated at around 0,26 N per 0,1 $\mu\text{m/m}$ of λ_{0-p} .

The frictional force acting on the test specimen is in proportion to the coefficient of friction of the surface where the test specimen is placed and the perpendicular force applied on the surface. Except the optical target, no weight shall be placed on the test specimen between the end of the test specimen opposite the clamp and the clamp block in order to prevent measurement offsets due to the increase of the frictional force [12].

NOTE 2 For example, a frictional force acting on a 0,23 mm thick and 400 mm long grain-oriented electrical steel sheet caused by the weight of the test specimen can be estimated at around 0,35 N for a coefficient of friction 0,5. However, the coefficients of friction given in the literature is when the two surfaces rub against a relatively long distance and may not be applicable when the rubbing distance is as short as 1 μm , as in the case of magnetostriction measurement of the grain-oriented electrical steel in the rolling direction.

A low friction film shall be adhered to the bridge strip where the test specimen is placed in order to reduce the frictional force. Fluorine resin is suitable for the material of the film because it has the lowest coefficient of friction at around 0,1 against steel. However, a thin fluorine sheet is soft and easy to stretch and is difficult to adhere onto the bridge strip without leaving any stress that can distort the bridge strip. Thin fluorine resin-impregnated glass cloth adhesive film is relatively solid and easy to adhere to the bridge strip without leaving stress. The width of the low friction film shall be less than the width of the test specimen in order to prevent interaction with the edge burrs of the test specimen.

NOTE 3 The surface texture of fine irregularities on the fluorine resin-impregnated glass cloth film is convenient to prevent fine dust from accumulating on the contact area to the test specimen and also to reduce the contact area interacting with the surface roughness of the test specimen that can resist length changes of the test specimen.

The low friction film can be worn or damaged over time. The film or the entire bridge shall be replaced if the surface of the film is worn out or severely damaged, see Clause A.8.

The surface of the bridge strip onto which the low friction film is adhered shall be flat without slight steps and protrusions in order to reduce shape-dependent effects of the frictional force acting on the test specimen, and also to avoid air gap formations under the test specimen which can induce out-of-plane vibrations of the test specimen. Protrusions on both surfaces of the bridge strip shall be removed before assembly, for example, by means of a straight edge of a steel plate or fine sandpaper glued to a flat plate.

The Maxwell forces applied to the test specimen on the pole face increase the frictional force acting on the test specimen. The strength of the Maxwell force is in inverse proportion to the area of pole face and in proportion to the square of the RMS value of magnetic flux density on the pole face. Therefore, the length of the pole faces should be sufficiently large, 25 mm or more, and the flux density on the pole faces should be homogenised in order to reduce the frictional force. The bridge strip between the test specimen and the pole face has an effect to homogenise the flux density distribution.

NOTE 4 For example, the Maxwell force is estimated at around 0,24 N for a pole face of 25 mm x 100 mm with a homogeneous flux density for a 0,23 mm thick grain-oriented electrical steel sheet at magnetic polarization of 1,7 T in the material.

The electrostatic force applied to the test specimen significantly increases the frictional force. Therefore, the electric charge accumulated on the test specimen for some reason shall be grounded through contact with the end stop.

Vibration of the bridge can change the frictional force acting on the test specimen. Therefore, external vibration shall be isolated from the test apparatus by the vibration-free table and the winding former shall be separated from the bridge to prevent vibration transmission to the bridge.

In contrast, the bottom face of the clamp block that comes into contact with the test specimen shall have a sufficiently high coefficient of friction to hold the test specimen. In order to hold the vibrating test specimen sufficiently, the bottom face shall be parallel to the top of the bridge strip, and the clamping force on the test specimen shall work evenly over the entire bottom face.

NOTE 5 If the bottom face is tilted with respect to the axis of the winding former, the clamp block can vibrate due to the length changes of the test specimen. This decreases the magnetostriction values and changes the harmonic components. Whether the bottom face is parallel to the top of the bridge strip can be verified by sandwiching a pressure measurement sheet, that can indicate applied pressure as colour density variation, between them.

A.6 Suppression of out-of-plane vibrations of the test specimen

The Maxwell forces on the pole faces can cause out-of-plane vibrations of the test specimen depending on the amount of air gaps under the test specimen. Out-of-plane vibrations can induce only small length changes of the test specimen but induce remarkable pseudo-length changes due to alternating tilts of the optical target which causes measurement offsets (see Clause A.2) [3]. If the out-of-plane vibration of the test specimen on the pole face is large enough, the vibration can be transmitted to the part of test specimen within the base length of the magnetostriction measurement and can change the frictional force acting on the test specimen which can cause measurement offsets.

The frequency of the Maxwell force is twice the magnetizing frequency, but the effects of collisions between the test specimen and the surface under the test specimen can create higher harmonics. If there are protrusions on the pole face or the surface of the bridge strip, out-of-plane vibrations of test specimen can occur locally with various natural frequencies.

In order to suppress the measurement offsets, the air gaps under the test specimen shall be reduced as much as possible. To do so, the bridge strip shall be stiff enough not to be distorted by stress during processing and over time, the surfaces of the test specimen and the low friction film shall be free of pollution and the two pole faces shall be in the same plane as far as possible. At both ends of the bridge, the bridge strip shall be in close contact with the pole faces. The remaining space between the bridge strip and the pole faces shall be filled with high vacuum silicon grease whilst keeping the top surface of the bridge strip flat to prevent the bridge strip vibrating due to the vibration of the test specimen (see 4.1).

Both ends of the test specimen shall overhang the bridge. Otherwise, they may create large air gaps under the test specimen if the ends have been deformed by cutting.

A.7 Avoidance of resonances in the test specimen and the test apparatus

Resonances in the test specimen and the test apparatus can influence particular harmonic components of magnetostriction strain [11]. Natural frequencies of the test specimen and the test apparatus can be estimated by structural calculations [12]. The first-order natural frequency of the test apparatus shall be higher than 1 200 Hz in order to prevent resonance with the harmonic components of magnetostriction strain of up to 1 000 Hz.

In-plane natural frequencies of a plate with boundary conditions of one end clamped and the other end free are functions of the length, the density and the modulus of elasticity of the material. For example, the first in-plane natural frequency of a 500 mm long grain-oriented electrical steel sheet is estimated to be higher than 2 000 Hz [12]. This natural frequency can induce no effective resonance with the harmonic components of magnetostriction strain.

However, with a boundary condition of one end clamped and the other end connected to a mass, the in-plane natural frequencies can be lower than 1 000 Hz depending on the connected mass [12]. Therefore, the end of the test specimen opposite to the clamp shall not be connected to anything. Even at measurements under an externally applied compressive stress, the end of the test specimen shall not be clamped with the stressing device and the mass of the moving parts of the stressing device should be as light as possible (see Clause B.3).

Out-of-plane natural frequencies of a plate with the clamp-free boundary condition depend on the length, the density, the thickness, the elasticity modulus and the Poisson's ratio of the material [11]. For example, the first to the third out-of-plane natural frequencies of the grain-oriented electrical steel test specimen of 400 mm length is estimated to be below 30 Hz [11]. This natural frequency can induce no effective resonance with the harmonic components of magnetostriction strain. However, the parts of the test specimen situated outside the pole faces or separated from the bridge strip by air gaps can have higher natural frequencies that can resonate with the harmonic components of magnetostriction strain. These parts of the test specimen shall be no longer than a few mm to prevent the resonances.

Out-of-plane vibrations can be suppressed or amplified by a weight placed on the test specimen depending on its mass [12], despite the weight increasing the frictional force acting on the test specimen. However, if the mass matches the natural frequencies of the combined system with the harmonics components of magnetostriction strain, resonance can occur. Therefore, except the optical target, no weight shall be placed on the test specimen in terms of resonance and friction (see Clause A.6).

If a resonance occurs, the amplitude of a particular harmonic component of magnetostriction strain changes with phase shift. If it occurs at the fundamental tone of magnetostriction, the shape of the butterfly loop becomes similar to the symbol for infinity " ∞ ". If it occurs at higher harmonic components of magnetostriction strain, waves of the resonance frequencies overlap the wave of the magnetostriction strain $\lambda(t)$ and the butterfly loop becomes wavy and sometimes has multiple interactions. In these cases, values of λ_{p-p} and λ_{0-p} are usually incorrect.

Resonances occurring in the test apparatus also can cause measurement offsets. Care shall be taken to reduce resonances in the components, particularly those close to the test specimen, e.g. the windings combined with the winding former, the clamp block, the weight, the bridge, the yoke and cables connected to the test apparatus. These components shall be fixed or stabilized to the vibration-free table so that they cannot vibrate freely. The clamp block shall be combined with the weight so that its natural frequencies do not match with the harmonic components of magnetostriction strain.

A.8 Calibration and verification of the test apparatus

The reproducibility of the measurement required in this document requires careful calibration of the measuring instruments and verification of the test apparatus.

The output signal of the optical sensor should be verified by means of a calibration exciter. It can be carried out by incidence of the laser beam perpendicular to the diaphragm of the calibration exciter. If the obtained output of the optical sensor is within the accuracy of the specified value of the calibration exciter, it is not necessary to adjust the output signal level of the optical sensor, because the accuracy of the calibration exciter is usually wider than that required for magnetostriction measurement.

NOTE 1 For example, the accuracy of a calibration exciter is ± 3 % for acceleration of 10 m/s² RMS, ± 4 % for velocity of 10 mm/s and ± 5 % of displacement of 10 μ m, at 159,2 Hz and from 10 °C to 40 °C.

The signal delay of the optical sensor should be known from its instruction manual, because it is difficult to determine by experiments. The signal delay of the optical sensor should be compensated by digital means.

NOTE 2 The signal delay of the optical sensor can change the shape of butterfly loops, but hardly changes the peak-to-peak values and the zero-to-peak values.

The signal channels of the digitizer, including each preamplifier, shall be calibrated using a calibrated reference AC voltage source which is traceable to national standards. By connecting the source to all voltage inputs of the signal channels at once, differences in amplitude and phase shift of each channel can be detected for a specified frequency. The differences in amplitude and phase shift should be compensated by digital means.

The test apparatus shall be verified so that no out-of-plane vibration of the test specimen occurs. To do this, magnetostriction measurements shall be done for a high permeability grain-oriented electrical steel sheet cut along the rolling direction changing the paste position of the optical target on the axis of the test specimen. The measurements shall be done whilst changing the value of the base length according to the optical target position. The positions are (a) the specified position, i.e. 10 mm apart from the inner edge of the pole face, (b) on the inner edge of the pole face, (c) on the centre of the pole face and (d) on the outer edge of the pole face.

The butterfly loops shall be almost the same shape except the vertical size regardless of the optical target positions (a) to (d).

It shall be confirmed that the peak-to-peak value at the position (b) is almost the same value as the value at position (a) within 3 % and the value decreases as the optical target moves from the position (b) to the position (d).

NOTE 3 The local magnetostriction strain in the test specimen on the pole face decreases with the distance from the inner edge of pole face as the magnetic flux passing through the test specimen decreases with the distance due to the magnetic flux entering the yoke [4].

If different from above, out-of-plane vibrations of the test specimen are occurring on the pole face. In this case, the causes shall be removed (see Clause A.6).

The measurement system shall be verified by measuring a butterfly loop of a high permeability grain-oriented electrical steel sheet cut perpendicular to the rolling direction. Figure A.1 shows the typical feature of a normal butterfly loop.

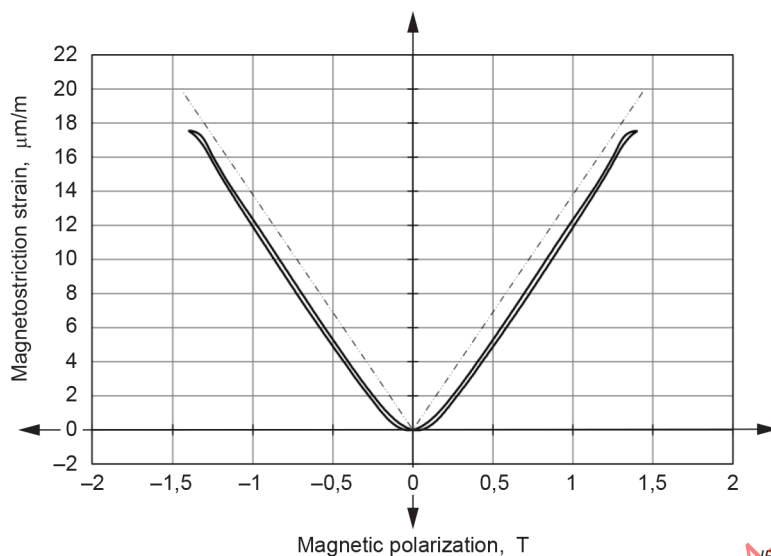


Figure A.1 – Butterfly loop of a high permeability grain-oriented electrical steel sheet cut perpendicular to the rolling direction [3]

The shape of the butterfly loop below 1,4 T shall be V-shaped with a round bottom and almost closed narrow straight wings between 0,3 T and 1,2 T as shown in Figure A.1. The slope of the narrow wings is theoretically the same as the ratio of the saturation magnetostriction to the saturation magnetic polarization. The peak-to-peak value depends on the material but often falls between 17,4 μm/m and 18,0 μm/m for a high permeability grain-oriented electrical steel sheet cut perpendicular to the rolling direction.

NOTE 4 The peak-to-peak values can decrease due to the increased frictional force acting on the test specimen (see Clause A.5). However, the values can increase or decrease due to out-of-plane vibrations of the test specimen (see Clause A.6).

If the measured butterfly loop has different features from above, the system shall be improved to get a normal butterfly loop.

NOTE 5 The width of the narrow wings is due to the delay in the change of magnetic domain structure due to the change of magnetic polarization and the signal delay in the optical sensor.

If bends are observed on the straight wings, overranges of the magnetostriction strain $\lambda(t)$ signal may have occurred in the signal amplifying process of the measuring instruments. This should be checked and the causes shall be removed.

If a resonance at lower harmonic components of magnetostriction strain occurs, the narrow straight wings become distorted, and the width of the wings become increased and sometimes twisted, depending on the frequency and the degree of phase delay of the resonance vibration. Also, if a resonance at higher harmonic components of magnetostriction strain occurs, the line of the butterfly loop becomes wavy. If these features are obtained, the resonance of the test apparatus shall be checked and the causes shall be removed.

It is recommended to prepare standard test specimens for monitoring changes in measured values at each laboratory and to check whether the measured value has changed over time. If the average of the measured value when the standard test specimen is measured multiple times decreases beyond the reproducibility of the measurement, i.e. 2 %, from the normal value, it can be judged that the test apparatus is in an abnormal state. In this case, the requirement items described in Clause A.2 to Clause A.8 should be checked. If there is no problem with all the items except the low friction film, the low friction film or the entire bridge shall be replaced, considering the surface of the film to be worn out or severely damaged.

The values on the standard test specimens may be confirmed by a round robin test between laboratories.

Annex B (informative)

Measurements of the magnetostriction characteristics under an externally applied compressive stress

B.1 General

This Annex B defines the general principle and technical details of the measurement of the magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel strip and sheet under an externally applied compressive stress of up to 5 MPa in the longitudinal direction of the test specimen.

NOTE 1 Magnetostriction characteristics of grain-oriented electrical steel in the rolling direction usually deteriorate remarkably under a compressive stress in this direction, but show only minor changes under a tensile stress [1]. These are due to the tensile stress inside the material applied by the surface coatings.

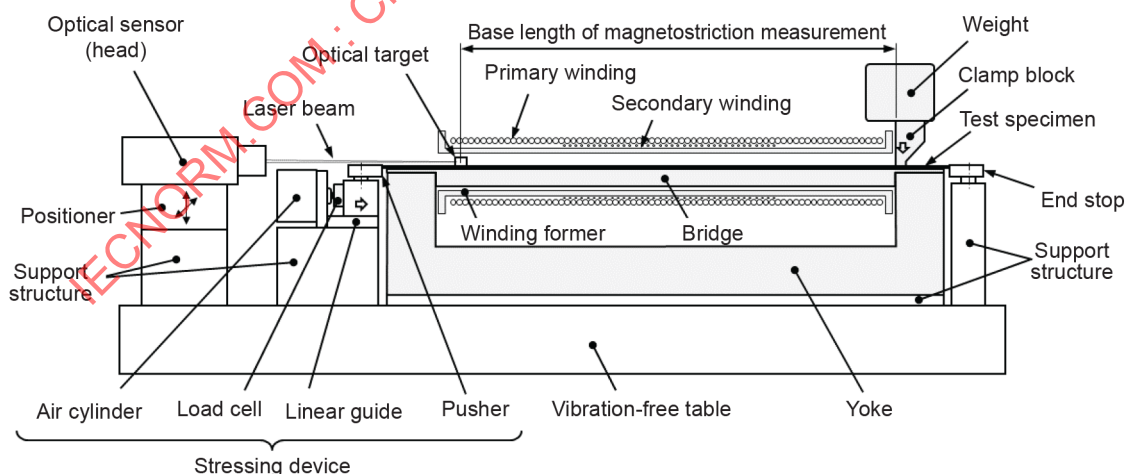
NOTE 2 The range of the compressive stress can be increased up to 10 MPa provided that measures are taken to prevent bending of the test specimen without applying a load on the test specimen and restricting the length change of the test specimen by these measures.

B.2 Test specimen

The test specimen shall comply with 4.2.

B.3 Test apparatus

A schematic diagram of a test apparatus for the measurement under an externally applied compressive stress is illustrated in Figure B.1. A stressing device fixed to the vibration-free table is added to the test apparatus shown in Figure 2. The test apparatus is assembled in accordance with 4.3. The stressing device can be fixed to the rigid base plate on which the test apparatus is assembled. The ends of the test specimen overhang the bridge.



IEC

**Figure B.1 – Schematic diagram of a test apparatus for the measurement
under an externally applied compressive stress (cross-sectional)**

The test specimen is compressed between the stressing device and the end stop without bending.

The stressing device consists of an air cylinder, a load cell, a pusher and a linear guide. The linear guide restricts the pusher to move only along the axis of the winding former. The air

cylinder drives the pusher towards the end of the test specimen and applies a compressive stress of up to 5 MPa to the test specimen in the longitudinal direction. The air cylinder should be a low speed type to enable smooth movement of the pusher and to avoid a sudden collision with the test specimen. The cross-sectional area of the cylinder is as small as possible provided that it can apply the required compressive stress (see Clause A.7).

The load cell is installed between the pusher and the air cylinder to detect the force applied to the end of the test specimen. The load cell has natural frequencies higher than 1 000 Hz in order to prevent resonance with the harmonic components of magnetostriction strain.

The side of the pusher facing the end of the test specimen is the same width or wider than the test specimen. The side is parallel or slightly tilted downward to the end face of the test specimen in order to prevent an out-of-plane deformation of the test specimen. The top of the pusher has a groove for passing the laser beam between the optical sensor and the optical target.

The pusher can rotate slightly around a vertical axis so that compressive stress is applied uniformly across the width of the test specimen even if the end of the test specimen is not placed exactly perpendicular to the direction of stressing. The movable range of the pusher along the axis of the winding former is restricted in order to prevent damage of the test specimen and the winding former even if the test specimen bends while stressing.

NOTE Magnetostriction characteristics of the test specimen under uneven compressive stress in width can cause significantly deteriorated results from those under even stress.

The mass of movable parts of the stressing device is as small as possible (see Clause A.7). While not stressed, the pusher is retracted to leave the end of the test specimen free.

B.4 Measurement procedure

The test specimen is placed on the bridge in accordance with 4.1 and 5.2.

Before clamping the test specimen, a sufficiently low air pressure is applied slowly to the air cylinder so that the pusher gradually makes contact with the end of the test specimen without making an air gap between the ends of the test specimen and the bridge strip. After contact, the test specimen is fixed to the test apparatus by means of the clamp block and the weight.

After clamping is completed, the air pressure is slowly increased until the output of the load cell reaches the prescribed value according to the specified compressive stress level. The output of the load cell is maintained constant within ± 1 % during the measurement under stressing.

NOTE 1 The air pressure can be controlled by means of an electro-pneumatic regulator controlled by a DC voltage.

For the evaluation of the stress sensitivity of magnetostriction, the compressive stress is set at 3 MPa unless another stress is specified.

NOTE 2 The compressive stress applied to grain-oriented electrical steel sheets in a transformer core is considered to be less than 3 MPa. The 3 MPa stress corresponds to the maximum magnetostriction force of grain-oriented electrical steel having a saturation magnetostriction of $2,6 \times 10^{-5}$ and a Young's modulus of 115 GPa.

The other measurement procedures comply with Clause 5.

B.5 Determination of characteristics

The determination of the magnetic polarization and the magnetostriction characteristics comply with Clause 6.

A stress sensitivity of magnetostriction can be evaluated as a percentage increase in the peak-to-peak value λ_{p-p} by applying the specified compressive stress, i.e. 3 MPa.

A stress sensitivity incremental coefficient can be determined as an increment of λ_{p-p} and λ_{0-p} per 1 MPa at the specified compressive stress, i.e. 3 MPa, expressed in $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$.

NOTE The stress sensitivity cannot be evaluated in percentage terms by the zero-to-peak values λ_{0-p} because it can change from minus sign to plus sign by applying compressive stresses.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-17:2021

Annex C (informative)

Air flux compensation by digital means

The effect of air flux on the induced secondary voltage can be compensated by subtracting the air flux induced secondary voltage from the uncompensated induced secondary voltage by digital means.

The air flux induced secondary voltage can be calculated by the following methods:

a) Magnetizing current method

The air flux induced secondary voltage is in proportion to the time differential value of the magnetizing current. The magnetizing current can be detected by the voltage drop across a non-inductive precision resistor in series with the primary winding. The differentiation should be carried out by digital means in a way to avoid phase shifts and significant amplifications of noise injected from the current signal. A possible method is a five-point differentiation.

b) H coil method

The air flux induced secondary voltage is in proportion to the voltage induced in the air-flux coil (H coil) embedded in the bridge inside the secondary winding.

NOTE For H coil method, see IEC 60404-16:2018 [7].

For the magnetizing current method, the compensation can be carried out as follows:

$$U_{2c}(t) = U_2(t) - \frac{C_1}{R} \cdot \frac{dU_1(t)}{dt} \quad (\text{C.1})$$

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

$$U_{2c}(t) = U_2(t) - C_H \cdot U_H(t) \quad (\text{C.2})$$

where

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

$U_2(t)$ is the uncompensated induced secondary voltage, in volts;

C_1 is the value of compensation factor of the magnetizing current method, in ohm seconds;

C_H is the value of compensation factor of the H coil method;

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

$U_1(t)$ is the voltage drop across the non-inductive precision resistor R_n , in volts;

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

t is a time variable, in seconds.

The value of compensation factor C_1 or C_H can be determined so that, when passing an AC current through the primary winding in the absence of the test specimen in the magnetic circuit, the compensated induced secondary voltage $U_{2c}(t)$ becomes no more than 0,1 % of the uncompensated induced secondary voltage $U_2(t)$.

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

Annex D (informative)

Sinusoidal waveform control of the induced secondary voltage by digital means

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

The voltage $U_g(t)$ to be fed into the computer-controlled arbitrary signal generator can be calculated by Formula (D.1) neglecting spurious capacitance effects ([13], [14], [15], [16]).

$$U_g(t) = \frac{1}{G} \left(N_1 \left(A \frac{dJ(t)}{dt} + \mu_0 A_1 \frac{dH(t)}{dt} \right) + R_s I(t) \right) = \frac{1}{G} \left(AN_1 \frac{dJ(t)}{dt} + L \frac{dI(t)}{dt} + R_s I(t) \right) \quad (D.1)$$

where

- $U_g(t)$ is the voltage to be fed into the arbitrary signal generator, in volts;
- G is the total gain of the power amplifier and the isolation transformer inserted between the power amplifier and the primary winding;
- N_1 is the total number of turns of the primary winding;
- $J(t)$ is the prescribed magnetic polarization, in teslas;
- $H(t)$ is the magnetic field strength, in amperes per metre;
- $I(t)$ is the magnetizing current, in amperes;
- A is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;
- A_1 is the effective cross-sectional area of the primary winding, in square metres;
- L is the inductance of the primary winding in the absence of the test specimen in the magnetic circuit, in henry;
- μ_0 is the magnetic constant; $\approx 4\pi \times 10^{-7}$ henrys per metre;
- R_s is the total series resistance of the magnetizing circuit, in ohms.

Additionally, an iterative method of signal waveform control is possible. A voltage $U_{i+1}(t)$, to be fed into the arbitrary signal generator at $(i + 1)$ -th step, can be calculated by Formula (D.2). The voltage $U_{i+1}(t)$ is calculated from the difference between the compensated induced secondary voltage $U_2(t)$ and the calculated voltage induced in the second winding when the prescribed magnetic polarization has been achieved $U_J(t)$. The iteration can be stopped once the prescribed form factor value 1,110 7 of the compensated induced secondary voltage within $\pm 0,2$ % or better and the total harmonic distortion of the compensated induced secondary voltage of up to 1 000 Hz less than 1 % are attained.

$$U_{i+1}(t) = U_i(t) + K \frac{N_1}{GN_2} (U_J(t) - U_2(t)) \quad (D.2)$$

where

- $U_{i+1}(t)$ is the voltage to be fed into the arbitrary signal generator at $(i + 1)$ -th step, in volts;

- K is the constant of negative-feedback; positive value below 1,0;
- G is the total gain of the power amplifier and the isolation transformer inserted between the power amplifier and the primary winding;
- N_2 is the total number of turns of the secondary winding;
- $U_J(t)$ is the calculated voltage induced in the secondary winding when the prescribed magnetic polarization has been achieved, in volts;
- $U_2(t)$ is the compensated induced secondary voltage, in volts.

The total time for the sinusoidal waveform control by digital means becomes longer compared with the analogue means, because it is the repetition of magnetization, acquisition of the signals, demagnetization and re-magnetization. In order to reduce the total time, a special apparatus that switches the signals $U_i(t)$ to $U_{i+1}(t)$ seamlessly can be adopted to omit the process of demagnetization and re-magnetization.

Care should be taken to reduce the phase shift between the voltages $U_J(t)$ and $U_2(t)$ since it can increase harmonic components of the compensated induced secondary voltage by the iteration.

Annex E (informative)

Magnetostriction characteristics for the acoustic design of power transformers

E.1 Transformer no-load noise/sound development process

The noise or sound of power transformers in the no-load excitation state is the so-called “transformer no-load noise/sound”. It originates in vibrations of the transformer core that is made from many sheets of grain-oriented electrical steel.

As soon as the transformer is energized, magnetic flux is passing through the core sheets and this generates core losses and elastic core deformations causing vibrations. The core deformations are caused by two physical phenomena; i.e. magnetostriction and magnetic attraction forces (Maxwell forces). While the magnetic attraction forces mainly occur in the core corners where magnetic flux is crossing between stacked core sheets, magnetostriction occurs mainly in the bulk part of the core where magnetic flux is passing through the core sheets.

Both phenomena in conjunction are considered as the root sources of the transformer no-load noise/sound and are physically inherent. Consequently, the transformer no-load noise/sound cannot be avoided. However, it can be controlled, but within limits. Control of the attraction forces is predominantly done with the core design. Magnetostriction, as a material inherent property, requires control during the entire production process, i.e. from material manufacturing to core manufacturing, in order to minimize the detrimental effects of residual stress and/or applied stress as much as possible.

Of course, there are many impacting parameters along the transfer path of the vibrations from the sources to the measuring point of the noise/sound at a certain distance away from the transformer. Such parameters are all related to the transformer design and manufacturing. The understanding of the parameters and the application of a suitable control of these parameters are indispensable for the production of acoustically well-performing transformers.

A specific design feature important to control and therefore worth mentioning is an avoidance of globally effective resonances that can occur to the core, constructional parts and the tank of the transformer, where applicable.

E.2 Transformer no-load sound levels and magnetostriction strain

Transformer noise/sound is generally specified and measured in terms of sound levels, either sound pressure levels or sound power levels. The transformer no-load noise/sound levels, if analyzed frequency selectively, comprise a number of distinct harmonics contributing to the transformer no-load noise/sound. The frequencies f_i of such harmonics are at even multiples of the magnetizing frequency f_0 ; i.e. $f_i = 2 \cdot i \cdot f_0$ for $i = 1, 2, 3, \dots$

There are two reasons for the appearance of noise/sound harmonics. The first reason is the non-linear characteristic of magnetostriction, i.e. a sinusoidal magnetic polarization at a magnetizing frequency is causing magnetostriction strains not only at double the magnetizing frequency but also at higher order harmonic frequencies. The second reason is harmonics in the magnetic flux passing through the core sheets. Practically, vibration harmonics of up to 600 Hz regularly or in specific cases up to 1 000 Hz are enough to assess for noise/sound purposes.

The magnetostriction strain is usually characterized in respect of the material properties by the butterfly loop, the peak-to-peak value and the zero-to-peak value as a function of the magnetic polarization. However, for the acoustic design of power transformers, it is necessary to have

information on the harmonic components of the magnetostriction strain as a function of magnetic polarization.

While full information consisting of both information on the amplitude and the phase of each harmonic component of the magnetostriction strain is useful for the acoustic design of power transformers, in practice, it is normally enough to have information on the amplitudes of the harmonic components of magnetostriction strain of up to 1 000 Hz. It is considered that the amplitudes of the harmonic components of magnetostriction strain act as vibration sources of the core and therewith excite the no-load noise/sound of the transformer.

For the development of grain-oriented electrical steel products for low-noise power transformers, it is substantially essential to control the harmonic components of magnetostriction strain. It is also noted that the magnetostriction strain can exhibit variations in an amount of core steel and follows a statistical distribution, similar to core losses. For the quantification of a specific amount of core steel in terms of magnetostriction strain, it is therefore important to test several representative test specimens suitably selected from the entire amount and average the quantities, similar to core losses.

E.3 Vibration levels characterizing magnetostriction strain

Although knowledge of the individual amplitudes of the harmonic components of magnetostriction strain would normally be enough for the transformer manufacturer, it is still impractical and the comparison of the individual amplitudes of the harmonic components of magnetostriction strain between different batches of core steel could cause confusion in the transformer industry. A better approach to inform the transformer industry on the magnetostriction strain characteristic of a specific batch of core steel is by using vibration levels. This was proposed in literature [17] and follows the transformer noise/sound quantification using sound levels.

Because a vibration velocity is directly related to the loudness of sound, the velocity level L_v is the preferred quantity to be used for the characterization of magnetostriction strain. Historically, also the acceleration level L_a is sometimes used for the characterization of magnetostriction strain.

The frequency resolution for transformer sound level measurements according to IEC 60076-10:2016 [18] is set to be in 1/3 octave bands together with the total sound level comprising the entire frequency range to be provided in the test protocol. This practice is reflected in the vibration levels of the magnetostriction strain and requires measurements of the individual harmonic components of magnetostriction strain together with the total vibration level comprising all the measured harmonic components i of interest.

The sound levels of transformers are normally requested to be A-weighted using the industry-wide applied frequency-weighted filter “A” defined in IEC 61672-1:2013, however not always. This option is also applicable to the total vibration level resulting in A-weighted velocity levels L_{vA} [17] and A-weighted acceleration levels L_{aA} [19]. The frequency weighting filter “A” emphasizes sound of tones around 1 000 Hz to 6 000 Hz where the human ear is most sensitive, while attenuating tones at lower and higher frequencies because the human ear is less sensitive to them. The fundamental tone of the transformer no-load noise/sound and therewith magnetostriction strain, i.e. 100 Hz at a magnetizing frequency 50 Hz, or 120 Hz at a magnetizing frequency 60 Hz, is less important than the higher harmonic components in the noise/sound and magnetostriction strain spectra.

E.4 Determination of vibration levels

E.4.1 General

The calculation of the total vibration levels is based on the measured amplitudes of the harmonic components of magnetostriction strain λ_i , normally obtained by Fast Fourier Transform (FFT) of the discretized time signal of magnetostriction strain $\lambda(t)$. At first, the individual harmonic components of the vibration levels $L_v(f_i)$ or $L_a(f_i)$ are calculated and later the total vibration levels L_v or L_a are derived for all harmonic components i of interest. If A-weighting is applicable, this will be introduced after the calculation of the individual harmonic components, resulting in $L_{vA}(f_i)$ or $L_{aA}(f_i)$ and later in L_{vA} or L_{aA} .

NOTE The fundamental component is dominant in the harmonic components of magnetostriction strain in the rolling direction of grain-oriented electrical steel sheet; i.e. 100 Hz component at a magnetizing frequency of 50 Hz. Therefore, the L_{vA} and L_{aA} values change significantly depending on whether the fundamental component is within the harmonic components i of interest.

E.4.2 Velocity levels

A harmonic component of the velocity level L_v at a harmonic frequency f_i , expressed in dB, is calculated by Formula (E.1),

$$L_v(f_i) = 20 \log_{10} \frac{(2\pi f_i) \cdot \left(\frac{\lambda_i}{\sqrt{2}} \right)}{v_0} \quad (\text{E.1})$$

and a harmonic component of the A-weighted velocity level L_{vA} at a harmonic frequency f_i , expressed in dB(A), is calculated by Formula (E.2).

$$L_{vA}(f_i) = L_v(f_i) + A(f_i) \quad (\text{E.2})$$

The velocity level L_v comprising all harmonic components i of interest, expressed in dB, is calculated by Formula (E.3),

$$L_v = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_v(f_i)}{10}} \quad (\text{E.3})$$

and the A-weighted velocity level L_{vA} comprising all harmonic components i of interest, expressed in dB(A), is calculated by Formula (E.4),

$$L_{vA} = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{vA}(f_i)}{10}} \quad (\text{E.4})$$

where

- $L_{V(f_i)}$ is the harmonic component of velocity level at a harmonic frequency f_i , in dB;
- $L_{VA(f_i)}$ is the harmonic component of A-weighted velocity level at a harmonic frequency f_i , in dB(A);
- L_V is the velocity level comprising all harmonic components i of interest, in dB;
- L_{VA} is the A-weighted velocity level comprising all harmonic components i of interest, in dB(A);
- f_i is the frequency of the i -th harmonic component of the magnetostriction strain, in Hz;
 $f_i = 2 \cdot i \cdot f_0$ for $i = 1, 2, 3, \dots$;
- f_0 is the magnetizing frequency, in Hz (e.g. 50 Hz or 60 Hz);
- λ_i is the amplitude of the i -th harmonic component of the magnetostriction strain $\lambda(t)$;
- v_0 is the reference velocity defined in IEC 60050-801-22-08; $v_0 = 1 \times 10^{-9}$ m/s;
- $A(f_i)$ is the A-weighting coefficient at the harmonic frequency f_i defined in IEC 61672-1:2013, as given in Table E.1 and Table E.2 for harmonics at magnetizing frequencies 50 Hz and 60 Hz respectively.

The velocity levels are rounded to one digit after the decimal point.

NOTE The calculation procedure of the A-weighted velocity level in Clause C.1 of IEC TR 62581:2010 [1] follows a different approach. The calculated velocity level therefore deviates by a constant adder of 33,72 dB compared to the result from Formula (E.4) due to the difference in the reference velocity.

Table E.1 – A-weighting coefficients at a magnetizing frequency of 50 Hz

Harmonic frequency f_i , in Hz	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
A-weighting coefficient $A(f_i)$, in dB	-19,14	-10,85	-7,05	-4,77	-3,25	-2,17	-1,38	-0,79	-0,35	0,00

Table E.2 – A-weighting coefficients at a magnetizing frequency of 60 Hz

Harmonic frequency f_i , in Hz	120	240	360	480	600	720	840	960	1 080	1 200
A-weighting coefficient $A(f_i)$, in dB	-16,71	-9,06	-5,57	-3,51	-2,17	-1,25	-0,60	-0,13	0,22	0,49

E.4.3 Acceleration levels

A harmonic component of the acceleration level L_a at a harmonic frequency, f_i , expressed in dB, is calculated by Formula (E.5),

$$L_a(f_i) = 20 \log_{10} \frac{(2\pi f_i)^2 \cdot \left(\frac{\lambda_i}{\sqrt{2}} \right)}{a_0} \quad (\text{E.5})$$

and a harmonic component of the A-weighted acceleration level L_{aA} at a harmonic frequency f_i , expressed in dB(A), is calculated by Formula (E.6).

$$L_{aA}(f_i) = L_a(f_i) + A(f_i) \quad (\text{E.6})$$

The acceleration level L_a comprising all harmonic components i of interest, expressed in dB, is calculated by Formula (E.7),

$$L_a = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_a(f_i)}{10}} \quad (\text{E.7})$$

and the A-weighted acceleration level L_{aA} comprising all harmonic components i of interest, expressed in dB(A), is calculated by Formula (E.8).

$$L_{aA} = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{aA}(f_i)}{10}} \quad (\text{E.8})$$

where

$L_a(f_i)$ is the harmonic component of acceleration level at a harmonic frequency f_i , in dB;

$L_{aA}(f_i)$ is the harmonic component of A-weighted acceleration level at a harmonic frequency f_i , in dB(A);

L_a is the acceleration level comprising all harmonic components i of interest, in dB;

L_{aA} is the A-weighted acceleration level comprising all harmonic components i of interest, in dB(A);

f_i is the frequency of the i -th harmonic component of the magnetostriction strain, in Hz;
 $f_i = 2 \cdot i \cdot f_0$ for $i = 1, 2, 3, \dots$;

f_0 is the magnetizing frequency, in Hz (e.g. 50 Hz or 60 Hz);

λ_i is the amplitude of the i -th harmonic component of the magnetostriction strain $\lambda(t)$;

a_0 is the reference acceleration defined in IEC 60050-801-22-09; $a_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$;

$A(f_i)$ is the A-weighting coefficient at the harmonic frequency f_i defined in IEC 61672-1:2013, as given in Table E.1 and Table E.2 for harmonics at magnetizing frequencies 50 Hz and 60 Hz respectively.

The acceleration levels are rounded to one digit after the decimal point.

NOTE The calculation procedure of the A-weighted acceleration level in Clause C.2 of IEC TR 62581:2010 [1] follows a different approach. The calculated acceleration level therefore deviates by a constant adder of 48,92 dB compared to the result from Formula (E.8) due to difference in the reference acceleration.

E.4.4 Reproducibility of the measurements of the velocity level and the acceleration level values

The reproducibility of the measurements of the A-weighted velocity level L_{vA} and the A-weighted acceleration level L_{aA} of this method using the test apparatus defined in this document is characterized by a standard deviation of 1,5 dB(A) in the rolling direction of grain-oriented electrical steel sheet at a peak magnetic polarization of 1,7 T and a magnetizing frequency of 50 Hz. These reproducibility values have been estimated in the basis of the results of the international round robin test [4].

Bibliography

- [1] IEC TR 62581:2010, *Electrical steel – Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens*
- [2] PhD thesis of S. Tabrizi, Study of effective methods of characterization of magnetostriction and its fundamental effect on transformer core noise, 2013, Cardiff University, United Kingdom.
- [3] J. Kobori, Y. Takahashi and K. Fujiwara, The international round robin test of magnetostriction measurement of grain-oriented electrical steel by means of a single sheet tester and an optical sensor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 513 (2020) 166541.
- [4] S. Siebert, C. Kajiwara, K. Fujiwara, P. Klimczyk, Establishment of the standard method of AC magnetostriction measurement of grain-oriented electrical steel strip and sheet, to be published.
- [5] P. Anderson, A. Moses and H. Stanbury, *An automated system for the measurement of magnetostriction in electrical steel sheet under applied stress*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 714-716.
- [6] P. Klimczyk, P. Anderson, A. Moses and M. Davies, *Influence of cutting techniques on magnetostriction under stress of grain oriented electrical steel*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 48 (2012) 1417-1420.
- [7] IEC 60404-16:2018, *Magnetic materials – Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of Fe-based amorphous strip by means of a single sheet tester*
- [8] IEC 60404-2:2008, *Magnetic materials – Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame*
IEC 60404-2:1996/AMD1:2008
- [9] J. Shilling and G. Houze, Jr., *Magnetic properties and domain structure in grain-oriented 3 % Si-Fe*, *IEEE Transaction of Magnetism* 10 (1974) 195-223.
- [10] S. Arai, M. Mizokami and M. Yabumoto, Magnetostriction of grain-oriented Si-Fe and its domain model, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 87 (2011) 20-23.
- [11] M. Javorski, J. Slavič and M. Boltežar, *Frequency characteristics of magnetostriction in electrical steel related to the structural vibrations*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 48 (2012) 4727-4754.
- [12] S. Siebert, J. Kobori, K. Fujiwara and P. Klimczyk, *Standardization of the method of magnetostriction measurement of grain-oriented electrical steel strip and sheet*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 504 (2020) 166644.
- [13] G. Birkelbach, K. Hempel and F. Schulte, *Very low frequency magnetic hysteresis measurements with well-defined time dependence of the flux density*, *IEEE Transaction of Magnetism* MAG-22 (1986) 505-507.
- [14] G. Bertotti, E. Ferrara, F. Fiorillo and M. Pasquale, *Loss measurement on amorphous alloys under sinusoidal and distorted induction waveform using a digital feedback technique*, *Journal of Applied Physics* 73 (1993) 5375-5377.

- [15] J. Lüdke and H. Ahlers, *Hybrid control used to obtain sinusoidal curve form for the power loss measurement on magnetic materials*. Proceedings of the EMMA Conference 2000: Materials Science Forum 373-376 (2001) 469-472.
- [16] F. Fiorillo, *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism, Academic Press (2004) ISBN: 0-12-257251-3.
- [17] E. Reiplinger, *Assessment of grain-oriented transformer sheets with respect to transformer noise*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 21 (1980) 257-261.
- [18] IEC 60076-10:2016, *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*
- [19] M. Ishida, S. Okabe and K. Sato, *Analysis of noise emitted from three-phase stacked transformer model core*, Kawasaki Steel Technical Report 39 (1998) 29-35.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-17:2021

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	48
INTRODUCTION.....	50
1 Domaine d'application	51
2 Références normatives	51
3 Termes et définitions	52
4 Principes généraux	53
4.1 Principe de la méthode	53
4.2 Éprouvette d'essai	56
4.3 Appareillage d'essai.....	56
4.3.1 Généralités	56
4.3.2 Culasse	56
4.3.3 Enroulements	58
4.3.4 Pont.....	59
4.3.5 Capteur optique	60
4.3.6 Cible optique	61
4.3.7 Fixation	61
4.3.8 Butée de fin de course.....	62
4.3.9 Plaque de verre plane.....	62
4.4 Compensation du flux d'air.....	62
4.5 Alimentation électrique.....	63
4.6 Instruments de mesure	63
5 Procédure de mesure	65
5.1 Principe de mesure	65
5.2 Préparation du mesurage	66
5.3 Réglage de l'alimentation électrique.....	67
6 Détermination des caractéristiques	67
6.1 Détermination de la polarisation magnétique $J(t)$	67
6.2 Détermination de la déformation de magnétostriction $\lambda(t)$	68
6.3 Détermination de la boucle papillon	68
6.4 Détermination de la valeur de crête à crête λ_{p-p} et de la valeur zéro à crête λ_{0-p}	68
7 Reproductibilité du mesurage de la valeur de crête à crête λ_{p-p}	69
8 Rapport d'essai	69
Annexe A (normative) Exigences de l'appareillage d'essai pour le mesurage des caractéristiques de magnétostriction	70
A.1 Généralités	70
A.2 Réglage correct de la longueur de base du mesurage de magnétostriction	70
A.3 Contrôle strict de la polarisation magnétique sinusoïdale	71
A.4 Isolation de l'appareillage d'essai contre les bruits externes	72
A.5 Contrôle de la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai	73
A.6 Suppression des vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai	75
A.7 Évitement des résonances dans l'éprouvette d'essai et l'appareillage d'essai	75
A.8 Étalonnage et vérification de l'appareillage d'essai	76
Annexe B (informative) Mesurages des caractéristiques de magnétostriction sous une contrainte de compression externe	80
B.1 Généralités	80

B.2	Éprouvette d'essai	80
B.3	Appareillage d'essai.....	80
B.4	Procédure de mesure.....	81
B.5	Détermination des caractéristiques	82
Annexe C (informative) Compensation du flux d'air par des moyens numériques		83
Annexe D (informative) Contrôle de la forme d'onde sinusoïdale de la tension secondaire induite par des moyens numériques		84
Annexe E (informative) Caractéristiques de magnétostriction pour la conception acoustique des transformateurs de puissance.....		86
E.1	Processus de développement du bruit/son à vide des transformateurs.....	86
E.2	Niveaux acoustiques à vide des transformateurs et déformation de magnétostriction	86
E.3	Niveaux de vibrations caractéristiques de la déformation de magnétostriction.....	87
E.4	Détermination des niveaux de vibrations	88
E.4.1	Généralités	88
E.4.2	Niveaux de vitesse	88
E.4.3	Niveaux d'accélération.....	90
E.4.4	Reproductibilité des mesurages des valeurs du niveau de vitesse et du niveau d'accélération	91
Bibliographie.....		92
Figure 1 – Représentations de la boucle papillon, de la valeur de crête à crête et de la valeur zéro à crête		52
Figure 2 – Schéma d'un appareillage d'essai (section).....		54
Figure 3 – Schéma des bâtis d'essai avec différents types de culasse		57
Figure 4 – Section du support d'enroulement et du pont (schéma)		58
Figure 5 – Circuit fondamental du système de mesure		64
Figure A.1 – Boucle papillon d'une tôle magnétique à grains orientés à haute perméabilité découpée perpendiculairement à la direction de laminage [3]		78
Figure B.1 – Schéma d'un appareillage d'essai de mesure sous contrainte de compression externe (section)		80
Tableau E.1 – Coefficients de pondération A à une fréquence magnétisante de 50 Hz.....		89
Tableau E.2 – Coefficients de pondération A à une fréquence magnétisante de 60 Hz.....		90

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

**Partie 17: Méthodes de mesure des caractéristiques de magnétostriction
des bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés au moyen d'un
essai sur tôle unique et d'un capteur optique**

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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 60404-17 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
68/685/CDV	68/692/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 <http://www.iec.ch/standardsdev/publications>.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-17:2021

INTRODUCTION

Le présent document fournit des méthodes normalisées de mesure des caractéristiques de magnétostriction des bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés sous un champ magnétique appliqué alternatif à une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz. Les détails techniques de ces méthodes sont spécifiés après d'intenses réflexions parmi les spécialistes en magnétostriction, de manière à pouvoir prévoir une reproductibilité satisfaisante des mesurages effectués. Les mesurages exigent de détecter les minuscules vibrations de l'éprouvette d'essai à une résolution de 0,01 μm ou meilleure. Pour satisfaire à cet enjeu, non seulement les aspects magnétiques, mais également les aspects mécaniques de l'appareil d'essai, par exemple l'influence du frottement, les forces de Maxwell, la résonance et les vibrations externes, devaient être définis.

Le présent document spécifie les méthodes qui permettent de déterminer les caractéristiques de magnétostriction de la boucle papillon, ainsi que les valeurs de crête à crête et les valeurs de zéro à crête de la déformation de magnétostriction. Les caractéristiques complémentaires des niveaux de vitesse et des niveaux d'accélération sont décrites à l'Annexe E.

Le rapport technique IEC TR 62581:2010 [1]¹ a examiné les méthodes de mesure des caractéristiques de magnétostriction des tôles magnétiques à grains orientés au moyen d'un essai sur tôle unique. Différentes méthodes de mesure de la variation de longueur des différentes éprouvettes d'essai ont été utilisées. Toutefois, dans le cas des méthodes qui utilisent des capteurs en contact avec l'éprouvette d'essai, les décalages de mesure associés aux méthodes de contact sont difficiles à éviter. En outre, l'utilisation des méthodes exige des compétences particulières pour effectuer les mesurages. Par conséquent, le présent document spécifie des méthodes qui utilisent un capteur optique, à savoir un vibromètre Doppler à laser, qui satisfait aux exigences de non-contact, de haute résolution et de haute reproductibilité des mesurages.

Il est clairement établi qu'une contrainte mécanique exercée sur les tôles magnétiques à grains orientés influe fortement sur la magnétostriction [1]. Les tôles magnétiques à grains orientés ont un comportement particulier par rapport à leur sensibilité à une contrainte de compression dans la direction du laminage, par comparaison avec d'autres types de tôles magnétiques. Ce comportement dépend du degré d'orientation des grains du matériau et du niveau de contrainte de traction dans le matériau appliquée par les revêtements de surface. Les méthodes de mesure sous une contrainte de compression externe sont décrites à l'Annexe B.

Des comparaisons interlaboratoires internationales des mesurages de magnétostriction ont été effectuées de manière répétée en réduisant l'étendue des méthodes [2], [3], [4]. Un écart-type relatif de plus de 20 % a été obtenu pour la reproductibilité des mesurages lorsque différentes méthodes ont été admises. Cet écart est inférieur à 2 % lorsque des appareils d'essai qui observent les principes décrits dans le présent document ont été utilisés pour évaluer les tôles magnétiques à grains orientés découpées dans la direction du laminage dans des conditions de polarisation magnétique maximale de 1,7 T et de fréquence magnétisante de 50 Hz.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 17: Méthodes de mesure des caractéristiques de magnétostriction des bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés au moyen d'un essai sur tôle unique et d'un capteur optique

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 est applicable aux bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés spécifiées dans l'IEC 60404-8-7 pour le mesurage des caractéristiques de magnétostriction sous un champ magnétique appliqué alternatif à une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz.

Le présent document définit les principes généraux et les détails techniques de mesure des caractéristiques de magnétostriction des bandes et tôles magnétiques en acier à grains orientés au moyen d'un essai sur tôle unique et d'un capteur optique.

NOTE 1 La méthode de l'accéléromètre [5] constitue également une méthode établie de mesure de la magnétostriction. Toutefois, elle est plus adaptée au mesurage de la magnétostriction sous une contrainte de traction ou de compression externe, et non une contrainte nulle, parce qu'elle dispose un poids sur l'éprouvette d'essai afin d'éviter que celle-ci ne soit déformée. Étant donné que le présent document inclut un mesurage en l'absence de contrainte, la méthode par capteur optique est fournie comme méthode optimale.

Le présent document est applicable au mesurage:

- de la boucle papillon;
- de la valeur de crête à crête λ_{p-p} ;
- de la valeur zéro à crête λ_{0-p} .

Les caractéristiques de magnétostriction sont déterminées pour une tension secondaire induite sinusoïdale, pour une valeur crête définie de la polarisation magnétique et à une fréquence magnétisante définie.

NOTE 2 Le terme "polarisation magnétique" est employé tout au long du présent document tel qu'il est décrit dans l'IEC 60050-121:1998, 121-11-54. Certaines normes de la série IEC 60404 [6] emploient le terme "induction magnétique".

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 60050-103, *Vocabulaire Électrotechnique International – Partie 103: Mathématiques – Fonctions* (disponible sur www.electropedia.org)

IEC 60050-121, *Vocabulaire Électrotechnique International – Partie 121: Électromagnétisme* (disponible sur www.electropedia.org)

IEC 60050-221, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 221: Matériaux et composants magnétiques* (disponible sur www.electropedia.org)

IEC 60050-801, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique* (disponible sur www.electropedia.org)

IEC 60404-8-7, *Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully-processed state* (disponible en anglais seulement)

IEC 61672-1:2013, *Électroacoustique – Sonomètres – Partie 1: Spécifications*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-103, l'IEC 60050-121, l'IEC 60050-221, l'IEC 60050-801, l'IEC 61672-1 et 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:

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

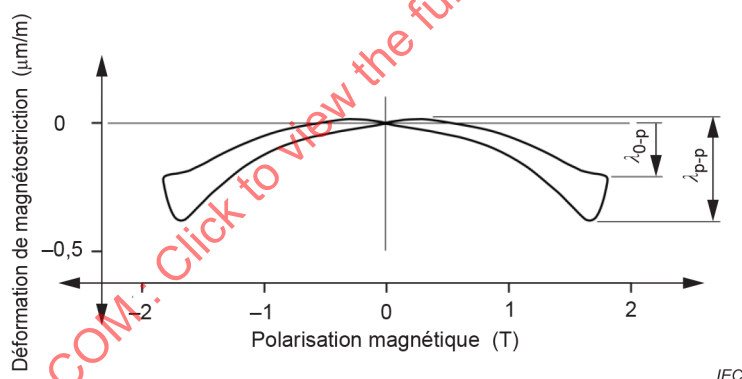
3.1

boucle papillon

courbe papillon

cycle d'hystérésis de déformation de magnétostriction en fonction d'une polarisation magnétique le long de la direction d'application d'un champ magnétique appliqué alternatif pendant une durée d'aimantation, comme cela est représenté à la Figure 1

EXEMPLE



Légende

- λ_{p-p} valeur de crête à crête
 λ_{0-p} valeur zéro à crête

Figure 1 – Représentations de la boucle papillon, de la valeur de crête à crête et de la valeur zéro à crête

3.2

λ_{p-p}

valeur de crête à crête

amplitude crête à crête de déformation de magnétostriction le long de la direction du champ magnétique appliqué alternatif, dont la valeur absolue est exprimée en μm/m

Note 1 à l'article: La valeur crête à crête peut être lue à partir de la boucle papillon comme cela est représenté à la Figure 1.

3.3

λ_{0-p}

valeur zéro à crête

différence de déformation de magnétostriction le long de la direction d'application du champ magnétique alternatif entre les valeurs au niveau maximal spécifié de polarisation magnétique et à la valeur zéro de la polarisation magnétique, dont la valeur positive ou négative est exprimée en $\mu\text{m/m}$

Note 1 à l'article: La valeur zéro à crête peut être lue à partir de la boucle papillon comme cela est représenté à la Figure 1.

3.4

L_v

niveau de vitesse

indicateur de vitesse de magnétostriction constitué de toutes les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction concernée, exprimé en dB

Note 1 à l'article: Le filtre de pondération fréquentielle "A" défini dans l'IEC 61672-1:2013 peut être appliqué au niveau de vitesse pondéré L_{vA} obtenu, exprimé en dB(A).

3.5

L_a

niveau d'accélération

indicateur d'accélération de magnétostriction constitué de toutes les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction concernée, exprimé en dB

Note 1 à l'article: Le filtre de pondération de fréquence "A" défini dans l'IEC 61672-1:2013 peut être appliqué au niveau d'accélération pondéré L_{aA} obtenu, exprimé en dB(A).

4 Principes généraux

4.1 Principe de la méthode

Un essai sur tôle unique et un capteur optique permettent de mesurer une variation de longueur d'une éprouvette d'essai par rapport à sa longueur de base sous un champ magnétique alternatif. Les caractéristiques de magnétostriction du matériau sont déterminées à partir de la variation de la longueur de base de l'éprouvette d'essai pour des valeurs de crête définies de la polarisation magnétique et à une fréquence magnétisante spécifiée.

Un appareillage d'essai schématisé est représenté à la Figure 2. L'appareillage d'essai qui comprend les enroulements, un support d'enroulement, un pont, une culasse, une cale de serrage, un poids, une butée de fin de course, un capteur optique et des structures supports auxiliaires doit être fixé sur une table antivibratoire. L'appareillage d'essai peut être assemblé sur un socle rigide non magnétique et fixé sur la table antivibratoire.

NOTE 1 Les méthodes de mesure sous une contrainte de compression externe sont décrites à l'Annexe B.

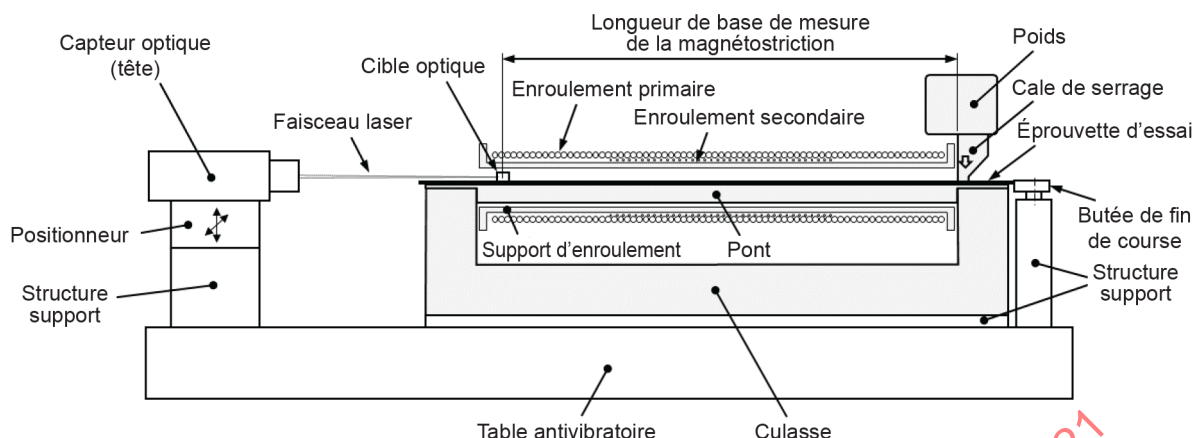


Figure 2 – Schéma d'un appareillage d'essai (section)

L'éprouvette d'essai doit être placée sur le pont à l'intérieur des deux enroulements suivants enroulés sur le support correspondant (voir 4.3.3):

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

La culasse placée sous l'éprouvette d'essai doit permettre une fermeture du flux. Les deux faces polaires doivent se situer dans un plan horizontal. La section de la culasse doit être suffisamment grande par comparaison avec celle de l'éprouvette d'essai. Plusieurs types de culasses peuvent être utilisés (voir 4.3.2).

Le support d'enroulement doit être disposé de façon symétrique entre les deux faces polaires de façon à répartir de manière symétrique le champ magnétique à l'intérieur dudit support. La longueur du support d'enroulement doit être la plus grande possible.

Le pont entre les deux faces polaires doit être placé à l'intérieur du support d'enroulement sans entrer en contact avec lui. Le pont doit être suffisamment rigide pour maintenir à plat l'éprouvette d'essai qui y repose, et la surface sur laquelle est placée ladite éprouvette doit être plane, lisse et recouverte d'un film à faible frottement (voir 4.3.4).

Les deux extrémités du pont doivent être maintenues en contact étroit avec les faces polaires. L'espace restant entre les extrémités du pont et les faces polaires doit être rempli d'une petite quantité de graisse de silicone pour vide poussé, tout en maintenant la surface supérieure de la bande de pont plane. Afin d'éviter la formation de grandes cavités, il convient de répartir la graisse sur la face polaire selon un motif en grille. Par ailleurs, le pont est mis en place et comprimé depuis la partie supérieure d'une plaque de verre plane qui repose sur ce dernier. L'application de la graisse doit faire l'objet d'une attention particulière afin de ne pas tacher la surface du film à faible frottement. Le pont doit pouvoir être remplacé afin de maintenir la surface lisse (voir 4.3.4 et l'Article A.8).

NOTE 2 Une inertie chimique, une faible pression de vapeur, une solidification de longue durée difficile à réaliser constituent les propriétés appropriées de la graisse de silicone pour vide poussé. Toutefois, lorsque la graisse tache la surface du film à faible frottement et/ou la surface arrière de l'éprouvette d'essai, la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette augmente et la valeur de la magnétostriction diminue. L'acétone permet d'éliminer les taches de graisse.

NOTE 3 Une bobine de H de longueur identique à la bobine secondaire peut être incorporée au pont à l'intérieur de l'enroulement secondaire afin de détecter le champ magnétique $H(t)$ appliqué à l'éprouvette d'essai. Ceci est utile pour étudier les caractéristiques de magnétostriction d'une tôle magnétique à grains orientés.

L'éprouvette d'essai doit être placée sur le pont de sorte que son axe coïncide avec l'axe horizontal de symétrie du support d'enroulement (ci-après, appelé simplement "l'axe du support d'enroulement").

NOTE 4 Des défauts d'alignement de l'éprouvette d'essai peuvent provoquer des vibrations latérales de cette dernière sous l'effet de la force de Maxwell, qui participe à l'alignement des axes de l'éprouvette et du support d'enroulement, ce qui entraîne des décalages de mesure.

Les deux extrémités de l'éprouvette d'essai doivent surplomber le pont (voir l'Article A.6). Les parties de l'éprouvette d'essai situées à l'extérieur des faces polaires ne doivent pas dépasser quelques mm (voir l'Article A.7). L'extrémité de l'éprouvette d'essai opposée à la fixation doit pouvoir se déplacer librement. Cette extrémité ne doit être reliée à aucun élément (voir l'Article A.7). L'autre extrémité de l'éprouvette d'essai doit être en contact avec la butée de fin de course sur toute la largeur.

Lors du mesurage, l'éprouvette d'essai doit être fixée sur l'appareillage d'essai au moyen de la cale de serrage et du poids (voir 4.3.7). Le côté de la cale de serrage qui fait face au capteur optique doit être aligné sur le bord interne de la face polaire (voir la Figure 2 et l'Article A.2).

Aucun poids, sauf la cible optique, ne doit être placé sur l'éprouvette d'essai entre l'extrémité de l'éprouvette opposée à la fixation et la cale de serrage (voir l'Article A.5) [12].

La cible optique doit être placée sur l'éprouvette d'essai à l'intérieur du support d'enroulement de sorte que la distance entre le centre de la cible et le bord interne de la face polaire soit de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ lorsque l'éprouvette est placée sur le pont (voir la Figure 2 et 4.3.5).

NOTE 5 Lorsque la cible optique est proche de la face polaire, des vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai sur ladite face peuvent provoquer des décalages de mesure (voir l'Article A.2).

Le capteur optique doit être placé dans la position optimale de manière à augmenter le plus possible le rapport signal/bruit du signal de sortie. Le faisceau laser doit être parallèle à l'axe du support d'enroulement à $\pm 0,1^\circ$ afin de prévenir les décalages de mesure dus aux vibrations verticales et latérales de l'éprouvette d'essai.

NOTE 6 Le capteur optique est situé à une distance optimale de la cible optique afin d'augmenter le plus possible le rapport signal/bruit du signal de sortie. Les distances optimales sont habituellement spécifiées dans le manuel d'instructions du capteur optique.

NOTE 7 L'inclinaison du faisceau laser peut être ajustée de sorte que les déplacements du faisceau laser par rapport à l'axe du support d'enroulement au niveau de ses deux extrémités soient les mêmes à $\pm 0,7 \text{ mm}$.

Il convient d'ajuster la position du faisceau laser afin d'accroître le plus possible le niveau d'intensité du faisceau réfléchi détecté par le capteur optique de manière à augmenter le rapport signal/bruit du signal de sortie. Il convient de monter le capteur optique sur un positionneur externe afin d'ajuster plus facilement la position du faisceau laser (voir la Figure 2).

La longueur de base propre au mesurage de la magnétostriction correspond à la distance le long de l'axe du support d'enroulement entre le centre de la cible optique et le côté de la cale de serrage face au capteur optique (voir la Figure 2).

Les structures supports auxiliaires proches du circuit magnétique doivent être non magnétiques. Une attention particulière doit être considérée pour éviter tout court-circuit électrique autour du flux magnétique par l'intermédiaire du circuit magnétique.

Il convient que tous les éléments placés sur la table antivibratoire y soient stabilisés afin de prévenir toute résonance et toute transmission de vibrations imprévues à l'appareillage d'essai.

Il convient d'éloigner l'appareillage d'essai de tout bruit externe. L'appareillage d'essai ne doit pas être touché (main, outils) au cours du mesurage, sinon des vibrations de l'appareillage peuvent être induites, provoquant, à leur tour, des décalages de mesure. Il convient de placer l'appareillage d'essai de sorte que l'axe du support d'enroulement soit approximativement perpendiculaire à la direction du champ magnétique terrestre (voir l'Article A.4).

NOTE 8 Un simple blindage magnétique et un pare-vent recouvrant l'appareillage d'essai peuvent affaiblir l'influence des bruits magnétiques et acoustiques externes respectivement.

Il est primordial que la surface sur laquelle est placée l'éprouvette d'essai soit plane et propre afin de stabiliser à de faibles valeurs la force de frottement qui agit sur l'éprouvette d'essai (voir l'Article A.5). Une plaque de verre plane doit être utilisée pour vérifier et maintenir la planéité (voir 4.3.2, 4.3.4 et 4.3.9).

L'appareillage d'essai doit être vérifié de sorte qu'il n'y ait aucune vibration hors plan de l'éprouvette d'essai ni aucun effet de résonance qui provoque des décalages de mesure (voir l'Article A.8).

4.2 Éprouvette d'essai

L'éprouvette d'essai doit être rectangulaire et plane. Elle doit être exempte de repères de pliage, d'indentations et de rayures avec contrainte résiduelle. La surface arrière de l'éprouvette d'essai doit être exempte de substances qui affectent le frottement telles que la graisse, les adhésifs, les liquides, les poudres, etc. (voir l'Article A.5).

La longueur et la largeur de l'éprouvette d'essai doivent être de $500 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ et de $100 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ respectivement.

L'éprouvette d'essai doit être découpée parallèlement à la direction de laminage sauf spécification contraire.

L'éprouvette d'essai doit être découpée sans formation de bavures excessives ou de distorsions mécaniques. Les contraintes qu'exerce le procédé de découpe sur l'éprouvette d'essai doivent être les plus faibles possible. L'éprouvette d'essai doit être manipulée avec le plus grand soin afin d'éviter toute introduction supplémentaire de contraintes.

NOTE 1 La contrainte introduite dans l'éprouvette d'essai peut créer des domaines magnétiques à 90 degrés dans le matériau, ce qui provoque des décalages de magnétostriction.

NOTE 2 Une technique de découpe par laser peut être utilisée sous réserve de démontrer la comparabilité des résultats. Cette technique peut générer des contraintes importantes le long des bords de coupe [6].

Lors de la découpe d'une éprouvette d'essai, le bord de la bande parent sert de direction de référence. L'angle entre la direction de référence et la direction de découpe doit être de $\pm 1^\circ$.

4.3 Appareillage d'essai

4.3.1 Généralités

Les composants de l'appareillage d'essai doivent être assemblés avec un défaut d'alignement minimal afin de prévenir les décalages de mesure. Plus particulièrement, la planéité de la surface sur laquelle repose l'éprouvette d'essai doit être assurée.

Pour éviter toute résonance avec les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction, l'appareillage d'essai doit être exempt de fréquences propres comprises entre 50 Hz et 1 000 Hz (voir l'Article A.7).

4.3.2 Culasse

Il convient que la culasse présente une faible aimantation résiduelle et une faible réluctance. La culasse doit être fixée sur l'appareillage d'essai de sorte que les deux faces polaires soient dans le même plan horizontal.

NOTE 1 Le fait que les deux faces polaires sont dans le même plan horizontal peut être confirmé par la répartition uniforme d'une mince pellicule liquide sur toute la surface comprise entre les faces polaires et la plaque de verre lorsqu'un liquide tel que de l'alcool est versé sur la face polaire et la plaque de verre est placée sur lesdites faces. Une différence de hauteur et/ou une inclinaison entre les deux faces polaires peuvent provoquer une déformation de la bande de pont et des décalages de mesure (voir l'Article A.6).

NOTE 2 Du fait de la déformabilité élastique de la culasse, les deux faces polaires ne peuvent plus se situer dans le même plan selon le mode de fixation de la culasse, même si la réalisation de la culasse seule permettait que les deux faces polaires se situent dans le même plan.

Une attention particulière doit être considérée pour éviter une détérioration des propriétés magnétiques de la culasse engendrée par des contraintes excessives et pour prévenir toute vibration de la culasse au cours de l'aimantation. Il convient de fixer fermement la culasse sur la table antivibratoire, ou sur le socle rigide, en des points proches des faces polaires de sorte qu'elle ne soit pas déplacée par l'effort de serrage. La dimension extérieure de la culasse le long de l'axe du support d'enroulement doit être légèrement inférieure à 500 mm. Une dimension comprise entre 494 mm et 496 mm est recommandée.

La culasse peut être une culasse simple verticale ou une culasse double horizontale (voir la Figure 3). D'autres types de culasses peuvent être utilisés à condition que l'éprouvette d'essai ne soit soumise à aucune contrainte due à la culasse, et que la comparabilité des résultats soit démontrée.

La culasse verticale doit comporter deux faces polaires d'une longueur de $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ le long de l'axe du support d'enroulement et d'une largeur comprise entre 105 mm et 110 mm. La hauteur de la culasse doit être comprise entre 80 mm et 90 mm.

La culasse horizontale doit comporter deux faces polaires d'une longueur comprise entre 50 mm et 60 mm le long de l'axe du support d'enroulement et d'une largeur comprise entre 400 mm et 500 mm. La hauteur de la culasse doit être de 10 mm environ.

D'autres dimensions de la culasse peuvent être applicables sous réserve de démontrer la comparabilité des résultats.

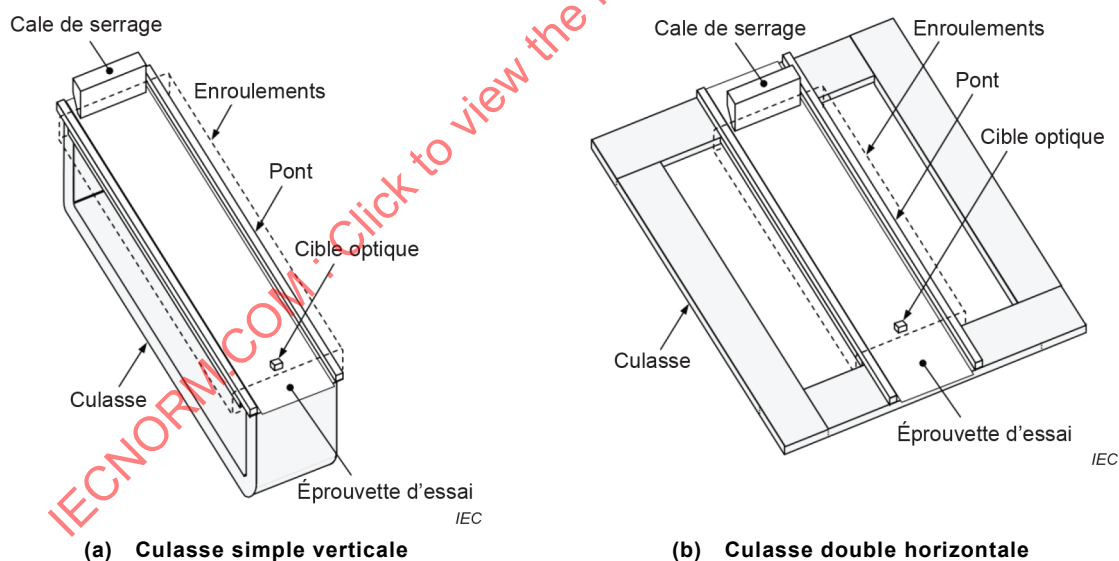


Figure 3 – Schéma des bâtis d'essai avec différents types de culasse

NOTE 3 Des expériences ont confirmé que la différence des résultats de mesure, lors du remplacement d'une culasse verticale par une culasse horizontale, est suffisamment faible par comparaison avec la reproductibilité du mesurage qu'exige le présent document [3].

La culasse peut être constituée d'un empilement collé ou d'un noyau C de tôles magnétiques à grains orientés à haute perméabilité. Dans le cas de l'empilement collé, les coins doivent comporter des joints bout à bout croisés. Dans le cas de la culasse horizontale, il convient de stratifier les tôles sur une plaque plane avec une faible répartition des particules de colle sur un côté de chaque tôle afin de réduire le plus possible l'introduction de contraintes provoquée par le collage.

La culasse doit être désaimantée avec soin avant utilisation. Pour la désaimantation de la culasse, un enroulement d'excitation doit être enroulé autour de celle-ci. La désaimantation doit être réalisée en l'absence de l'éprouvette d'essai dans l'appareillage d'essai et en réduisant lentement jusqu'à zéro un courant alternatif qui circule dans l'enroulement d'excitation. Cette opération commence par le courant qui produit un champ magnétique dans la culasse nettement au-dessus du coude de la courbe d'aimantation du matériau de la culasse. L'état désaimanté peut être vérifié par la correspondance avérée des valeurs de crête positive et négative du courant magnétisant de l'éprouvette d'essai lors du mesurage de la magnétostriction (voir l'Article A.3). Dans le cas de la culasse simple verticale, il convient d'appliquer une fermeture du flux, de dimensions identiques à la culasse, par exemple, la culasse supérieure, sur les deux faces polaires lors de la désaimantation.

NOTE 4 L'aimantation résiduelle de la culasse peut provoquer des boucles papillon asymétriques et engendrer ainsi des décalages de mesure.

Une double culasse verticale peut être utilisée à condition que la culasse supérieure n'affecte pas la variation de longueur de l'éprouvette d'essai et ne perturbe pas le trajet du faisceau laser entre le capteur optique et la cible optique.

NOTE 5 La double culasse verticale est adaptée aux mesurages des pertes globales par la méthode du courant magnétisant sous réserve du retrait du pont et d'un contact effectif entre les culasses supérieure et inférieure et l'éprouvette d'essai. La méthode de la bobine de H qui utilise une bobine de H incorporée au pont à l'intérieur de l'enroulement secondaire permet des mesurages simultanés de la magnétostriction et des pertes, quel que soit le type de culasse. Pour la méthode de la bobine de H, voir l'IEC 60404-16:2018 [7].

4.3.3 Enroulements

Les enroulements primaire et secondaire doivent être enroulés autour du support d'enroulement. Le support d'enroulement doit être non conducteur et non magnétique. Les dimensions du support d'enroulement doivent être les suivantes (voir la Figure 4):

- longueur: la plus grande possible entre les deux faces polaires;
- largeur interne: supérieure à la largeur du pont; une valeur de 120 mm est recommandée;
- hauteur interne: supérieure à la hauteur du pont; une valeur de 15 mm est recommandée;
- hauteur externe: ≤ 20 mm.

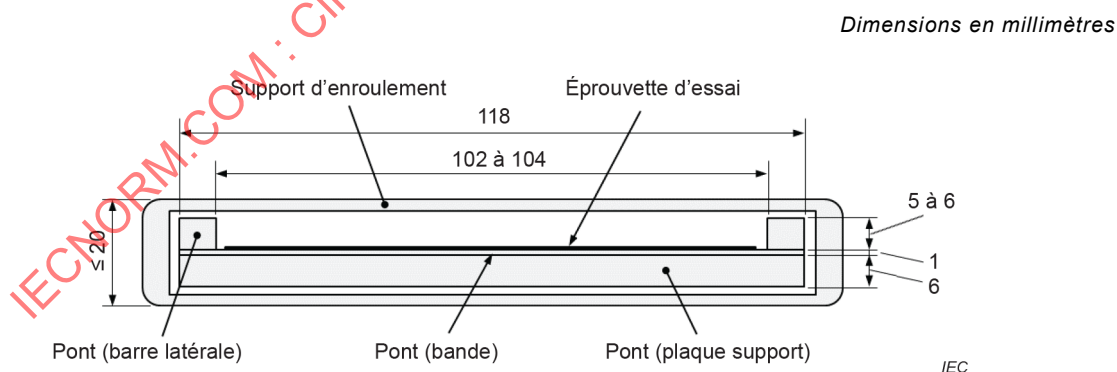


Figure 4 – Section du support d'enroulement et du pont (schéma)

L'enroulement primaire doit être enroulé de façon homogène sur le support d'enroulement, sur une longueur la plus grande possible. Il convient que les parties des brides du support d'enroulement en contact avec l'enroulement primaire soient les plus minces possible à condition qu'elles puissent soutenir ledit support. Une attention particulière doit être considérée pour éviter toute déformation du support d'enroulement due à une tension lors de l'enroulement d'un fil de cuivre autour dudit support.

NOTE 1 L'enroulement primaire peut être construit à partir d'une bobine unique continue et uniforme constituée d'un fil de cuivre de 1 mm de diamètre dont l'enroulement s'effectue spire par spire. L'épaisseur du support d'enroulement peut être réduite par l'utilisation d'un type de bobine autoporteuse pour l'enroulement primaire.

L'enroulement secondaire doit être enroulé sur la partie centrale du support d'enroulement sous l'enroulement primaire sur une demi-longueur de l'enroulement primaire afin d'éviter toute influence du flux magnétique parasite dans les zones proches des deux extrémités de l'enroulement primaire.

NOTE 2 L'augmentation du flux magnétique parasite augmente avec la distance entre l'éprouvette d'essai et la face polaire.

Le nombre de spires de l'enroulement secondaire dépend des caractéristiques des instruments de mesure.

NOTE 3 L'enroulement secondaire peut être construit à partir d'une bobine unique continue constituée d'un fil de cuivre de 0,3 mm de diamètre enroulé uniformément à intervalles réguliers.

La suppression de toute vibration de l'enroulement primaire avec la circulation du courant magnétisant alternatif doit faire l'objet d'une attention particulière.

NOTE 4 La suppression de la vibration de l'enroulement primaire peut s'effectuer par un soutien des enroulements par le bas en plusieurs points sur toute la longueur.

4.3.4 Pont

Le pont est le composant le plus important de l'appareillage d'essai du point de vue mécanique. Le pont doit être suffisamment rigide pour que l'éprouvette d'essai qui y repose soit maintenue à plat pendant le mesurage. Les fréquences propres du pont évaluées par des calculs structuraux doivent être supérieures à 1 200 Hz afin de prévenir toute résonance avec les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction jusqu'à des fréquences maximales de 1 000 Hz.

Le pont doit être constitué de quatre parties: une bande, une plaque support et deux barres latérales (voir la Figure 2, la Figure 3 et la Figure 4). Les quatre parties doivent être en verre époxy de même qualité. D'autres matériaux non conducteurs et non magnétiques peuvent être utilisés sous réserve d'une rigidité du pont meilleure ou égale à celle du pont en verre époxy. Certaines parties ou la totalité des quatre parties peuvent être découpées dans un bloc de verre époxy à condition que le profil de chaque partie ne soit pas déformé.

Les dimensions de chaque partie du pont doivent être les suivantes:

- la bande: épaisseur nominale de 1,0 mm, largeur de 118 mm $\pm$ 0,2 mm et longueur identique à la dimension extérieure des deux faces polaires;
- la plaque support: épaisseur de 6 mm $\pm$ 0,2 mm, largeur identique à la bande de pont et légèrement plus courte que la distance intérieure des faces polaires;
- les barres latérales: épaisseur de 5 mm à 6 mm, largeur de 7 mm à 8 mm et longueur identique à la bande de pont.

NOTE 1 Une bande de pont plus épaisse peut augmenter le flux magnétique parasite dans la zone proche des faces polaires et une bande de pont plus mince peut être facilement déformée par une contrainte en cours de traitement ou d'utilisation.

Les saillies au niveau des deux surfaces de la bande de pont et les surfaces des autres parties auxquelles elles doivent être reliées, doivent être supprimées avant assemblage.

Il est recommandé de pratiquer une ou plusieurs fenêtres ou gorges parallèlement à la longueur au centre de la plaque support afin de réduire le poids du pont, à condition que la rigidité de ce dernier soit suffisante pour maintenir la planéité de l'éprouvette d'essai qui y est placée. Cette opération est destinée à prévenir toute déformation du pont dans la durée par le poids. La largeur et la longueur totales des fenêtres ou des gorges doivent être inférieures à la demi-largeur de la plaque support et aux deux tiers de la longueur de ladite plaque respectivement.

Une bobine de H et/ou une bobine de compensation du flux d'air peuvent être incorporées aux fenêtres ou aux gorges de la plaque support.

NOTE 2 La méthode de réduction du poids par rapport à la rigidité est identique à celle utilisée pour les ponts architecturaux, en ce sens que la rigidité d'une plaque est proportionnelle au cube de son épaisseur.

Les parties du pont ne doivent pas être déformées et les surfaces doivent être lisses. Les quatre parties du pont doivent être étroitement reliées entre elles de manière symétrique comme cela est représenté à la Figure 2, la Figure 3 et la Figure 4 tout en maintenant la planéité de la bande de pont. Ces parties peuvent être reliées à l'aide d'un ruban adhésif double face peu épais et des vis en plastique très résistantes peuvent être utilisées lorsque nécessaire.

Le film à faible frottement doit adhérer au centre de la largeur de la bande de pont sur toute sa longueur sans la présence de poussières ou de poches d'air sous le film. Ce film doit être un mince film adhésif en tissu de verre fluoré imprégné de résine (voir l'Article A.5). D'autres types de films peuvent être utilisés sous réserve de démontrer la comparabilité des résultats. L'épaisseur du film doit être inférieure à 0,15 mm et la largeur doit être de $95 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ afin de prévenir toute interaction avec les bords de l'éprouvette d'essai. La non-déformation de la bande de pont lors de l'application du film doit faire l'objet d'une attention particulière.

L'aplanissement des saillies à la surface du film au moyen d'un rouleau adapté, et l'élimination des bavures de bords du film et de l'adhésif restant à la surface dudit film doivent faire l'objet d'une attention particulière.

La bande de pont peut se déformer dans la durée en raison de la contrainte résiduelle exercée à l'intérieur du pont. Il est recommandé de laisser la plaque de verre sur la bande de pont en tant que poids lorsque l'appareillage d'essai n'est pas utilisé sur une longue durée afin d'éviter cette déformation.

Afin de maintenir une surface lisse, le film à faible frottement doit être remplacé ou le pont entier doit être remplacé avant toute usure de la surface du film ou tout endommagement grave de cette dernière dans la durée (voir l'Article A.8).

4.3.5 Capteur optique

Le capteur optique doit être un vibromètre Doppler à laser. D'autres types de capteurs optiques peuvent être utilisés sous réserve de démontrer la comparabilité des résultats.

Le capteur optique doit avoir une résolution de $0,01 \text{ } \mu\text{m}$ ou meilleure pour un déplacement sinusoïdal de la cible optique à une fréquence de 100 Hz. L'étendue de mesure du capteur optique doit être hautement sensible tant que le signal de sortie ne dépasse pas cette étendue, y compris les composantes de bruit. La plage de vitesse type est de $\pm 10 \text{ mm/s}$, $\pm 20 \text{ mm/s}$ ou $\pm 50 \text{ mm/s}$ sortie pleine échelle.

NOTE 1 La résolution de $0,01 \text{ } \mu\text{m}$ dans le déplacement de la cible optique correspond à une résolution de $0,023 \text{ } \mu\text{m/m}$ de la déformation de magnétostriction lorsque la longueur de base est de 436 mm.

Afin d'analyser les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction, la bande de fréquence du capteur optique doit être plus large que la plage comprise entre 50 Hz et 1 200 Hz.

Le signal de réponse du capteur optique doit être suffisamment rapide. Aucune fonction de filtrage interne au capteur optique ne doit être utilisée à moins que la comparabilité des résultats ne soit démontrée.

NOTE 2 Les fonctions de filtrage du capteur optique peuvent accroître le retard du signal de sortie. Le retard du signal de sortie du capteur optique peut être compensé par des moyens numériques. Les aspects d'étalonnage sont traités à l'Article A.8.

Le capteur optique doit être vérifié de sorte que le mesurage d'un déplacement symétrique d'un excitateur d'étalonnage génère un signal de sortie symétrique sans décalage.

NOTE 3 Un bruit à composantes impaires synchronisé sur la fréquence industrielle superposé au signal de sortie du capteur optique peut entraîner des boucles papillon asymétriques.

NOTE 4 Il existe deux types de vibromètre Doppler à laser. Un type de vibromètre mesure la vitesse de la cible optique au moyen d'un seul faisceau laser avec un point de référence interne au capteur, et l'autre type de vibromètre mesure la vitesse différentielle entre la cible optique et un point de référence sur le bâti d'essai au moyen de deux faisceaux lasers. Le dernier type offre l'avantage d'annuler un mouvement relatif entre le capteur optique et le bâti d'essai.

4.3.6 Cible optique

La cible optique doit être un petit bloc léger rigide en matériau non conducteur et non magnétique, par exemple de la résine. La masse de la cible optique doit être inférieure à 0,2 g.

NOTE 1 Un matériau conducteur peut être soumis à des vibrations sous l'effet de la force de Maxwell synchronisée avec le champ magnétique alternatif appliqué. Une cible optique massive peut provoquer un retard d'inertie du déplacement par rapport à l'éprouvette d'essai et une résonance hors plan du réseau de jonction de la cible optique et de l'éprouvette d'essai (voir l'Article A.7).

Les dimensions de la cible optique doivent être les suivantes: hauteur inférieure ou égale à 3 mm, largeur de 5 mm $\pm$ 0,5 mm et longueur de 4 mm à 5 mm. D'autres dimensions de la cible optique peuvent être applicables sous réserve de démontrer la comparabilité des résultats.

NOTE 2 Une cible optique à hauteur accrue peut augmenter le décalage de mesure lors de son inclinaison. Lorsque la surface inférieure est trop petite, la cible optique peut osciller en raison d'une mauvaise adhérence.

Le côté de la cible optique face au capteur optique doit refléter le plus clairement possible le faisceau laser. Un ruban réfléchissant avec des microbilles de verre, telles que celles utilisées pour les panneaux routiers, peut être appliqué sur ce côté.

La cible optique doit adhérer à l'éprouvette d'essai, par exemple, au moyen d'un mince ruban adhésif double face (voir 5.2). La cible optique avec le ruban adhésif peut être utilisée plusieurs fois par son stockage sur une surface non adhérente sous réserve d'une bonne adhérence à l'éprouvette d'essai. Il convient de limiter le nombre de réutilisations, par exemple, 10 fois.

NOTE 3 En cas d'enroulement de l'éprouvette d'essai dans un papier antirouille pendant une longue durée, la surface de l'éprouvette peut absorber l'inhibiteur de rouille volatilisé, ce qui rend difficile l'adhérence de la cible optique. Lorsque l'adhésif ne peut être restauré même lorsque la surface est nettoyée, la cible optique peut adhérer à un mince ruban plastique carré de 10 mm environ fixé à la surface de l'éprouvette d'essai.

4.3.7 Fixation

La fixation doit être constituée de la cale de serrage, du poids et d'un mécanisme de levage et d'abaissement de ces derniers. La cale de serrage doit comprimer verticalement l'éprouvette d'essai avec application d'une force par le poids lors du mesurage (voir la Figure 2). Le poids doit être non magnétique. L'effort de serrage doit être compris entre 15 N et 20 N.

NOTE 1 Des expériences ont confirmé qu'un effort de serrage allant jusqu'à 47,5 N n'influence pas le mesurage [4]. Toutefois, lorsque la face inférieure de la cale de serrage est légèrement inclinée vers la surface de l'éprouvette d'essai, un effort de serrage concentré peut introduire une contrainte excessive dans l'éprouvette d'essai, ce qui peut provoquer des décalages de mesure.

La cale de serrage doit être suffisamment rigide pour résister à l'effort de serrage. La partie intérieure de la cale de serrage doit être non conductrice et non magnétique sur une épaisseur de 10 mm au moins. La face inférieure de la cale de serrage doit avoir un coefficient de frottement élevé, suffisant pour maintenir l'éprouvette d'essai contre la force de magnétostriktion. Les autres parties de la cale de serrage doivent être non magnétiques.

NOTE 2 L'éprouvette d'essai est maintenue par les forces de frottement, proportionnelles à l'effort de serrage.

La largeur de la face inférieure doit être de 95 mm $\pm$ 1 mm afin d'éviter une interaction avec les bords de l'éprouvette d'essai. La longueur de la face inférieure le long de l'axe du support

d'enroulement doit être de $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. La face inférieure doit être parallèle au sommet de la bande de pont (voir l'Article A.5).

Le mécanisme de levage et d'abaissement de la cale de serrage doit déplacer ce dernier en douceur à l'aide d'un guide linéaire, par exemple, un étage maintenu par des guides à billes linéaires, afin de rapprocher le plus possible la cale de serrage de l'éprouvette d'essai sur toute la longueur de la face inférieure sans aucun impact. Le guide linéaire doit être fixé à la verticale sur l'appareillage d'essai. La cale de serrage doit comprimer uniformément l'éprouvette d'essai contre la face polaire par l'effort de serrage spécifié.

NOTE 3 Le guide linéaire empêche tout déplacement horizontal de la cale de serrage.

NOTE 4 Lorsque l'effort de serrage appliqué à l'éprouvette d'essai n'est pas uniforme dans le sens de la largeur, il peut provoquer une vibration latérale de l'éprouvette d'essai et des décalages de mesure. Lorsque l'effort de serrage est nettement inférieur à la valeur spécifiée, la vibration longitudinale de l'éprouvette d'essai due à la magnétostriction peut être amortie et les composantes harmoniques de la vibration peuvent diminuer.

Un chargement de l'éprouvette d'essai dans le support d'enroulement ou son déchargement hors dudit support entraîne l'élévation de la cale de serrage et du poids.

4.3.8 Butée de fin de course

La butée de fin de course doit être non magnétique et conductrice afin de relier à la terre la charge électrique sur l'éprouvette d'essai (voir l'Article A.6). Un fil électrique doit être relié entre la butée de fin de course et la table antivibratoire à la terre. Il convient que la largeur de la butée de fin de course et celle de l'éprouvette d'essai soient identiques.

Le côté de la butée de fin de course face à l'extrémité de l'éprouvette d'essai doit être perpendiculaire à l'axe du support d'enroulement (voir la Figure 2).

La butée de fin de course doit être soutenue sur un arbre pivotant vertical fixé à l'appareillage d'essai afin d'être en contact avec la face d'extrémité de l'éprouvette d'essai sur toute la largeur, même lorsque la découpe de l'extrémité de l'éprouvette d'essai n'est pas exactement perpendiculaire au bord longitudinal de ladite éprouvette. La butée de fin de course peut être rétractée vers le bas afin de faciliter la charge et la décharge de l'éprouvette d'essai dans et hors du support d'enroulement.

NOTE La butée de fin de course peut être une plaque en laiton ou en aluminium fixée à l'arbre d'un vérin pneumatique à poussée unique.

4.3.9 Plaque de verre plane

La plaque de verre plane doit être une plaque de verre flottante, comme les plaques de verre utilisées pour les fenêtres et les miroirs. Les dimensions de la plaque de verre plane doivent être les suivantes: épaisseur nominale de 5 mm ou 6 mm, longueur de $500 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ et largeur de $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

NOTE La planéité d'une plaque de verre peut être vérifiée par la réflexion de la lumière du soleil et la vérification du caractère identique du profil réfléchi sur le mur ou le plafond parallèle à la plaque de verre et cette même plaque de verre.

La plaque de verre plane permet de vérifier si les deux faces polaires se situent dans le même plan, ainsi que la planéité de la bande de pont (voir 4.3.2 et 4.3.4). De plus, la plaque de verre plane est également utilisée comme un poids maintenu au sommet de la bande de pont lorsque l'appareillage d'essai n'est pas utilisé pendant une longue durée (voir 4.3.4).

4.4 Compensation du flux d'air

L'effet du flux d'air sur la tension secondaire induite doit être compensé. Cette compensation peut être réalisée, par exemple, à l'aide d'une inductance mutuelle ou par des moyens numériques décrits à l'Annexe C.

L'inductance mutuelle doit être isolée de l'appareillage d'essai afin de prévenir toute interférence entre le flux magnétique de fuite qui provient de l'inductance et l'appareillage d'essai (voir l'Article A.4).

4.5 Alimentation électrique

L'alimentation électrique doit consister en un générateur de signaux arbitraires commandé par ordinateur et un amplificateur de puissance, ou en un instrument qui intègre ces deux fonctions.

Le générateur de signaux arbitraires doit synthétiser un signal magnétisant de forme d'onde, amplitude et fréquence à programmation externe, de sorte que la forme d'onde de la tension secondaire induite compensée soit sinusoïdale.

La forme d'onde de la tension secondaire induite compensée doit être maintenue sinusoïdale pendant le mesurage. Cette opération peut être réalisée par différents moyens, par exemple par les moyens numériques décrits à l'Annexe D.

Afin de vérifier la présence de la seule composante fondamentale, le facteur de forme de la tension secondaire induite doit être maintenu à $1,110\,7 \pm 0,2\,\%$ ou mieux, et il convient que le taux de distorsion harmonique total de la tension secondaire induite compensée jusqu'à 1 000 Hz au maximum soit inférieur à 1 % (voir l'Article A.3).

NOTE Le taux de distorsion harmonique total peut être calculé comme le rapport de la somme des amplitudes efficaces des harmoniques jusqu'à 1 000 Hz au maximum sur l'amplitude de la fréquence fondamentale.

Une faible impédance interne, une stabilité élevée en tension et en fréquence et un bruit de tension suffisamment faible doivent constituer les caractéristiques de l'amplificateur de puissance. La tension et la fréquence de sortie doivent être maintenues constantes à $\pm 0,2\,\%$ pendant le mesurage.

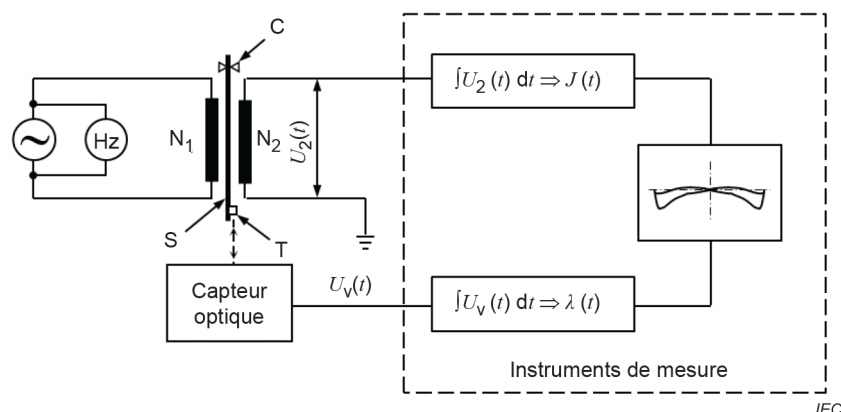
Afin d'éviter toute polarisation continue de l'aimantation, les composantes harmoniques continues et paires de la tension appliquée sur l'enroulement primaire doivent être négligeables (voir l'Article A.3).

Il convient que l'amplificateur de puissance soit de type bipolaire avec des bandes de fréquence et de tension suffisamment larges pour le mesurage. Sous réserve qu'il n'altère pas le processus de boucle de rétroaction, un transformateur d'isolement peut être inséré entre l'amplificateur de puissance et l'enroulement primaire afin de faire correspondre l'impédance entre la sortie de l'alimentation électrique et l'enroulement primaire, éliminer la composante continue de la tension magnétisante et supprimer le bruit de tension au niveau de l'enroulement primaire. Il convient de désaimanter le transformateur d'isolement avant utilisation.

4.6 Instruments de mesure

Le circuit fondamental du système de mesure est représenté à la Figure 5. La fonction de compensation du flux d'air n'est pas représentée à la Figure 5, mais est incluse dans le circuit ou dans le logiciel (voir 4.4 et l'Annexe C).

Le fréquencesmètre peut être retiré du circuit sous réserve d'une commande de l'alimentation électrique par un dispositif de chronométrage à quartz. Les instruments de mesure du champ magnétique $H(t)$ appliqué à l'éprouvette d'essai peuvent être ajoutés au circuit; par exemple, un dispositif de mesure du courant relié en série avec l'enroulement primaire ou une bobine de H incorporée au pont à l'intérieur de l'enroulement secondaire.



Légende

~	alimentation électrique
Hz	fréquencemètre
N_1	enroulement primaire
N_2	enroulement secondaire
S	épreuve d'essai
T	cible optique
C	fixation
$U_2(t)$	tension induite dans l'enroulement secondaire
$U_v(t)$	tension de sortie du capteur optique
$\int U_2(t) dt \Rightarrow J(t)$	fonction d'intégration J du logiciel
$\int U_v(t) dt \Rightarrow \lambda(t)$	fonction d'intégration λ du logiciel

Figure 5 – Circuit fondamental du système de mesure

Les instruments de mesure sont habituellement constitués d'un numériseur étalonné et d'un processeur de signaux numériques (généralement un ordinateur), ou d'un instrument qui intègre ces deux fonctions.

Le numériseur doit avoir plusieurs voies de signaux indépendantes d'entrées de tension. Il convient que le nombre de voies soit supérieur ou égal à trois pour les signaux de $U_2(t)$, $U_v(t)$ et $H(t)$.

Les voies de signaux doivent avoir des impédances d'entrée suffisamment élevées (généralement $> 1 \text{ M}\Omega$ en parallèle avec environ 100 pF). Il convient d'amplifier les signaux d'entrée avant toute numérisation pour assurer au moins une résolution de 12 bits pour l'amplitude donnée de la tension d'entrée afin de réduire l'erreur de numérisation. Il convient que la résolution du convertisseur analogique/numérique soit une résolution de 16 bits ou plus à pleine échelle.

Les voies de signaux doivent fonctionner simultanément avec la synchronisation d'une horloge d'échantillonnage sur l'horloge de lecture du générateur de signaux arbitraires. Un numériseur non synchronisé peut être utilisé sous réserve de la démonstration de la comparabilité des résultats.

Il convient que la fréquence d'échantillonnage du numériseur soit une fréquence multiple de la fréquence magnétisante (condition de Nyquist) et soit suffisamment importante pour réduire l'erreur de numérisation. Pour réduire de manière efficace le bruit au niveau des signaux, il est recommandé que la fréquence d'échantillonnage soit aussi élevée que ce que les dispositifs permettent pour le mesurage, puis moyennée à une fréquence d'échantillonnage suffisante

pour l'enregistrement. Il convient que le nombre d'échantillons par période d'aimantation soit un multiple de la puissance au carré. Il est pratique d'utiliser des fonctions de traitement des données numériques telles que l'intégration, la transformée de Fourier rapide (FFT - Fast Fourier Transform) et un filtre passe-bande. Afin de corriger les déphasages entre les voies de signaux, il convient que la fréquence d'échantillonnage corresponde à 4 096 échantillonnages ou plus par période d'aimantation.

NOTE 1 Pour l'enregistrement des signaux d'ondes, un ensemble de données réduit de 1 024 échantillonnages par période d'aimantation est suffisant. Lorsque la fréquence d'échantillonnage est un multiple exact de la fréquence magnétisante (condition de Nyquist), la fréquence d'échantillonnage peut même être nettement inférieure (par exemple, 128 échantillonnages par période, voir l'IEC 60404-2:1996/AMD1:2008, Annexe A [8]).

Il convient que le numériseur produise le signal de rétroaction numérique pour alimenter le générateur de signaux arbitraires pour le contrôle de la forme d'onde sinusoïdale de la tension secondaire induite compensée par des moyens numériques (voir l'Annexe D).

Le numériseur doit être étalonné et il convient de compenser l'amplitude des déphasages entre les voies de signaux par des moyens numériques.

NOTE 2 L'aspect d'étalonnage est traité à l'Article A.8.

Le processeur de signaux numériques (généralement un ordinateur) doit calculer les caractéristiques magnétiques et de magnétostriction par l'intermédiaire du logiciel d'évaluation qui comprend les fonctions de traitement des données numériques (intégration, FFT et filtre passe-bande).

5 Procédure de mesure

5.1 Principe de mesure

La surface arrière de l'éprouvette d'essai et la surface du film à faible frottement doivent être exemptes de substances qui affectent le frottement (voir l'Article A.5).

Les mesurages doivent être réalisés à une température ambiante de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sur l'éprouvette d'essai qui a tout d'abord été désaimantée.

L'appareillage d'essai et les instruments de mesure doivent être connectés comme cela est représenté à la Figure 5.

Les signaux suivants doivent être numérisés simultanément et enregistrés avec une incertitude de $\pm 0,1 \%$ ou meilleure:

- tension induite dans l'enroulement secondaire $U_2(t)$;
- tension de sortie du capteur optique $U_V(t)$.

Un calcul de la moyenne synchrone des signaux doit être effectué sur un grand nombre de périodes, par exemple, 64 ou 128, afin d'éliminer le bruit non synchronisé des signaux.

L'ensemble de données des signaux $U_2(t)$ et $U_V(t)$ fournit les informations complètes pour un mesurage.

La polarisation magnétique $J(t)$ est calculée à partir de $U_2(t)$ (voir 6.1) et la déformation de magnétostriction $\lambda(t)$ est calculée à partir de $U_V(t)$ (voir 6.2).

La boucle papillon est déterminée par $J(t)$ et $\lambda(t)$ (voir 6.3). La valeur de crête à crête λ_{p-p} et la valeur zéro à crête λ_{0-p} sont déterminées à partir de $\lambda(t)$ (voir 6.4).

5.2 Préparation du mesurage

Au début des mesurages, la surface du film à faible frottement doit être essuyée à l'aide d'une étoffe non tissée trempée dans une petite quantité de solvant adapté, par exemple, de l'acétone, afin d'éliminer les substances de modification du frottement telles que la graisse, les adhésifs, les liquides, les poudres, etc. (voir l'Article A.5).

Lorsque la surface arrière de l'éprouvette d'essai comporte une substance de modification du frottement, cette dernière doit être éliminée à l'aide d'une étoffe non tissée trempée dans une petite quantité de solvant adapté, par exemple, de l'acétone, avant le mesurage (voir l'Article A.5).

La longueur de l'éprouvette d'essai l doit être mesurée avec une incertitude de $\pm 0,1 \%$ ou meilleure. La masse de l'éprouvette d'essai m doit être déterminée avec une incertitude de $\pm 0,1 \%$.

Les éprouvettes d'essai doivent être en bon état et représentatives du matériau à soumettre à l'essai. Lorsque des caractéristiques inhabituelles, par exemple, défaut de planéité, aspect irrégulier, rayures et déformations, qui peuvent être dues à une manipulation ou à une découpe, sont constatées sur l'éprouvette d'essai, elles doivent être consignées dans le rapport d'essai.

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

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

où

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

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

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

ρ_m est la masse volumique conventionnelle de la tôle magnétique à grains orientés spécifiée dans l'IEC 60404-8-7, en kilogrammes par mètres cubes, égale à $7\,650 \text{ kg m}^{-3}$.

La cible optique doit être montée sur l'éprouvette d'essai à l'extérieur de l'appareillage d'essai avant le mesurage. La cible optique doit être positionnée sur l'axe de l'éprouvette d'essai et doit se situer à une distance prédéterminée du bord de l'éprouvette. La distance doit être déterminée de sorte que la distance entre le centre de la cible optique et le côté de la cale de serrage face à la cible soit la même que la longueur de base spécifiée lorsque l'éprouvette d'essai est placée sur le pont (voir la Figure 2).

NOTE 1 Le montage de la cible optique sur l'éprouvette d'essai est facilité par l'utilisation d'une table de préparation de l'éprouvette équipée d'une échelle ou d'une aiguille qui indique la position de montage de la cible optique par rapport à l'extrémité de l'éprouvette d'essai.

L'éprouvette d'essai avec la cible optique doit être placée sur le pont (voir 4.1). Au cours du processus d'installation, l'éprouvette d'essai peut être déposée sur une mince feuille de résine afin de prévenir toute usure à la surface de la tôle à faible frottement; la mince feuille de résine doit être retirée au terme du processus.

La position de l'éprouvette d'essai placée sur le pont doit être ajustée de sorte que l'axe de l'éprouvette d'essai soit aligné sur l'axe du support d'enroulement à $\pm 0,2 \text{ mm}$. L'extrémité de l'éprouvette d'essai doit être en contact avec la butée de fin de course sur toute la largeur (voir la Figure 2).

NOTE 2 Le positionnement de l'éprouvette d'essai est facilité par l'utilisation d'un outil de positionnement latéral qui aligne les deux bords longitudinaux de l'éprouvette symétriquement à l'axe du support d'enroulement, et par

l'utilisation d'un poussoir qui peut pousser progressivement l'éprouvette d'essai vers la butée de fin de course (voir l'Article B.3). Ces outils sont retirés préalablement au mesurage.

L'éprouvette d'essai doit être fixée sur l'appareillage d'essai au moyen de la cale de serrage et du poids.

Le foyer et la position du faisceau laser sur la cible optique doivent être ajustés afin d'augmenter le plus possible le niveau d'intensité du faisceau laser réfléchi détecté par le capteur optique. Une hauteur inférieure du faisceau laser sur la cible optique est préférable afin de supprimer les décalages de mesure en cas d'inclinaison de la cible. Le faisceau laser doit être fixe pendant le mesurage.

Avant le mesurage, l'éprouvette d'essai doit être soigneusement désaimantée dans l'appareillage d'essai par une réduction lente d'un champ magnétique alternatif, à partir d'une valeur bien supérieure à la valeur à mesurer et du coude de la courbe d'aimantation.

NOTE 3 La correspondance entre les valeurs de crête positive et négative du courant magnétisant lors du mesurage de la magnétostriction (voir l'Article A.3) permet de confirmer si l'éprouvette d'essai est effectivement désaimantée.

5.3 Réglage de l'alimentation électrique

Dans la pratique, les valeurs de crête simples ou groupées de la polarisation magnétique $\hat{J}$ à une fréquence magnétisante spécifiée doivent être déterminées à l'avance. Le mesurage doit être effectué de manière continue dans l'ordre croissant des valeurs de crête de polarisation magnétique $\hat{J}$.

La sortie de l'alimentation électrique doit être augmentée lentement, jusqu'à ce que les valeurs de crête de polarisation magnétique $\hat{J}$ aient atteint la valeur spécifiée. La sortie de l'alimentation électrique ne doit pas diminuer pendant la séquence de mesure sauf pour des modifications négligeables.

La forme d'onde de la tension secondaire induite compensée $U_2(t)$ doit être maintenue sinusoïdale à un facteur de forme de $1,110\,7$ à $\pm 0,2\,\%$ ou mieux et il convient que le taux de distorsion harmonique total de la tension secondaire induite compensée $U_2(t)$ jusqu'à $1\,000\,\text{Hz}$ au maximum soit inférieur à $1\,\%$ pendant le mesurage (voir 4.5).

Toute vibration de l'éprouvette d'essai pendant le mesurage doit être consignée dans le rapport d'essai comme une caractéristique inhabituelle.

NOTE La vibration est due à une vibration hors plan importante de l'éprouvette d'essai sur la face polaire. Dans ce cas, les résultats ne sont habituellement pas corrects (voir l'Article A.6).

6 Détermination des caractéristiques

6.1 Détermination de la polarisation magnétique $J(t)$

La polarisation magnétique $J(t)$ doit être calculée par la Formule (2).

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

où

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

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

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

$U_{2c}(\tau)$ est la tension secondaire induite compensée, en volts;

- T est la longueur de la période d'aimantation, en secondes;
 t est une variable de temps, en secondes;
 τ est une variable de temps auxiliaire, en secondes.

Le second terme entre parenthèses de la formule (2) est la moyenne temporelle sur la durée d'une période d'aimantation qui compense la constante d'intégration.

6.2 Détermination de la déformation de magnétostriction $\lambda(t)$

La déformation de magnétostriction $\lambda(t)$ doit être calculée par la Formule (3).

$$\lambda(t) = \frac{1}{k_v l_0} \int_0^t U_v(\tau) d\tau - \lambda_0 \quad (3)$$

où

- $\lambda(t)$ est la déformation de magnétostriction, en $\mu\text{m/m}$;
 $U_v(\tau)$ est la tension de sortie du capteur optique, en volts;
 k_v est la sensibilité du capteur optique, en volts seconde par mètre;
 l_0 est la longueur de base du mesurage de magnétostriction, en mètres (voir la Figure 2);
 λ_0 est une valeur d'étalonnage telle que la moyenne de la déformation de magnétostriction $\lambda(t)$ à deux polarisations magnétiques nulles dans une période d'aimantation soit nulle, en $\mu\text{m/m}$;
 t est une variable de temps, en secondes;
 τ est une variable de temps auxiliaire, en secondes.

Lorsque la sortie du capteur optique est en mode déplacement et $U_v(t)$ est proportionnelle au déplacement de la cible optique, la partie intégrale $\int_0^t U_v(\tau) d\tau$ de la Formule (3) doit être remplacée par $U_v(t)$, et l'unité de k_v est exprimée en volts par mètre.

6.3 Détermination de la boucle papillon

La boucle papillon doit être déterminée par le tracé d'une courbe bidimensionnelle fermée avec la déformation de magnétostriction $\lambda(t)$ qui constitue l'axe vertical et la polarisation magnétique $J(t)$ qui constitue l'axe horizontal pour une période d'aimantation.

Avant de tracer la courbe, il convient de lisser le bruit des signaux $\lambda(t)$ et $J(t)$ par des moyens numériques, par exemple, calcul pondéré de la moyenne de déplacement temporel ou filtrage passe-bande.

6.4 Détermination de la valeur de crête à crête λ_{p-p} et de la valeur zéro à crête λ_{0-p}

La symétrie de la boucle papillon doit être vérifiée avant de déterminer les caractéristiques de magnétostriction. Lorsque la boucle papillon est particulièrement asymétrique, par exemple, lorsque l'asymétrie dépasse 2 %, cette caractéristique doit être consignée dans le rapport d'essai comme une caractéristique inhabituelle.

NOTE 1 Les boucles papillon asymétriques peuvent être dues à de nombreux facteurs, par exemple, défauts d'alignement de l'appareillage d'essai, aimantation résiduelle de l'éprouvette d'essai, aimantation résiduelle de la culasse (voir l'Article A.4), défaut de planéité de l'éprouvette d'essai, déplacement de la cible optique pendant le mesurage et facteurs intrinsèques aux circuits électriques du capteur optique.

La valeur de crête à crête λ_{p-p} et la valeur zéro à crête λ_{0-p} doivent représenter les moyennes de la première et de la seconde demi-valeurs de la période, ce qui correspond aux parties droite et gauche de la boucle papillon (voir la Figure 1).

NOTE 2 Les caractéristiques complémentaires, c'est-à-dire le niveau de vitesse L_v , le niveau de vitesse pondéré A L_{vA} , le niveau d'accélération L_a et le niveau d'accélération pondéré A L_{aA} sont décrites à l'Annexe E.

7 Reproductibilité du mesurage de la valeur de crête à crête λ_{p-p}

La reproductibilité du mesurage de la valeur de crête à crête λ_{p-p} de cette méthode avec l'appareillage d'essai défini ci-dessus est caractérisée par un écart-type relatif de 2 %, mais non inférieur à un écart-type de 0,02 $\mu\text{m/m}$. Cette valeur de reproductibilité a été estimée sur la base des résultats de l'essai de comparaison interlaboratoire internationale [4].

NOTE 1 La valeur zéro à crête λ_{0-p} peut être une valeur positive ou une valeur négative. Par conséquent, la reproductibilité du mesurage qui lui est associée ne peut pas être caractérisée par un pourcentage d'écart-type relatif. L'écart-type de la valeur zéro à crête λ_{0-p} est habituellement un petit peu plus important que celui de la valeur de crête à crête λ_{p-p} .

NOTE 2 L'Annexe A spécifie les exigences de l'appareillage d'essai afin d'améliorer la reproductibilité du mesurage.

8 Rapport d'essai

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

- a) le type et l'identité de l'éprouvette d'essai;
- b) le numéro du présent document (IEC 60404-17), y compris l'année de publication;
- c) le type de capteur optique;
- d) la température ambiante de l'éprouvette d'essai pendant les mesurages;
- e) la fréquence d'aimantation;
- f) les valeurs de crête de la polarisation magnétique;
- g) les résultats des mesurages, y compris les représentations graphiques des boucles papillon;
- h) l'incertitude estimée des mesurages;
- i) les écarts éventuels par rapport à la procédure;
- j) les caractéristiques inhabituelles éventuelles observées (voir 5.2, 5.3 et 6.4);
- k) la date de l'essai.

Annexe A (normative)

Exigences de l'appareillage d'essai pour le mesurage des caractéristiques de magnétostriction

A.1 Généralités

Afin d'obtenir une reproductibilité suffisante de la méthode décrite dans le présent document, les informations suivantes doivent être appliquées:

- le réglage correct de la longueur de base du mesurage de magnétostriction;
- le contrôle strict de la polarisation magnétique sinusoïdale;
- l'isolation de l'appareillage d'essai contre les bruits externes;
- la suppression de la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai;
- la suppression des vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai;
- l'évitement des résonances dans l'éprouvette d'essai et l'appareillage d'essai;
- l'étalonnage et la vérification de l'appareillage d'essai.

A.2 Réglage correct de la longueur de base du mesurage de magnétostriction

La longueur de base du mesurage de magnétostriction doit être la plus grande possible dans un champ magnétique uniforme et unidirectionnel dans la direction longitudinale de l'éprouvette d'essai. Pour obtenir cette condition, l'enroulement primaire doit être discret et le plus long possible entre les deux faces polaires. La longueur de base correspond à la distance le long de l'axe du support d'enroulement entre le centre de la cible optique et le côté de la cale de serrage face au capteur optique.

La magnétostriction d'une tôle magnétique à grains orientés est fondamentalement due aux variations de volume des domaines magnétiques à 90 degrés sous un champ magnétique appliqué alternatif [9]. Le volume des domaines magnétiques à 90 degrés varie du fait des variations de la polarisation magnétique et du champ magnétique. L'influence du champ magnétique augmente avec l'amplitude de ce dernier et quand il existe une composante de champ magnétique perpendiculaire à la surface de l'éprouvette d'essai [1], [10].

Sur la partie de l'éprouvette d'essai située sur la face polaire, la polarisation magnétique diminue avec la distance par rapport au bord interne de la face polaire, et ce, simultanément au déplacement du flux magnétique vers la culasse. Ce phénomène contribue à la force de Maxwell qui entraîne des vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai (voir l'Article A.6). Par conséquent, la partie de l'éprouvette d'essai placée sur la face polaire doit se situer hors de la longueur de base.

Les vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai excitée sur la face polaire entraînent des courbures alternatives de ladite éprouvette au niveau de la partie contiguë à la face polaire dépendant de la valeur d'entrefer sous l'éprouvette. Lorsque la cible optique est montée sur cette partie de l'éprouvette d'essai, les courbures provoquent des inclinaisons alternatives de la cible, ce qui entraîne une variation alternative de la longueur entre la cible optique et le capteur optique. Cette situation peut provoquer des décalages de mesure selon la hauteur du faisceau laser sur la cible optique. Par conséquent, la cible optique doit être placée à une distance de 10 mm du bord de la face polaire [4].

NOTE Par exemple, pour une courbure de l'éprouvette d'essai avec un taux d'inclinaison de 0,5 μm par 10 mm, la variation de longueur entre la cible optique et le capteur optique est égale à 0,1 μm lorsque la hauteur du faisceau laser est de 2 mm sur cette même cible. Cette variation de longueur correspond à une magnétostriction apparente de 0,23 $\mu\text{m/m}$ pour une longueur de base de 436 mm.

La cale de serrage doit être placée sur la face polaire opposée au capteur optique de sorte que le côté de la cale face au capteur optique soit aligné sur le bord interne de la face polaire. Cette opération est destinée à exclure de la longueur de base la partie de l'éprouvette d'essai placée sur la face polaire et à éviter toute vibration hors plan sur cette même face polaire. La cale de serrage peut être placée entre la face polaire et le support d'enroulement à condition que l'effort de serrage ne déforme pas l'éprouvette d'essai.

A.3 Contrôle strict de la polarisation magnétique sinusoïdale

La forme d'onde sinusoïdale de la tension secondaire induite compensée doit être contrôlée de manière plus stricte que ce qui est exigé pour le processus général de mesure des pertes afin de réaliser la polarisation magnétique sinusoïdale dans l'éprouvette d'essai.

Les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction du matériau sont altérées non seulement par les composantes harmoniques de la polarisation magnétique, mais également par les composantes harmoniques du champ magnétique, notamment dans la plage de champ magnétique plus important.

NOTE 1 Le champ magnétique appliqué influe sur les parois des domaines magnétiques à 90 degrés et peut provoquer des variations de volume desdits domaines. Toutefois, les variations de volume des domaines magnétiques à 90 degrés provoquent uniquement une faible variation de la polarisation magnétique le long de la direction de laminage de la tôle magnétique à grains orientés. Par conséquent, sous un contrôle de la forme d'onde sinusoïdale, des harmoniques légères de la tension secondaire induite peuvent entraîner des harmoniques relativement importantes du champ magnétique, notamment au-delà du coude de la courbe d'aimantation.

NOTE 2 Une tôle magnétique à grains orientés comporte en gros deux types de domaines magnétiques à 90 degrés. Un type se répartit dans des domaines magnétiques à 180 degrés, et l'autre type traverse les domaines magnétiques à 180 degrés. Ces deux types de domaines magnétiques à 90 degrés contribuent différemment à la magnétostriction.

NOTE 3 Dans le cas d'une aimantation d'une tôle magnétique à grains orientés parallèle à la direction de laminage, les variations de volume des domaines magnétiques à 90 degrés influencent peu la polarisation magnétique. Cependant, dans le cas d'une aimantation d'une tôle magnétique à grains orientés perpendiculaire à la direction de laminage, les variations de volume des domaines magnétiques à 90 degrés sont étroitement liées aux variations de la polarisation magnétique lorsque le nombre de domaines magnétiques à 90 degrés augmente au-delà d'un certain niveau.

Pour un contrôle de la forme d'onde sinusoïdale, il est nécessaire que le facteur de forme de la tension secondaire compensée soit $\pi/2\sqrt{2} \approx 1,110\,7$. Il ne s'agit toutefois pas de la seule condition, puisque les formes d'onde non sinusoïdales peuvent également produire le facteur de forme de 1,110 7. Un contrôle de la forme d'onde par des moyens numériques augmente parfois des harmoniques plus élevées en raison de l'accumulation de légères désadaptations de phases lors du processus d'itération du calcul de la forme d'onde. Pour éviter cette situation, la tension secondaire induite compensée doit être déterminée dans toute la mesure du possible sans bruit externe et sans déphasage.

Par conséquent, non seulement le facteur de forme, mais également le taux de distorsion harmonique total de la tension secondaire induite compensée doivent être contrôlés pour vérifier que seule la composante fondamentale est présente (voir 4.5). Le facteur de forme de la tension secondaire induite compensée doit être maintenu à 1,110 7 à $\pm 0,2\%$ ou mieux et il convient que le taux de distorsion harmonique total de la tension secondaire induite compensée jusqu'à 1 000 Hz au maximum soit inférieur à 1 % [3].

Une polarisation continue de l'aimantation de l'éprouvette d'essai peut augmenter les valeurs de magnétostriction. Les aimantations résiduelles de la culasse et/ou de l'éprouvette d'essai peuvent provoquer la polarisation continue de l'aimantation. La culasse et l'éprouvette d'essai doivent être désaimantées avec soin en prévoyant une durée suffisante pour diminuer le champ magnétique alternatif avant le mesurage. Les composantes harmoniques continues et paires du courant magnétisant peuvent également provoquer la polarisation continue de l'aimantation. Le signal magnétisant fourni à l'amplificateur de puissance peut contenir des harmoniques paires du fait de la superposition du bruit sur la ligne de signal, et peut entraîner des valeurs de crête positives et négatives différentes du courant magnétisant. Les composantes harmoniques paires du signal magnétisant doivent être supprimées et la composante continue

de la tension magnétisante doit être négligeable. Les valeurs de crête positives et négatives du courant magnétisant doivent être équivalentes pour vérifier l'absence de polarisation continue de l'aimantation lors du mesurage.

A.4 Isolation de l'appareillage d'essai contre les bruits externes

Du fait d'une déformation de magnétostriction relativement faible, environ $1 \mu\text{m/m}$ ou moins, des tôles magnétiques à grains orientés, lors de leur aimantation parallèlement à la direction de laminage, l'appareillage d'essai doit être isolé dans toute la mesure du possible contre les sources de bruit externes, par exemple, sources de bruits de vibrations, magnétiques, électriques et acoustiques. Plus particulièrement, les sources bruits synchronisés sur la fréquence industrielle doivent être isolées parce qu'il est généralement difficile d'éliminer le bruit synchronisé du signal de magnétostriction.

NOTE 1 Une variation de longueur de l'éprouvette d'essai due à la magnétostriction est infime, par exemple, une variation de seulement $0,04 \mu\text{m}$ d'une longueur de base de 400 mm est due à une déformation de magnétostriction de $0,1 \mu\text{m/m}$. Par conséquent, le bruit externe peut facilement provoquer des décalages de mesure.

L'installation de l'appareillage d'essai sur une table antivibratoire doit permettre de l'isoler contre les vibrations transmises par le sol. Les vibrations transmises par les câbles doivent être bloquées par une stabilisation de ces derniers par rapport à la table antivibratoire. Il convient qu'un pare-vent installé autour de l'appareillage d'essai bloque le vent et le bruit acoustique émis par le milieu environnant lorsque ceux-ci affectent le mesurage.

NOTE 2 L'influence du vent et du bruit acoustique sur le mesurage peut être vérifiée par l'observation au moyen d'un oscilloscope des variations du signal de sortie du capteur optique en réaction à une voix humaine. Les effets du pare-vent peuvent être vérifiés par des mesurages effectués avec et sans un couvercle simple constitué de tôles non magnétiques.

Un contact manuel peut entraîner une vibration de l'appareillage d'essai. Tout contact manuel ou à l'aide d'outils de l'appareillage d'essai pendant le mesurage doit être évité.

Le champ magnétique terrestre peut aimanter la culasse et l'éprouvette d'essai, et peut introduire une polarisation magnétique continue dans le circuit magnétique. Pour éviter cette situation, l'axe du support d'enroulement doit être approximativement perpendiculaire à la direction du champ magnétique terrestre. En variante, un simple blindage magnétique disposé autour de l'appareillage d'essai peut être utilisé pour réduire suffisamment les effets du champ magnétique externe sur les mesurages.

NOTE 3 Les effets du blindage magnétique peuvent être vérifiés par des mesurages effectués avec et sans un couvercle simple constitué de tôles magnétiques souples.

Des dispositifs électromagnétiques placés autour de l'appareillage d'essai, par exemple, des inductances mutuelles ou des câbles d'alimentation à courant élevé, ainsi que des dispositifs électromagnétiques tels que des moteurs et des transformateurs, peuvent émettre un champ magnétique externe synchronisé sur la fréquence industrielle et peuvent modifier le champ magnétique appliqué sur l'éprouvette d'essai. L'inductance mutuelle dédiée à la compensation du flux d'air qui libère un flux magnétique dans l'environnement doit être isolée de l'appareillage d'essai. L'appareillage d'essai doit être maintenu le plus possible à distance des dispositifs électromagnétiques et des câbles d'alimentation à courant élevé. En variante, un simple blindage magnétique peut recouvrir l'appareillage d'essai.

NOTE 4 Le flux magnétique de fuite qui provient de l'inductance mutuelle peut être protégé par une fermeture du flux en ferrite doux installée sur l'inductance.

Le capteur optique doit être placé à distance raisonnable de l'éprouvette d'essai et de la culasse afin d'éviter toute influence du flux magnétique de fuite qui provient du circuit magnétique.

Le bruit électrique superposé sur les câbles de transmission du signal peut détériorer la qualité des mesurages. Les signaux de bruit $\lambda(t)$ peuvent accroître les valeurs de crête à crête λ_{p-p} et les valeurs zéro à crête λ_{0-p} . Afin de réduire le bruit au niveau des câbles de transmission du

signal, il convient d'isoler de la masse les câbles de transmission du signal reliés aux bornes d'entrée des instruments de mesure. Il convient d'utiliser des câbles à paires torsadées blindés comme câbles de transmission du signal, les écrans de chaque câble étant reliés à la terre du signal. Le parcours des câbles de transmission du signal doit faire l'objet d'une attention particulière afin d'éviter toute superposition du bruit inductif sur les signaux. Afin de prévenir toute superposition de bruit sur les signaux au sein des instruments de mesure, il convient d'utiliser des amplificateurs et des alimentations électriques continues à faible bruit. Il convient de relier à la terre les instruments de mesure et la table antivibratoire.

Un calcul de la moyenne synchrone des signaux doit être effectué sur un grand nombre de périodes, par exemple, 64 ou 128, afin d'éliminer le bruit non synchronisé des signaux.

Il est nécessaire que l'évaluation des composantes harmoniques de magnétostriction prenne en considération les proportions de bruit harmonique contenues dans le signal de magnétostriction. Les composantes harmoniques paires de la magnétostriction, dans la plage de fréquences concernée doivent être suffisamment plus nombreuses que les composantes harmoniques impaires adjacentes.

A.5 Contrôle de la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai

La force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai doit être maintenue faible et constante. Dans le cas contraire, la valeur de mesure de la magnétostriction diminue de manière significative [12].

Il existe deux cas de frottement: le premier cas est celui dans lequel les deux surfaces de frottement sont planes et propres, et le second cas est celui dans lequel au moins une surface n'est pas plane et/ou la surface qui affecte le frottement est contaminée.

Dans le second cas, la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai peut augmenter de manière significative et la vibration longitudinale de l'éprouvette d'essai due à la magnétostriction peut être amortie également de manière significative. Par conséquent, il est essentiel de vérifier que la surface arrière de l'éprouvette d'essai et la surface sur laquelle repose cette dernière sont planes et exemptes de substances qui affectent le frottement lors du mesurage.

Même dans le premier cas, la vibration longitudinale de l'éprouvette d'essai due à la magnétostriction peut être amortie par la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai en fonction du matériau de la surface sur laquelle repose ladite éprouvette. Il est par conséquent important de réduire l'intensité de la force de frottement afin de réduire les décalages de mesure. L'influence de la force de frottement est notable dans le cas des matériaux moins épais et des matériaux ayant une magnétostriction moindre.

NOTE 1 La force de magnétostriction peut être considérée comme égale à la force externe appliquée qui provoque la même variation de longueur du matériau que la déformation de magnétostriction. Elle peut être calculée à partir de la valeur zéro à crête λ_{0-p} et du module de Young du matériau. Dans ce cas, le module de Young peut être fourni par le fabricant ou mesuré selon la norme ISO dédiée. Par exemple, la force de magnétostriction d'une tôle magnétique à gains orientés d'une épaisseur de 0,23 mm avec un module de Young de 115 GPa peut être estimée égale à 0,26 N environ par 0,1 $\mu\text{m/m}$ de λ_{0-p} .

La force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai est proportionnelle au coefficient de frottement de la surface sur laquelle repose l'éprouvette d'essai, ainsi qu'à la force perpendiculaire appliquée sur la surface. À l'exception de la cible optique, aucun poids ne doit être placé sur l'éprouvette d'essai entre son extrémité opposée à la fixation et à la cale de serrage afin de prévenir les décalages de mesure dus à l'augmentation de la force de frottement [12].

NOTE 2 Par exemple, une force de frottement qui s'exerce sur une tôle magnétique à grains orientés d'une épaisseur de 0,23 mm et d'une longueur de 400 mm, et qui est due au poids de l'éprouvette d'essai peut être estimée égale à 0,35 N environ pour un coefficient de frottement de 0,5. Toutefois, les coefficients de frottement indiqués dans les ouvrages de référence s'appliquent lorsque le frottement des deux surfaces se produit sur une distance relativement longue et peuvent ne pas être applicables lorsque la distance de frottement est aussi courte que 1 μm ,

comme dans le cas du mesurage de magnétostriction de la tôle magnétique à grains orientés dans la direction du laminage.

Un film à faible frottement doit être appliqué à la bande de pont sur laquelle est placée l'éprouvette d'essai afin de réduire la force de frottement. La résine fluorée est adaptée au matériau du film parce que son coefficient de frottement, par rapport à l'acier, est le plus faible (0,1 environ). Cependant, une tôle mince en fluorine est souple et facile à étirer, mais adhère difficilement à la bande de pont sans application d'une contrainte susceptible de déformer ladite bande. Un mince film adhésif en tissu de verre fluoré imprégné de résine est relativement solide et adhère facilement à la bande de pont sans application de contrainte. La largeur du film à faible frottement doit être inférieure à la largeur de l'éprouvette d'essai afin de prévenir toute interaction avec les bavures de bord de l'éprouvette.

NOTE 3 La texture superficielle de fines irrégularités sur le film en tissu de verre fluoré imprégné de résine permet d'empêcher l'accumulation de poussière fine sur la surface de contact avec l'éprouvette d'essai, ainsi que de réduire la surface de contact qui interagit avec la rugosité de surface de l'éprouvette qui peut résister à des variations de longueur de cette même éprouvette.

Le film à faible frottement peut être usé ou endommagé dans la durée. Le film ou le pont entier doit être remplacé en cas d'usure ou d'endommagement grave de la surface dudit film, voir l'Article A.8.

La surface de la bande de pont à laquelle adhère le film à faible frottement doit être plane sans paliers ou saillies modérés afin de réduire les effets liés à la forme de la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai, et également d'éviter les formations d'entrefers sous l'éprouvette, qui peuvent induire les vibrations hors plan de cette même éprouvette. Les saillies présentes sur les deux surfaces de la bande de pont doivent être éliminées avant assemblage, par exemple, au moyen du bord droit d'une tôle d'acier ou d'un papier de verre fin collé sur une plaque plane.

Les forces de Maxwell appliquées sur l'éprouvette d'essai placée sur la face polaire augmentent la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette. L'intensité des forces de Maxwell est inversement proportionnelle à la surface de la face polaire et proportionnelle au carré de la valeur efficace de l'induction magnétique sur cette même face polaire. Par conséquent, il convient que la longueur des faces polaires soit suffisante, 25 mm ou plus, et que la densité de flux sur les faces polaires soit homogénéisée afin de réduire la force de frottement. La bande de pont entre l'éprouvette d'essai et la face polaire permet d'homogénéiser la répartition de la densité de flux.

NOTE 4 Par exemple, la force de Maxwell est estimée égale à environ 0,24 N pour une face polaire de 25 mm x 100 mm avec une densité de flux homogène pour une tôle magnétique à grains orientés d'une épaisseur de 0,23 mm à un niveau de polarisation magnétique du matériau de 1,7 T.

La force électrostatique appliquée sur l'éprouvette d'essai augmente la force de frottement de manière significative. Par conséquent, la charge électrique cumulée sur l'éprouvette d'essai pour certaines raisons doit être mise à la terre par l'intermédiaire du contact avec la butée de fin de course.

La vibration du pont peut modifier la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette d'essai. Par conséquent, toute vibration externe doit être isolée de l'appareillage d'essai par la table antivibratoire et le support d'enroulement doit être séparé du pont afin de prévenir la transmission de vibrations à ce même pont.

Par opposition, la face inférieure de la cale de serrage qui entre en contact avec l'éprouvette d'essai doit avoir un coefficient de frottement suffisamment élevé pour maintenir l'éprouvette d'essai. Pour assurer un maintien suffisant de l'éprouvette d'essai soumise à des vibrations, la face inférieure doit être parallèle au sommet de la bande de pont, et l'effort de serrage exercé sur l'éprouvette d'essai doit être uniforme sur toute la surface de la face inférieure.

NOTE 5 En cas d'inclinaison de la face inférieure par rapport à l'axe du support d'enroulement, la cale de serrage peut vibrer en raison des variations de longueur de l'éprouvette d'essai. Ce phénomène diminue les valeurs de magnétostriction et modifie les composantes harmoniques. Il est possible de vérifier si la face inférieure est parallèle

au sommet du pont en prenant en sandwich une feuille de mesure de la pression, qui peut indiquer la pression appliquée par une variation de la densité de couleur.

A.6 Suppression des vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai

Les forces de Maxwell exercées sur les faces polaires peuvent provoquer des vibrations hors plan de l'éprouvette d'essai selon la valeur d'entrefer sous l'éprouvette. Les vibrations hors plan peuvent induire uniquement de faibles variations de longueur de l'éprouvette d'essai, mais induisent en revanche de fausses variations de longueur dues à des inclinaisons alternatives de la cible optique, ce qui entraîne des décalages de mesure (voir l'Article A.2) [3]. En cas de vibrations hors plan suffisamment importantes de l'éprouvette d'essai sur la face polaire, les vibrations peuvent être transmises à la partie de l'éprouvette sur la longueur de base de mesure de la magnétostriction et peuvent modifier la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette, ce qui peut entraîner des décalages de mesure.

La fréquence des forces de Maxwell représente le double de la fréquence magnétisante, mais les effets des collisions entre l'éprouvette d'essai et la surface sous l'éprouvette peuvent produire des harmoniques plus élevées. La présence de saillies sur la face polaire ou la surface de la bande de pont peut entraîner des vibrations hors plan locales de l'éprouvette d'essai avec des fréquences propres différentes.

Les entrefers sous l'éprouvette d'essai doivent être réduits le plus possible afin de supprimer les décalages de mesure. Pour ce faire, la bande de pont doit être suffisamment solide pour ne pas être déformée par l'application d'une contrainte en cours de traitement et dans la durée, les surfaces de l'éprouvette d'essai et le film à faible frottement doivent être exempts de toute contamination, et les deux faces polaires doivent se situer dans le même plan dans toute la mesure du possible. Aux deux extrémités du pont, la bande de pont doit être en contact étroit avec les faces polaires. L'espace restant entre la bande de pont et les faces polaires doit être rempli de graisse de silicone pour vide poussé tout en maintenant la surface supérieure de la bande de pont plane afin de prévenir toute vibration de ladite bande du fait des vibrations de l'éprouvette d'essai (voir 4.1).

Les deux extrémités de l'éprouvette d'essai doivent surplomber le pont. À défaut, ces extrémités peuvent produire des entrefers importants sous l'éprouvette d'essai en cas de déformation des extrémités par découpage.

A.7 Évitement des résonances dans l'éprouvette d'essai et l'appareillage d'essai

Des résonances dans l'éprouvette d'essai et dans l'appareillage d'essai peuvent influencer des composantes harmoniques particulières de la déformation de magnétostriction [11]. Des calculs structuraux permettent d'évaluer les fréquences propres de l'éprouvette d'essai et de l'appareillage d'essai [12]. La fréquence propre du premier ordre de l'appareillage d'essai doit être supérieure à 1 200 Hz afin de prévenir toute résonance avec les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction jusqu'à des fréquences maximales de 1 000 Hz.

Les fréquences propres dans le plan d'une plaque dans des conditions aux limites d'une extrémité fixée et de l'autre extrémité libre dépendent de la longueur, de la masse volumique et du module d'élasticité du matériau. Par exemple, la première fréquence propre dans le plan d'une tôle magnétique à grains orientés d'une longueur de 500 mm est estimée supérieure à 2 000 Hz [12]. Ces fréquences propres peuvent n'induire aucune résonance effective avec les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction.

Toutefois, dans des conditions aux limites d'une extrémité fixée et de l'autre extrémité reliée à une masse, les fréquences propres dans le plan peuvent être inférieures à 1 000 Hz selon la masse connectée [12]. Par conséquent, l'extrémité de l'éprouvette d'essai opposée à la fixation ne doit pas être reliée. Même dans le cas de mesurages effectués sous une contrainte de compression externe, l'extrémité de l'éprouvette d'essai ne doit pas être fixée au dispositif de

mise sous contrainte et il convient que la masse des parties mobiles de ce dernier soit la plus légère possible (voir l'Article B.3).

Les fréquences propres hors plan d'une plaque dans les conditions aux limites sans fixation dépendent de la longueur, de la masse volumique, de l'épaisseur, du module d'élasticité et du coefficient de Poisson du matériau [11]. Par exemple, les fréquences propres hors plan (de la première à la troisième fréquence) de l'éprouvette d'essai d'une tôle magnétique à grains orientés d'une longueur de 400 mm sont estimées inférieures à 30 Hz [11]. Ces fréquences propres peuvent n'induire aucune résonance effective avec les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction. Toutefois, les parties de l'éprouvette d'essai situées à l'extérieur des faces polaires ou séparées de la bande de pont par des entrefers peuvent avoir des fréquences propres plus élevées qui peuvent résonner avec les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction. La longueur de ces parties de l'éprouvette d'essai ne doit pas dépasser quelques mm afin d'empêcher les résonances.

Les vibrations hors plan peuvent être supprimées ou amplifiées par un poids placé sur l'éprouvette d'essai selon sa masse [12], malgré l'augmentation par ce poids de la force de frottement qui s'exerce sur l'éprouvette. Cependant, une résonance peut se produire en cas de correspondance entre les fréquences propres du système combiné et les composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction sous l'effet de la masse. Par conséquent, aucun poids, à l'exception de la cible optique, ne doit être placé sur l'éprouvette d'essai en matière de résonance et de frottement (voir l'Article A.6).

En cas de résonance, l'amplitude d'une composante harmonique particulière de la déformation de magnétostriction varie avec le déphasage. Lorsque la résonance se produit à la sonorité fondamentale de la magnétostriction, la forme de la boucle papillon est semblable au symbole de l'infini " ∞ ". Lorsque la résonance se produit à des composantes harmoniques plus élevées de la déformation de magnétostriction, les ondes des fréquences de résonance recouvrent l'onde de la déformation de magnétostriction $\lambda(t)$ et la boucle papillon présente des ondulations, avec parfois de multiples interactions. Dans ces cas, les valeurs de λ_{p-p} et λ_{0-p} ne sont généralement pas correctes.

Les résonances au niveau de l'appareillage d'essai peuvent également entraîner des décalages de mesure. La réduction des résonances dans les composants, notamment ceux proches de l'éprouvette d'essai (par exemple, les enroulements avec le support d'enroulement, la cale de serrage, le poids, le pont, la culasse et les câbles reliés à l'appareillage d'essai) doit faire l'objet d'une attention particulière. Ces composants doivent être fixes ou stabilisés par rapport à la table antivibratoire de sorte qu'ils ne peuvent pas vibrer librement. La cale de serrage doit être combinée au poids de sorte que ses fréquences propres ne correspondent pas aux composantes harmoniques de la déformation de magnétostriction.

A.8 Étalonnage et vérification de l'appareillage d'essai

La reproductibilité du mesurage exigée dans le présent document exige un étalonnage soigneux des instruments de mesure et une vérification de l'appareillage d'essai.

Il convient de vérifier le signal de sortie du capteur optique au moyen d'une excitatrice d'étalonnage. Cette vérification peut être effectuée par l'incidence du faisceau laser perpendiculairement à la membrane de l'excitatrice d'étalonnage. Lorsque le signal de sortie obtenu du capteur optique relève de la valeur d'exactitude spécifiée de l'excitatrice d'étalonnage, l'ajustement du niveau de ce même signal n'est pas nécessaire, parce que l'exactitude de mesure de l'excitatrice est généralement plus grande que celle exigée pour le mesurage de la magnétostriction.

NOTE 1 Par exemple, l'exactitude de mesure d'une excitatrice d'étalonnage est de $\pm 3\%$ pour une accélération de 10 m/s^2 en valeur efficace, de $\pm 4\%$ pour une vitesse de 10 mm/s et de $\pm 5\%$ pour un déplacement de $10 \text{ }\mu\text{m}$, à une fréquence de $159,2 \text{ Hz}$ et à une température comprise entre $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.